

1 DOSSIER THÉMATIQUE : GESTES RITUELS. DE LA TRACE À L'INTERPRÉTATION

ACTUALITÉ DE LA RECHERCHE

GÉOSCIENCES ET ARCHÉOLOGIE : INTERACTIONS, COMPLÉMENTARITÉS ET PERSPECTIVES

- 114 Bruno GAVAZZI**
Heureuses rencontres. Vers le développement d'approches intégrées en géosciences et archéologie
- 119 Jean-Paul BRAVARD**
Dialogue interdisciplinaire : de l'unité stratigraphique aux interactions culture-environnement
- 129 Ferréol SALOMON**
Les origines d'Ostie : quelles interactions avec la dynamique d'embouchure ? (Delta du Tibre, Italie)
- 141 Quentin BORDERIE, Rowena Y. BANERJEA, Stéphane BONNET, Yannick DEVOS, Cristiano NICOSIA, Christophe PETIT, Ferréol SALOMON, Nathalie SCHNEIDER, Barbora WOUTERS, & Patrice WUSCHER**
Géoarchéologies des contextes urbains : mieux comprendre les modalités de l'artificialisation des géosystèmes
- 158 Patrice WUSCHER, Christophe JORDA, Quentin BORDERIE, Nathalie SCHNEIDER & Laurent BRUXELLES**
De la formation géologique à la tranchée : trouver et comprendre les sites archéologiques menacés par les travaux d'aménagement du territoire
- 176 Morgan MILLET & Michel GUÉLAT**
Les vestiges antiques de Rennaz-Noville (Vaud, Suisse) et leur contexte sédimentaire : nouvelles évidences de l'écroulement du *Tauredunum*
- 188 Théophile PIAU, François BÉTARD, Fabienne DUGAST, Gilles ARNAUD-FASSETTA & Vincent VIEL**
Dynamique géomorphologique holocène et occupation humaine dans le bassin-versant de l'Eure (Bassin de Paris, France) : potentiels d'une approche géoarchéologique multiscale et diachronique
- 205 Dominique SCHWARTZ, Vincent ROBIN, Pierre ADAM, Philippe SCHAEFFER, Anne GEBHARDT, Pierre-Alexis HERRAULT, Benjamin KELLER, Daniele DAPIAGGI, Claire STEVENEL, Maxime THISS, Martine TRAUTMANN & Damien ERTLEN**
Les géosciences au service de l'archéologie agraire. Une étude de cas sur les rideaux de culture de Goldbach (68)
- 217 Étienne MANTEL, Stéphane DUBOIS, Jonas PARÉTIAS, Victor VIQUESNEL-SCHLOSSER, Corentin VOISIN, Bruno GAVAZZI & Matthieu RICHARD**
Étudier l'occupation d'une ville : les enjeux du PCR « Topographie générale et insertion territoriale de l'agglomération antique de *Briga* »
- 231 Charlène MOREL**
Un modèle pour comprendre l'influence de l'état de la recherche, des processus post-déposition et de l'attractivité sur la découverte des sites archéologiques dans le Kochersberg (Bas-Rhin, Alsace, Grand-Est, France)
- 241 Lizzie SCHOLTUS**
Spatialisation des découvertes, modélisation du passé. L'informatique au service de l'archéologie
- 254 Guillaume HULIN & François-Xavier SIMON**
Inrap et géophysique : vers une approche raisonnée
- 260 Hugo REILLER, Matthieu FUCHS, & Bruno GAVAZZI**
Approche multi-méthodes expérimentale pour l'étude d'un site d'occupation romaine et médiévale à Horbourg-Wihr
- 272 François-Xavier SIMON, Julien GUILLEMOTEAU, Guillaume HULIN, Joachim RIMPOT, Julien THIESSON & Alain TABBAGH**
De nouvelles perspectives pour les applications des méthodes électromagnétiques basse fréquence en archéologie
- 283 Rémy WASSONG & Bruno GAVAZZI**
Apport des prospections magnétiques haute résolution à la compréhension d'un habitat protohistorique : l'exemple du site de hauteur fortifié du Maimont
- 294 VARIA**

ACTUALITÉ DE LA RECHERCHE « GÉOSCIENCES ET ARCHÉOLOGIE : INTERACTIONS, COMPLÉMENTARITÉS ET PERSPECTIVES »

dir. Bruno GAVAZZI

HEUREUSES RENCONTRES VERS LE DÉVELOPPEMENT D'APPROCHES INTÉGRÉES EN GÉOSCIENCES ET ARCHÉOLOGIE

Bruno GAVAZZI ^{1, *}

¹ Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) ; UMR 7516 ;
Université de Strasbourg/EOST, CNRS

* bgavazzi@unistra.fr

RÉSUMÉ

Ce dossier « Géosciences et archéologie : interactions, complémentarités et perspectives » rassemble quatorze études qui s'inscrivent dans une même démarche : réunir différentes communautés scientifiques et professionnelles autour de sujets communs pour répondre à des questionnements complexes et faire émerger de nouvelles compétences et de nouvelles approches à la frontière de nos disciplines. Les contributions ici réunies constituent des points d'étape d'une démarche fondamentalement interdisciplinaire : il s'agit, de façon collective, d'ouvrir de nouvelles voies pour mieux comprendre le passé humain et environnemental ainsi que l'évolution de leurs interactions jusqu'au périodes actuelles. Les résultats des premières « Rencontres interdisciplinaires et interprofessionnelles Géosciences - Archéologie » sont très prometteurs et soulèvent l'importance d'une recherche scientifique prête à remettre en question ses frontières traditionnelles. Le résultat d'un croisement de

compétences offre davantage que la simple somme de celles-ci et ce dossier en est l'expression : il illustre la qualité de la recherche en géosciences et en archéologie comme de la dynamique de ses actrices et acteurs.

MOTS-CLÉS

Interdisciplinarité,
multiprofessionnalisme,
socioécosystèmes,
géoarchéologie,
géophysique,
archéométrie.

This dossier « Géosciences et archéologie : interactions, complémentarités et perspectives » is constituted by fourteen original articles which follow a common approach: bringing together different scientific and professional communities around common subjects to answer complex questions and to bring out new skills and approaches at the frontiers of our disciplines. The papers gathered here are milestones of a fundamentally interdisciplinary approach: the aim is to open collectively new ways for a better understanding of the records of the human and environmental past as well as their current evolutions. The results of the first « Rencontres interdisciplinaires et interprofessionnelles Géosciences - Archéologie » are therefore very promising and show the significance of a scientific research that is ready to question its traditional habits and boundaries. Crossing different skills offers more than their simple addition. This dossier illustrates this fact as well as the quality of research in geosciences and archaeology and the dynamics of the contributors.

KEYWORDS

Interdisciplinarity,
multiprofessionalism,
socioecosystems,
geoarchaeology,
geophysics,
archaeometry.

L'apport des géosciences [1] pour répondre à des problématiques archéologiques est aujourd'hui pleinement reconnu, si bien que leur utilisation apparaît de plus en plus fréquente, que ce soit en contexte d'études programmées ou préventives. Ce dynamisme peut se traduire, entre autres, par le développement de l'archéométrie, qui consiste en la mise en œuvre de méthodes physiques ou chimiques pour l'interprétation et la datation en archéologie, et de la géoarchéologie, à savoir l'étude de l'évolution des environnements en relation avec les peuplements. Si la pluridisciplinarité de ces démarches ne fait aucun doute, il apparaît que la relation entre *géosciences* et *sciences historiques* reste majoritairement une relation outils/applications sur des cas précis avec pour objectif la compréhension du passé. Pourtant, nos interactions génèrent des découvertes et des innovations nouvelles dans nos mondes respectifs, et elles conduisent à développer de nouvelles approches, le plus souvent dans l'objectif d'une adaptation à des contextes particuliers où certaines méthodes s'avèrent plus efficaces que d'autres. Ce dossier scientifique intitulé « Géosciences et archéologie : interactions, complémentarités et perspectives » s'inscrit alors dans une démarche plus large qui vise à fédérer des communautés scientifiques et professionnelles diverses autour de sujets communs et à répondre aux questionnements suivants : *comment travaillons-nous ensemble ? De quelle manière sommes-nous complémentaires et comment l'être encore davantage ? Et dans quelles directions voulons-nous aller pour, en reprenant la devise du CNRS, dépasser les frontières ?*

[1] Les géosciences sont entendues ici au sens large, c'est-à-dire à tout ce qui touche à la Terre, ce qui englobe de nombreuses disciplines, comme par exemple la géologie, la géochimie, la géographie, la géophysique, etc.

[2] Les IdEx ou « Initiatives d'excellence » sont un mode de financement par appel à projet financé par l'État dans le cadre des investissements d'avenir. L'Université de Strasbourg fait partie dès 2010 des trois lauréats initiaux de ces IdEx, ce qui lui permet d'organiser chaque année des appels à projets sur différentes thématiques. Plus concrètement, ce colloque s'inscrit dans l'IdEx « Manifestations et initiatives à destination du monde socio-économique » de l'année 2018 et a reçu un financement à ce titre.

Cette démarche est tout d'abord née d'un constat qui s'est construit sur plusieurs années à travers de multiples collaborations entre différents mondes, celui de la recherche académique, celui de la culture et du patrimoine, ainsi que celui de l'aménagement du territoire, voire celui du monde industriel et des développeurs d'équipements (imagerie de la proche surface et analyses) et de solutions informatiques de traitement des données. Il existe à la frontière des disciplines et professions concernées des objets d'études communs, des approches et des méthodes partagées et des expertises complémentaires qui sont aujourd'hui peu explorées. Ainsi, nous avons fait le pari de réunir différentes communautés à la fois disciplinaires – rattachées à des Collégiums universitaires et des instituts du CNRS différents –, mais aussi professionnelles, aux cultures, coutumes et fonctionnements différents pour ouvrir de nouvelles voies scientifiques et applicatives communes.

La première étape de cette démarche a été la tenue des premières *Rencontres interdisciplinaires et interprofessionnelles Géosciences - Archéologie* qui ont eu lieu à l'Université de Strasbourg les 17 et 18 juin 2019. L'intérêt de communautés diverses et l'adhésion à la démarche proposée peut s'illustrer en premier lieu par l'implication de différentes institutions. L'événement a pu réunir le soutien de l'IdEx [2] de l'Université de Strasbourg, du CNRS [3], du ministère de la culture [4] et de la ville de Strasbourg. De plus, différents acteurs ont participé à son organisation : trois unités mixtes de recherche (Unistra/CNRS) (sciences de la Terre [5], histoire et archéologie [6], et géographie [7]), Archéologie Alsace, l'Institut national de recherches archéologiques

[3] Ce soutien s'est traduit par un financement de l'Institut national des sciences de l'Univers (INSU).

[4] Ce soutien s'est traduit par un financement de la Direction régionale des affaires culturelles (DRAC) du Grand Est.

[5] CNRS/UNISTRA UMR 7516 IPGS – Institut de Physique du Globe de Strasbourg.

[6] CNRS/UNISTRA UMR 7044 Archimède - Archéologie et Histoire ancienne : Méditerranée - Europe.

[7] CNRS/UNISTRA UMR 7362 LIVE – Laboratoire Image, Ville, Environnement.

préventives (Inrap) et l'association professionnelle *Groupe des Méthodes Pluridisciplinaires Contribuant à l'Archéologie* (GMPCA). Cet aspect inter communautés se retrouve également dans la diversité des origines des participants, provenant des milieux académiques comme socio-économiques, d'établissements publics comme privés, impliquant différents métiers (chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs, techniciens) mais également des étudiants de master et de jeunes collègues préparant un doctorat ou en post-doctorat. Ainsi, ce sont 103 participants provenant de toute la France, mais également d'Algérie, de Grèce, du Maroc et de Suisse, qui ont pu se retrouver autour de trente-trois présentations orales et seize posters, organisés en trois sessions. La première, « Géoarchéologie : à la frontière des disciplines », abordait la théorie, les méthodes et les applications aux frontières entre les sciences de la Terre et de l'archéologie, comprenant par exemple les études des matériaux, les datations radiométriques, la micromorphologie, etc. La deuxième, « Projets interdisciplinaires : une démarche à fort potentiel », visait à regrouper des retours d'expérience sur différents projets interdisciplinaires à succès dans une logique de bilan et exploration des perspectives d'avenir. Enfin, la troisième, « Géophysique et archéologie : de l'imagerie à la caractérisation de l'invisible », concernait le domaine de la géophysique appliquée en archéologie : échanges sur les bonnes pratiques, possibilités actuelles et nouvelles approches innovantes. Des plateformes de services hébergées dans les laboratoires organisateurs ont également été présentées dans le cadre des journées, afin d'informer sur les différents moyens mobilisables par les différentes communautés [8]. Enfin, les rencontres se sont conclues par une table ronde sur les besoins, attentes, moyens et sur l'avenir de la géophysique en archéologie : il s'en est dégagé une volonté forte de développement plus poussé de collaborations

entre disciplines et milieux professionnels, encore trop cloisonnés. Se sont trouvés formulés également le besoin de nouvelles compétences interdisciplinaires à l'interface des communautés et la nécessité de nouvelles structures pour conduire leur émergence.

Le dossier présenté ici s'inscrit à la suite de ces rencontres et du succès qu'elles ont rencontré, dans une logique de valorisation et d'approfondissement des thématiques qui s'en sont dégagées. L'objectif est de renforcer et de poursuivre la démarche initiée, dans l'objectif de présenter un état actuel, bien entendu non exhaustif, à travers la présentation de différentes études et approches. Ce dossier débute par une rétrospective sur le dialogue interdisciplinaire ayant contribué à l'établissement de la discipline géoarchéologique [9], puis se poursuit par une étude des origines d'Ostie d'un point de vue géoarchéologique [10]. L'article suivant propose de nouvelles approches géoarchéologiques en contextes urbains [11], puis sont ensuite présentés l'apport et les perspectives de la démarche associant géomorphologues et archéologues en contexte d'archéologie préventive [12]. Les contributions qui suivent concernent des études de cas interdisciplinaires : sur des traces de l'écroulement du *Tauredunum* en Suisse [13], sur l'occupation et l'évolution du bassin de l'Eure durant l'Holocène [14], sur les rideaux de culture de Goldbach (68) [15] et sur l'agglomération antique de *Briga* [16]. Ensuite sont présentés deux articles de modélisation pour l'analyse spatiale et statistique : pour mieux comprendre les facteurs de la répartition des sites dans le Kochersberg (Alsace) [17], et pour mettre en évidence et cartographier des groupes régionaux dans l'Est de la Gaule durant l'âge du Fer [18]. Enfin, les quatre dernières publications s'articulent plus particulièrement autour de la thématique des interactions entre la géophysique et l'archéologie : la première fait un état des lieux de l'utilisation de la géophysique à

[8] Ont été présentés ArkeoGIS, plateforme informatique pour la mise en commun et l'analyse de données géoréférencées concernant le passé, Le Laboratoire d'analyse des sols et formations superficielles (LAS), qui réalise des analyses sédimentologiques de la prise d'échantillon à la diffusion des résultats, Le pôle analytique du LhyGes qui réalise des analyses chimiques élémentaires, analyses isotopiques, ainsi que minéralogiques, des plateformes de μ XRF et de lames minces, la plateforme Carma qui propose mesures, traitements et interprétations de données magnétiques au sol et aéroportées, et enfin Terremys, startup spécialisée dans la mise au point de solution de mesures magnétiques par drone en collaboration avec le CNRS.

[9] BRAVARD 2020.

[10] SALOMON 2020.

[11] BORDERIE *et al.* 2020.

[12] WUSCHER *et al.* 2020.

[13] MILLET & GUÉLAT 2020.

[14] PIAU *et al.* 2020.

[15] SCHWARTZ *et al.* 2020.

[16] MANTEL *et al.* 2020.

[17] MOREL 2020.

[18] SCHOLTUS 2020.

l'Inrap [19], la deuxième présente une approche multi-méthode dans le cadre d'une superposition complexe de vestiges [20], la troisième fait le point sur l'utilisation et les perspectives des méthodes électro-magnétiques [21] tandis que la dernière montre l'apport d'une méthode magnétique haute résolution pour l'étude de sites de hauteur [22]. Tous ces articles bien que traitant de sujets bien différents ont pour point commun majeur une interdisciplinarité forte entre les sciences dites dures et les sciences dites complexes. Ce dossier démontre, si besoin en était, la pertinence de ces premières rencontres « Géosciences et archéologie », et laisse présager un renforcement de la démarche pluridisciplinaire et le développement de nouvelles collaborations et de nouvelles approches. Ceci est d'autant plus vrai qu'on assiste ces dernières années à un fort décloisonnement des disciplines et à une approche plus systémique.

Ces rencontres et ce dossier posent les premiers jalons de nouvelles approches en pleine expansion, et appellent à l'organisation de futures rencontres et autres événements pour les développer.

Les contributions ici réunies constituent des points d'étape d'une démarche fondamentalement interdisciplinaire : il s'agit, de façon collective, d'ouvrir de nouvelles voies pour mieux comprendre le passé humain et environnemental ainsi que les évolutions de leurs interactions jusqu'au périodes actuelles. Au-delà, ces aspects s'inscrivent dans la perspective d'une meilleure compréhension des socio-écosystèmes complexes. Cette compréhension est essentielle pour répondre aux crises actuelles du changement de la biodiversité et du climat qui occupent une place croissante dans les préoccupations sociétales. En outre, ces enjeux et ce contexte soulèvent l'importance d'une recherche scientifique prête à remettre en question ses frontières traditionnelles. ■

[19] HULIN & SIMON 2020.

[20] REILLER, FUCHS & GAVAZZI, 2020.

[21] SIMON *et al.* 2020.

[22] WASSONG & GAVAZZI 2020.

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier en premier lieu tous les acteurs ayant participé au financement des rencontres et de ce dossier : l'Université de Strasbourg, le CNRS (INSU), Archéologie Alsace et du Ministère de la Culture et de la Communication (DRAC Grand Est, dont notamment Nicolas Payraud). Je tiens à remercier tout particulièrement la ville de Strasbourg pour son soutien et l'organisation d'une réception à l'hôtel de ville qui fut un lieu d'échange convivial pour tous les participants. Merci également au bureau du GMPCA pour son soutien et son action de diffusion. Je remercie les membres du comité d'organisation que j'ai eu l'honneur de présider : Frédéric Colin (Archimède), Michel Humm (Archimède), Guillaume Hulin (Inrap), Laurence Jouniaux (IPGS), Philippe Kuchler (Archéologie Alsace), Ferréol Salomon (LIVE) et Mathieu Schuster (IPGS), ainsi que tous les membres de la cellule congrès du service de formation continue de l'Unistra qui ont été d'une aide précieuse pour toute la logistique. Merci au comité de rédaction de la revue *Archimède* qui a soutenu pleinement cette démarche de publication, et tout particulièrement à Loup Bernard, Sandra Boehringer et Marie-José Morant pour leur aide précieuse au processus d'édition du dossier. Enfin, un grand merci aux participants des rencontres, aux 50 auteur.e.s des différentes contributions de ce dossier et aux 25 rapporteur.e.s les ayant évaluées.

BIBLIOGRAPHIE

BORDERIE, Quentin, BANERJEA, Rowena Y., BONNET, Stéphane, DEVOS, Yannick, NICOSIA, Cristiano, PETIT, Christophe, SALOMON, Ferréol, SCHNEIDER, Nathalie, WOUTERS, Barbora & WUSCHER, Patrice, 2020, « Géoarchéologies des contextes urbains : mieux comprendre les modalités de l'artificialisation des géosystèmes », *Archimède. Archéologie et histoire ancienne* 7, p. 141-157.

BRAVARD, Jean-Paul, 2020, « Dialogue interdisciplinaire : de l'unité stratigraphique aux interactions culture-environnement », *Archimède. Archéologie et histoire ancienne* 7, p. 119-128.

- HULIN, Guillaume & SIMON, François-Xavier, 2020**, « Inrap et géophysique : vers une approche raisonnée », *Archimède. Archéologie et histoire ancienne* 7, p. 254-259.
- MANTEL, Étienne, DUBOIS, Stéphane, PARÉTIAS, Jonas, VISQUESNEL-SCHLOSSER, Victor, VOISIN, Corentin, GAVAZZI, Bruno & RICHARD, Matthieu, 2020**, « Étudier l'occupation d'une ville : les enjeux du PCR «Topographie générale et insertion territoriale de l'agglomération antique de Briga» », *Archimède. Archéologie et histoire ancienne* 7, p. 217-230.
- MILLET, Morgan & GUÉLAT, Michel, 2020**, « Les vestiges antiques de Rennaz-Noville (Vaud, Suisse) et leur contexte sédimentaire : nouvelles évidences de l'écroulement du *Tauredunum* », *Archimède. Archéologie et histoire ancienne* 7, p. 176-187.
- MOREL, Charlène, 2020**, « Un modèle pour comprendre l'influence de l'état de la recherche, des processus taphonomiques et de l'attractivité sur la découverte des sites archéologiques dans le Kochersberg (Bas-Rhin, Alsace, Grand-Est, France) », *Archimède. Archéologie et histoire ancienne* 7, p. 231-240.
- PIAU, Théophile, BÉTARD, François, DUGAST, Fabienne, ARNAUD-FASSETTA, Gilles & VIEL, Vincent, 2020**, « Dynamique géomorphologique holocène et occupation humaine dans le bassin-versant de l'Eure (Bassin de Paris, France) : potentiels d'une approche géoarchéologique multiscalaire et diachronique », *Archimède. Archéologie et histoire ancienne* 7, p. 188-204.
- REILLER, Hugo, FUCHS, Matthieu & GAVAZZI, Bruno, 2020**, « Approche multi-méthodes expérimentale pour l'étude d'un site d'occupation romaine et médiévale à Horbourg-Wihr », *Archimède. Archéologie et histoire ancienne* 7, p. 260-271.
- SALOMON, Ferréol, 2020**, « Les origines d'Ostie : quelles interactions avec la dynamique d'embouchure ? (Delta du Tibre, Italie) », *Archimède. Archéologie et histoire ancienne* 7, p. 129-140.
- SCHOLTUS, Lizzie, 2020**, « Spatialisation des découvertes, modélisation du passé. L'informatique au service de l'archéologie », *Archimède. Archéologie et histoire ancienne* 7, p. 241-253.
- SCHWARTZ, Dominique, ROBIN, Vincent, ADAM, Pierre, SCHAEFFER, Philippe, GEBHARDT, Anne, HERRAULT, Pierre-Alexis, KELLER, Benjamin, DAPIAGGI, Daniele, STEVENEL, Claire, THISS, Maxime, TRAUTMANN, Martine & ERTLEN, Damien, 2020**, « Les géosciences au service de l'archéologie agraire. Une étude de cas sur les rideaux de culture de Goldbach (68) », *Archimède. Archéologie et histoire ancienne* 7, p. 205-216.
- SIMON, François-Xavier, GUILLEMOTEAU, Julien, HULIN, Guillaume, RIMPOT, Joachim, THIESSON, Julien & TABBAGH, Alain, 2020**, « De nouvelles perspectives pour les applications des méthodes électromagnétiques basse fréquence en archéologie », *Archimède. Archéologie et histoire ancienne* 7, p. 272-282.
- WASSONG, Rémy & GAVAZZI, Bruno, 2020**, « Apport des prospections magnétiques haute résolution à la compréhension d'un habitat protohistorique : l'exemple du site de hauteur fortifié du Maimont », *Archimède. Archéologie et histoire ancienne* 7, p. 283-293.
- WUSCHER, Patrice, JORDA, Christohe, BORDERIE, Quentin, SCHNEIDER, Nathalie & BRUXELLES, Laurent, 2020**, « De la formation géologique à la tranchée : trouver et comprendre les sites archéologiques menacés par les travaux d'aménagement du territoire », *Archimède. Archéologie et histoire ancienne* 7, p. 158-175.

DIALOGUE INTERDISCIPLINAIRE : DE L'UNITÉ STRATIGRAPHIQUE AUX INTERACTIONS CULTURE-ENVIRONNEMENT

Jean-Paul BRAVARD¹

¹ Université de Lyon, UMR 5600 ; jean-paul.bravard@univ-lyon2.fr

RÉSUMÉ

Cette communication dégage quelques grandes périodes et une dynamique dans l'essor de la discipline géoarchéologique. Dès les années 1860, des découvertes innovantes mais isolées et sans lendemain ont été réalisées; des dépôts sédimentaires sont replacés dans un contexte historique et parfois dans celui du changement climatique. Les concepts de changements paysager et environnemental apparaissent dans les Alpes et en Méditerranée entre les années 1920 et les années 1980, dans leurs liens potentiels avec des sites archéologiques. Dans les années 1980 le dialogue interdisciplinaire lyonnais montre le potentiel d'étude que recèlent les formations alluviales. Des innovations techniques ont fortement enrichi l'apport des géosciences depuis la fin des années 1980

tandis que des notions clés problématisent la recherche : l'ouverture du site au bassin et au territoire, la crise, l'effondrement et la résilience. Des enregistrements de crises historiques sont présentés dans la moyenne vallée du Rhône et dans des oasis d'Égypte.

MOTS-CLÉS

Géoarchéologie, géosciences, dynamique de l'environnement, résilience, culture, Lyon, vallée du Rhône, oasis, Égypte.

This paper presents the main periods and dynamics in the rise of geoarchaeology. In the 1860's, innovative but sparse and short-lived discoveries were realized; sedimentary deposits were integrated in their historical context and sometimes in the context of climate change. The concepts of landscape and environmental change emerged in the Alps and in the Mediterranean domain between the 1920's and the 1980's. During the 1980's the interdisciplinary dialogue born in Lyon points to the potential of alluvial deposits. Technical innovations highly enhance the contribution of geosciences since the late 1980's, while key concepts allow improved research questioning: widening site scale to basin and territory scales, crisis, collapse and resilience. At last, records of historical crises are displayed in the Middle Rhône valley and in oases of Egypt.

KEYWORDS

Geoarchaeology, geosciences, environmental dynamics, resilience, culture, Lyon, Rhone valley, oases, Egypt.

Article accepté après évaluation par deux experts selon le principe du double anonymat

La prise en compte des changements environnementaux dans l'histoire humaine récente est une démarche riche de progrès en cours. L'historiographie des premières démarches empiriques, qui ne se référaient pas à un corpus théorique et ne cherchaient pas à découvrir des analogues, reste aussi à faire. À l'origine de ce champ d'intérêt, s'illustrèrent les préhistoriens et les géologues, les érudits du XIX^e siècle pouvant être l'un et l'autre à la fois. Alors que la géologie du Quaternaire cherchait avant tout à construire le cadre chronostratigraphique et climatique des découvertes préhistoriques, depuis une cinquantaine d'années avec le développement conjoint de l'archéologie et de l'environnement des sociétés du passé s'affirme une nouvelle approche, qualifiée de géoarchéologique, d'abord en Méditerranée dans les années 1970, ensuite en Europe dans les années 1980. En devenant le partenaire de plus en plus fréquent de l'archéologie, la géoarchéologie se développe dans la suite logique de l'archéologie du paysage, laquelle cherche à comprendre, de manière croissante dans la période holocène, les signes laissés dans le paysage par les étapes successives de sa construction. À l'échelle du territoire de groupes humains, la géoarchéologie fournit un cadre paléogéographique avec ses atouts et ses contraintes, la nature des sols et leur évolution dans le temps (érosion et dépôt), la nature des ressources à disposition (couvert végétal, milieux aquatiques ou marins, origine du matériel lithique, terroirs des cultures identifiées par la carpologie), la géoarchéologie agraire, etc. À l'échelle du site, la géoarchéologie « intra-site » interprète les unités stratigraphiques en termes d'entités façonnées par des processus naturels (alluvions de débordement, colluvions), par l'action humaine (sols d'occupation, dépotoirs...) et souvent par l'interaction de plusieurs types de processus. La géoarchéologie considère la formation et la

destruction des sites (taphonomie) en combinant les processus naturels et la sédimentation anthropique. Tournée vers l'espace humanisé, la géoarchéologie se situe au contact des sciences de l'environnement et des sciences humaines ; elle en est en quelque sorte l'interface milieu/culture, le géoarchéologue devant participer avec ses méthodes à la fouille du site et à son interprétation dans le cadre humanisé du territoire de l'époque considérée. La géoarchéologie diffère en cela des géosciences qui peuvent certes apporter des éléments essentiels à la compréhension des sites et des territoires, mais qui développent fréquemment leurs propres questionnements dans une perspective paléoenvironmentaliste (paléoécologique, paléoclimatique) conduite de manière autonome [1].

CONSTRUCTION DES DÉMARCHES GÉOARCHÉOLOGIQUES ET ENVIRONNEMENTALES (AVANT LES ANNÉES 1980)

DES PRÉMISSSES DISPERSÉES

En 1806, François-René de Chateaubriand entreprit son célèbre voyage de Paris à Jérusalem [2] ; il aborda en Grèce, traversa l'Attique et franchit l'Illissos avant de gagner Athènes ; l'Illissos était à sec, contrairement à l'image qu'en donnaient les textes antiques. Au lieu d'envisager une situation hydrologique saisonnière, le voyageur cultivé fait spontanément appel à un changement sur la longue durée : « Il est donc très probable (écrit-il) que le

[1] BERGER *ET AL.* 1999 ; FOUACHE 2010.

[2] CHATEAUBRIAND 1811.

lit de l'Ilissos s'est peu à peu encombré des pierres et des graviers descendus des montagnes voisines, et que l'eau coule à présent entre deux couches de sable », comme si le petit fleuve de l'Attique avait accompagné Athènes dans sa ruine.

Glanés dans différentes vallées, les exemples d'observations précieuses ne manquent pas. Elles concernent, au hasard des découvertes et des spécialités, diverses vallées de France et d'ailleurs. Une cinquantaine d'années après le voyage de Chateaubriand a succédé à cette simple notation nostalgique une entreprise de recherche érudite menée par des préhistoriens de culture géologique et des géologues de culture préhistorienne dans les berges de la Saône mâconnaise et beaujolaise. Des niveaux archéologiques appartenant à des périodes aujourd'hui datées entre l'Alleröd et l'époque gallo-romaine ont été explorés de manière systématique à partir de la fin des années 1850, mais sans que des fouilles soient pour autant pratiquées

(**fig. 1a**). Le temps long s'exprime dans les coupes naturelles visibles sur ces berges qui sont alors considérées comme un « chronomètre alluvial » dans les années 1870-80 (**fig. 1b**) [3].

Au nombre des travaux pionniers et plus ou moins connus, citons l'attribution à l'époque gallo-romaine (I^{er}-II^e s. ap. J.-C.) d'une nappe de remblaiement alluvial dans la région toulousaine. Le géologue et préhistorien F. Bourdier [4] fait appel à des processus qualifiés d'anthropogéniques pour expliquer l'accumulation des alluvions fines du fond de la vallée de la Saône. C'est aussi une géologue qui dresse la première carte schématique des unités alluviales d'époque holocène dans la plaine ello-rhénane, en Alsace [5].

[3] THEVENOT 1973, p. 15-23.

[4] BOURDIER 1961.

[5] HIRTH 1971.

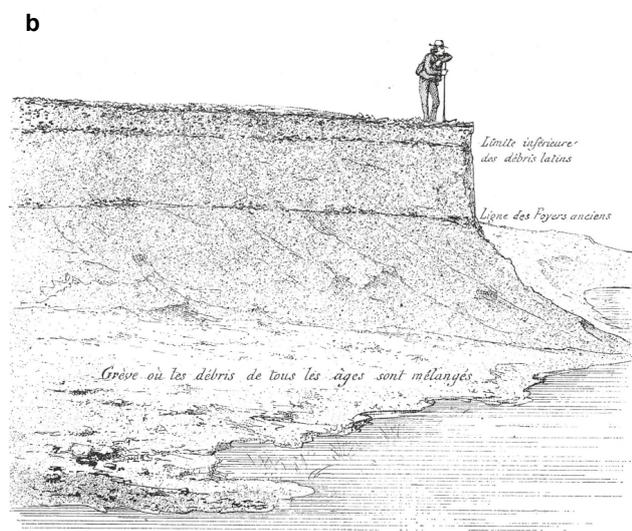


Figure 1 : les gisements archéologiques au fil des berges de la Saône

a – Paysage de la Saône vers 1830 à Gueirens (au niveau de Belleville), peinture du peintre lyonnais Louis-Hector F. Allemand (collection particulière). La Saône, au lit mobile ici représenté à l'étiage, décrit un méandre actif avec sa convexité en construction à gauche. La berge, bien localisée, a été protégée par un perré vers 1840 ce qui permet de dater le tableau (Bonnamour, 2017); les découvertes étaient faites au pied de la rive concave érodée, à droite de la peinture.

b – Premier dessin de la berge de la Saône à Crissey (au nord de Chalon-sur-Saône), réalisé en 1869. Deux niveaux archéologiques sont représentés (« débris latins » et « foyers anciens »); ils sont interstratifiés dans des dépôts sablo-limoneux stériles issus de crues sur une durée pluri-millénaire (source in Thevenot, 1973).

LA DYNAMIQUE DES PAYSAGES DES ALPES DU SUD ET DE LA MÉDITERRANÉE

À partir des années 1920 des changements interviennent dans la nature de la démarche scientifique à l'échelle de vastes ensembles régionaux, tels les Alpes et la Méditerranée. De nouvelles observations localisées sont dès lors replacées dans des ensembles régionaux plus vastes et surtout sont organisées de manière dynamique sous la double influence explicative de déterminants naturels et culturels. Des géographes portent le plus souvent ces nouvelles approches.

Ainsi dans les Alpes françaises, en réponse aux positions des ingénieurs forestiers qui, depuis la Révolution française et ses supposés excès, font porter au paysan alpin la responsabilité de la dégradation des forêts et des sols du fait de l'extension des labours en altitude. Dès les années 1920, des géographes grenoblois argumentent sur la responsabilité de déboisements et de défrichements très anciens et de crises climatiques qui se seraient exprimées sur des milieux affaiblis par les défrichements. Ces chercheurs privilégient la profondeur historique des processus de l'érosion et le principe de la variabilité climatique sur la longue durée. La démarche est reprise par des géographes aixois qui mettent en évidence les effets de crises en Haute-Provence. A. Douguedroit [6] met l'accent sur les effets du Petit Âge Glaciaire, tandis que M. Jorda [7] démontre l'intensité des crises érosives qui ont détruit le vieux paléosol d'âge atlantique dans la seconde moitié de l'Holocène. La dialectique de la responsabilité conjointe de la nature et de la société se met en place sur les fondements apportés par des études argumentées, non pas à l'échelle de sites (il ne s'agit pas de géoarchéologie) mais d'espaces géographiques soumis à phases de crise et de stabilité.

Sur la rive sud de la Méditerranée, des travaux remontant au début des années 1950 montrent comment l'érosion contemporaine du Tell algérien a procédé du « refoulement » brutal par la colonisation française des éleveurs et paysans des plaines vers les montagnes [8]. Ce modèle critique, observé quasiment *in vivo*, a sans doute influencé la compréhension ultérieure des crises sédimentaires du passé. Dans leurs nombreux travaux des années 1970 et du début des années 1980, R. Neboit et ses collègues géomorphologues ont élargi à la Méditerranée centrale un schéma dans lequel le déterminisme socio-politique est combiné avec une forme de déterminisme naturel selon le modèle refoulement – érosion « accélérée » – transferts sédimentaires vers les plaines alluviales – fossilisation de certaines occupations – progression des littoraux. La « crise romaine » (à la fin de la période) et le « remblaiement post-antique » seraient la conséquence d'un abandon de la « bonne » gestion agricole pratiquée par les Grecs

et les Romains avant l'introduction de l'élevage par les Vandales et la déstabilisation ottomane [9].

Cette conception, élaborée conjointement avec des historiens et des archéologues hellénistes, va fructifier à partir des années 1980 grâce à sa capacité explicative de la morphogenèse des milieux fragiles et de vieille humanisation de la partie méridionale de notre territoire. La variabilité climatique reste très présente dans le concept de « crise climato-anthropique » largement basé sur des corrélations chronologiques entre marqueurs, mais d'une façon équilibrée entre les facteurs explicatifs. Le dialogue n'est pas toujours facile entre des disciplines qui ont une pratique somme toute récente et encore limitée des échanges scientifiques [10].

Quelles que soient les époques culturelles considérées, les archéologues admettent l'action des processus naturels (morpho-climatiques) à l'échelle des sites qu'ils étudient, mais ils sont réticents à suivre les naturalistes, même les plus ouverts aux sciences humaines, sur le fait que l'histoire des sociétés, à l'échelle de territoires nettement plus vastes, ait pu éventuellement être sous contrôle climatique. Les conceptions déterministes quant au rôle du climat, parfois rendu responsable par les géosciences de crises économiques et sociales, s'avèrent moins ouvertes au dialogue interdisciplinaire que ne le sont les géographes de l'époque, de double formation naturaliste et sociétale. Construits sur des proxys innovantes indépendantes, les travaux des géosciences prolongent d'une certaine manière la position déterministe du géomorphologue Vita Finzi [11] qui, ayant mis en évidence à l'échelle de la Méditerranée deux remblaiements torrentiels selon lui synchrones malgré l'hétérochronie du second (l'Older Fill tardiglaciaire et le Younger Fill historique), mettait en avant le déterminisme climatique dans la genèse des paysages méditerranéens. Comme on le voit, le débat est ancien et il est toujours d'actualité.

Les progrès conceptuels des années 1970 ont ouvert la voie au champ nouveau de la géoarchéologie des milieux tempérés humides et systématisé des observations faites, par exemple, dans les milieux alluviaux d'Alsace (observations du protohistorien Jean-Jacques Hatt à Strasbourg).

[6] DOUGUEDROIT 1976.

[7] JORDA 1980.

[8] BENCHETRIT 1955.

[9] NEBOIT 1983 ; DUFAURE ET AL. 1984.

[10] PROVANSAL & LEVEAU 2006 ; BERGER ET AL. 2007.

[11] FINZI 1969.

L'ESSOR DE LA GÉOARCHÉOLOGIE ET DES GÉOSCIENCES AU SERVICE DE LA COMPRÉHENSION DES SOCIÉTÉS DU PASSÉ

CHANTIERS LYONNAIS ET RHODANIENS, UNE EXPÉRIENCE PERSONNELLE

En débutant mes recherches sur la morphodynamique fluviale et les changements contemporains du Rhône et de ses affluents septentrionaux à partir de la fin des années 1970, j'ai fortuitement rencontré l'archéologie de terrain. Mon premier contact interdisciplinaire s'est fait sur le site de Condate, à l'aval de Seyssel (Savoie) où, en 1980, des ruines arasées puis fossilisées par les alluvions post-antiques étaient exhumées dans la phase préparatoire à la construction de l'aménagement hydroélectrique de Chautagne par la Compagnie Nationale du Rhône. C'était la première fois que du sable déposé par les crues du Rhône était découvert dans les ruines d'un site urbain antique hors de Lyon. Au fil des années, la visite de sites archéologiques nombreux et la compréhension croisée de la nature des dépôts fluviaux contemporains en milieu fluvial actif et dans les vieilles plaines d'inondation ont permis de caler une méthode de travail permettant d'interpréter la genèse de sites archéologiques. Des rapports et des articles ainsi que des thèses ont fait le point sur les méthodes et les résultats obtenus sur de nombreux cours d'eau de France et de divers continents. Un modèle hydromorphologique simple synthétisait les fluctuations hydro-sédimentaires du Rhône sur les deux derniers millénaires et proposait l'hypothèse d'une origine climatique d'échelle dépassant largement les dimensions du bassin [12]. Cette esquisse est basée sur les principes d'un concept récent, le système fluvial [13] ; ce dernier aborde les flux en circulation dans le bassin versant, les dépôts alluviaux et les formes fluviales en tant que réponses au jeu de facteurs externes (climat) et internes au système (végétation, sols, érosion des versants). Les sociétés font partie des facteurs externes et, tout comme le climat, sont considérées comme responsables des variations temporelles des flux d'eau et de sédiments. Ce modèle, toujours soumis à révision en fonction des découvertes, a structuré de nombreux travaux ultérieurs et a évolué de diverses manières.

PREMIERS DIALOGUES INTER-DISCIPLINAIRES DEVANT UNE COUPE

Sur les sites, la question première était toujours posée par l'archéologue, l'hôte ou « puissance invitante », qui ouvrait le dialogue en fonction des questions qu'il avait à résoudre, questions pour lesquelles il reconnaissait rester sans réponse à ce stade de son étude. Par

exemple : dans cette coupe, cette unité stratigraphique est-elle « le terrain naturel » ou un sol d'occupation ? S'agit-il d'un remblai ou d'un sol ? Dans le premier temps de ce contact c'est l'archéologue qui définit le questionnement à l'échelle de stratigraphies ; devant une coupe intra-site, le géomorphologue est considéré comme un auxiliaire de la lecture des coupes, censé produire une réponse permettant de combler une lacune du dessin de la stratigraphie. Le questionnement est souvent binaire, conformément aux besoins d'une étude archéologique dont l'objet quasiment exclusif est alors de distinguer l'artefact du naturel, ce dernier étant de peu d'importance, la couche finale avant la séquence de calage des structures et de la chronologie.

Mais très vite, une fois expliqué que les unités peuvent être fort complexes et mixtes, le géomorphologue propose, sur la base des faciès visibles, des types d'unités construites non seulement sur la base de l'action humaine mais aussi sur celle de processus de transport/dépôt du sédiment : un limon de crue lente, un sable de crue déposé par un courant rapide ; une figure d'érosion qui signifie destruction et exportation de matière. La coupe devient dynamique et raconte une histoire qui n'est pas seulement celle d'une société. L'archéologue apprend à distinguer un processus naturel archivé dans la coupe alors qu'il a été formé à l'analyse de l'appartenance culturelle. On entre dans la phase de l'apprentissage mutuel d'une façon de regarder une coupe, de délimiter des unités, de confronter plusieurs lectures d'une même réalité, de les croiser dans un dialogue fondé sur l'apprentissage d'un vocabulaire et de concepts. Le naturaliste pose ses propres questions qui ont trait à la topographie du site antique, à sa périodisation ; les structures bâties sont perçues en tant qu'obstacles aux eaux, en tant que pièges, du moins pour ce qui subsiste car les habitants du site ont nettoyé et éliminé des informations sédimentaires avant de reconstruire.

La phase suivante du dialogue concerne le jeu des hypothèses naturalistes et leur croisement avec les hypothèses culturelles. Ce dialogue est très efficace si chacun des partenaires se place à égalité avec l'autre au service de la compréhension du site. Le questionnement conjoint (co-questionnement, si l'on veut) devient porteur de réelles nouveautés, de regards et d'interprétations inattendus au départ. Les unités stratigraphiques sont devenues moins importantes que la dynamique de leur assemblage, quitte à redessiner

[12] BRAVARD ET AL. 1992.

[13] SCHUMM 1977.

localement les stratigraphies pour rendre leur interprétation croisée cohérente. La coupe devient le support d'une démarche complexe.

ET LE LABORATOIRE ?

Le recours à des analyses en laboratoire pouvait être une pierre d'achoppement du dialogue. L'archéologue pouvait (peut) éprouver une réticence initiale devant des propositions d'analyses. Si elles sont jugées sinon nécessaires, du moins très utiles par le géomorphologue qui souhaite tester des hypothèses de terrain, l'inquiétude de l'archéologue est bien entendu, outre le manque de moyens financiers sur un chantier pauvre, d'être instrumentalisé par le naturaliste, d'engager des frais injustifiés. « Si vous le dites, c'est bien suffisant, pas la peine d'analyser », me disait-on parfois ; ou bien : « Si vous êtes si intéressé, financez donc l'analyse » ; comme si le spécialiste invité s'était approprié le site jusqu'à devoir le subventionner. Nombre d'analyses furent en effet offertes par le laboratoire, ne serait-ce que pour prouver l'intérêt d'une approche nouvelle ; mais cette démarche avait elle-même des limites compréhensibles...

En fait, il est nécessaire que le spécialiste invité fasse comprendre la démarche à son interlocuteur, la justifie pour la faire accepter, voire pour la faire désirer en toute confiance. Un nouveau dialogue dans lequel l'archéologue devient acteur et pose de nouvelles questions car il saisit bien que le naturaliste l'entraîne vers le paysage et que le paysage a des dimensions culturelles riches de compréhension et de nouveaux questionnements. Le géomorphologue n'est pas le seul spécialiste capable d'apporter des éléments de compréhension ; la réflexion concerne tous les spécialistes, du moins les plus importants dans un site où le questionnement est d'abord celui des archéologues qui ont la responsabilité de fournir des résultats.

L'ENRICHISSEMENT CROISSANT DES ÉCHELLES SPATIALES, DES MÉTHODES ET DU QUESTIONNEMENT

Il ne fait guère de doute que le spécialiste invité peut éprouver le besoin de sortir de la coupe et du site pour insérer les observations dans un cadre spatial plus large. À partir du moment où des processus ont été observés et interprétés, il est légitime de souhaiter les placer dans le milieu géographique propre à leur époque. L'archéologie a depuis les années 1970 évolué vers la « site catchment analysis ». Le préhistorien souhaite évaluer les ressources à la disposition des communautés. La Nouvelle archéologie est

processuelle, l'écologie culturelle introduit l'environnement, le climat et le paysage dans leurs dimensions territoriales. En découlent localement les notions de contraintes, de ressources, d'aménité : la crue, l'inondation, le remblai pour surélever une installation humaine, etc. Puis des notions de changement, de rythmes. On est passé de la nature de dépôts stratifiés au fonctionnement à la fois physique et artificialisé du milieu dans lequel un groupe social s'est inséré dans une durée plus ou moins longue. Les deux dernières décennies ont été très riches en progrès méthodologiques et techniques. La géoarchéologie travaille aux côtés des géosciences ou en concertation étroite avec elles, de sorte que les résultats s'enrichissent sans cesse de façon autonome et/ou croisée, en fonction des problématiques des uns et des autres. Les nouvelles méthodes, basées sur des proxys multiples, ont permis d'affiner la chronologie et le contenu des fluctuations climatiques à l'Holocène grâce à la découverte d'archives sédimentaires dilatées dans les tourbières ainsi que dans les milieux lacustres et fluviaux ; l'effort de recherche des géosciences glisse en effet vers des milieux aptes à l'archivage. L'archéologie reste essentielle pour dater (souvent avec finesse) à l'échelle des sites mais le radiocarbone et l'OSL ont pris le relais sur de vastes espaces. Cependant les grands travaux supports de diagnostics archéologiques, s'ils détruisent des archives, multiplient les coupes hors contexte archéologique et restent essentiels.

Cette contribution ne pouvant embrasser l'ensemble des travaux réalisés et en cours (il faudrait plusieurs volumes pour cela et l'auteur de cette contribution n'a pas la compétence requise), elle se cantonnera au rappel d'une opération interdisciplinaire réalisée dans la moyenne vallée du Rhône, couronnée de succès, et d'une opération en cours dans le désert occidental d'Égypte.

DE GRANDES QUESTIONS CONTEMPORAINES: LA CRISE, LA RÉSILIENCE OU L'EFFONDREMENT DANS DEUX CONTEXTES NATURELS ET CULTURELS PÉRI-MÉDITERRANÉENS

MOBILITÉ ENVIRONNEMENTALE AU NORD-OUEST DE LA MÉDITERRANÉE. LES CRISES NÉES DU « DOUBLE FORÇAGE CLIMATO-ANTHROPIQUE »

Nous retiendrons ici les résultats du projet Archaeomedes, financé par la CEE (DG XII), qui s'est déroulé entre 1992 et 1994. Il visait à rééquilibrer la dialectique entre facteurs naturels (climat,

sols, végétation) et action humaine au profit de cette dernière, considérée comme ayant été négligée. Le projet avait sélectionné plusieurs fenêtres nord-méditerranéennes dans le but d'observer et d'expliquer la dégradation et parfois la désertification de territoires dans la perspective du changement global et surtout d'une mauvaise gestion anthropique. La fenêtre « ancienne vallée du Rhône », centrée sur de petits territoires situés entre Montélimar et Montpellier, a été étudiée principalement dans une période de 700 ans (200 av. J.-C. – 500 ap. J.-C.). Ce territoire d'étendue restreinte a archivé beaucoup plus de diversité et de complexité à son échelle que ne l'a fait le Rhône dans la région lyonnaise où les flux intègrent et moyennent des apports issus des vastes territoires du Haut-Rhône et de la Saône. Le schéma général est similaire mais les enregistrements sédimentaires indicateurs de dégradation sont plus fins, tant spatialement que chronologiquement, qu'à l'échelle d'un grand bassin. Les conclusions de cette étude proposées par les environnementalistes sont que le temps long (celui de la stabilité et de la pédogenèse) est sous-représenté par l'approche géomorphologique ; que l'action humaine sur la végétation (défrichement et agro-pastoralisme) a plus d'effet sur le paysage que les variations climatiques ; que c'est la synchronicité des événements climatiques (notamment en période froide et humide) et des phases de dégradation du couvert végétal qui explique la dégradation des sols. En parallèle, la céramique a permis de dater à l'échelle temporelle de 25-50 ans pour documenter la colonisation romaine des sols (I^{er} s. av. – I^{er} s. ap. J.-C.), plus précoce au sud, puis la crise généralisée du peuplement du II^e/III^e s. ap. J.-C., plus tardive au nord. Dans la phase ascendante, la production de masse sur de grands domaines, de nature spéculative et agro-industrielle, a imposé la trilogie blé-olivier-vigne y compris sur des terroirs jusque-là négligés ; les signes ultérieurs d'abandon ont été reliés à des facteurs humains, notamment à une forme de désinvestissement sur des terroirs fragilisés peut-être sous l'influence de marchés extérieurs. En aurait découlé une vulnérabilité croissante vis-à-vis des écoulements avec plusieurs formes d'adaptation (par exemple mise à l'abri de l'habitat) ; de réelles capacités de résilience sont cependant manifestes dans les profils de sols, grâce à la recolonisation végétale, à des périodes climatiques favorables et à la consolidation de domaines plus dispersés qu'aux premiers siècles de la période [14]. Les travaux réalisés ultérieurement sur cet ensemble régional gagnent en précision au fil des années grâce à davantage de proxys et de dates [15].

LA CRISE DE LA FIN DE L'ANTIQUITÉ DANS LA GRANDE OASIS DU DÉSERT OCCIDENTAL D'ÉGYPTE : LE POIDS DES CONSTRAINTES DU MILIEU

Les recherches portant sur les dépressions de Kharga et Dakhla, formant la « Grande Oasis » ont montré quelle avait été leur importance stratégique pour l'Égypte antique, tant du point de vue administratif que des points de vue économique et militaire. Un projet collectif a permis une première synthèse interdisciplinaire [16]. Les petites oasis d'El-Deir et Amheida (ancienne Trimithis), étudiées respectivement depuis 1998 et 2001, ont récemment fourni des informations neuves sur la dynamique du paysage rural antique, dans un désert presque absolu alimenté en eau par l'accès à la ressource souterraine. Cet accès se faisait par des sources artésiennes et des puits, non pas par des qanâts comme à Douch, au sud de Kharga.

L'abondance des nappes souterraines, alimentées par la mousson pendant la première partie, humide, de l'Holocène, s'est réduite de manière progressive (et probablement insensible aux populations locales) pendant la phase climatique sèche qui a débuté vers 4500 av. J.-C. En six millénaires, l'artésianisme naturel de fond de cuvette a succédé à un paysage lacustre, avant de lui-même cesser au profit de simples puits creusés de main d'homme (fig. 2a).

Les archives sédimentaires des oasis étudiées sont de petites buttes faites de sables et limons compacts, sculptés par le vent, les « yardangs » (fig. 2b). Les niveaux, interprétés principalement en tant que dépôts issus de l'artésianisme, de l'action du vent et de l'irrigation formés au total depuis 8000 ans, ont pu être datés par le radiocarbone [17]. La collaboration interdisciplinaire s'est appuyée sur l'interprétation de l'imagerie à haute résolution (tracé des canaux et du parcellaire) et sur une collaboration étroite de la géographie physique avec la céramologie, laquelle a un fort pouvoir de datation dans cet espace et d'interprétation des usages agricoles entre 1000 av. J.-C. (III^e Période intermédiaire) et 600 ap. J.-C. (époques ptolémaïque, romaine et copte principalement).

Les résultats obtenus concernent le rôle destructif d'agents naturels tels que 1) La déflation dont l'importance augmente avec l'assèchement du milieu, lui-même lié à la réduction de la ressource en eau ;

[14] AUDOUZE ET AL. 1998 ; BERGER 2011.

[15] BERGER ET AL. SOUS PRESSE.

[16] BAGNALL & TALLET 2019.

[17] BROOKES 1989 ; BOUSQUET 1996 ; KUPER & KRÖPELIN 2006.

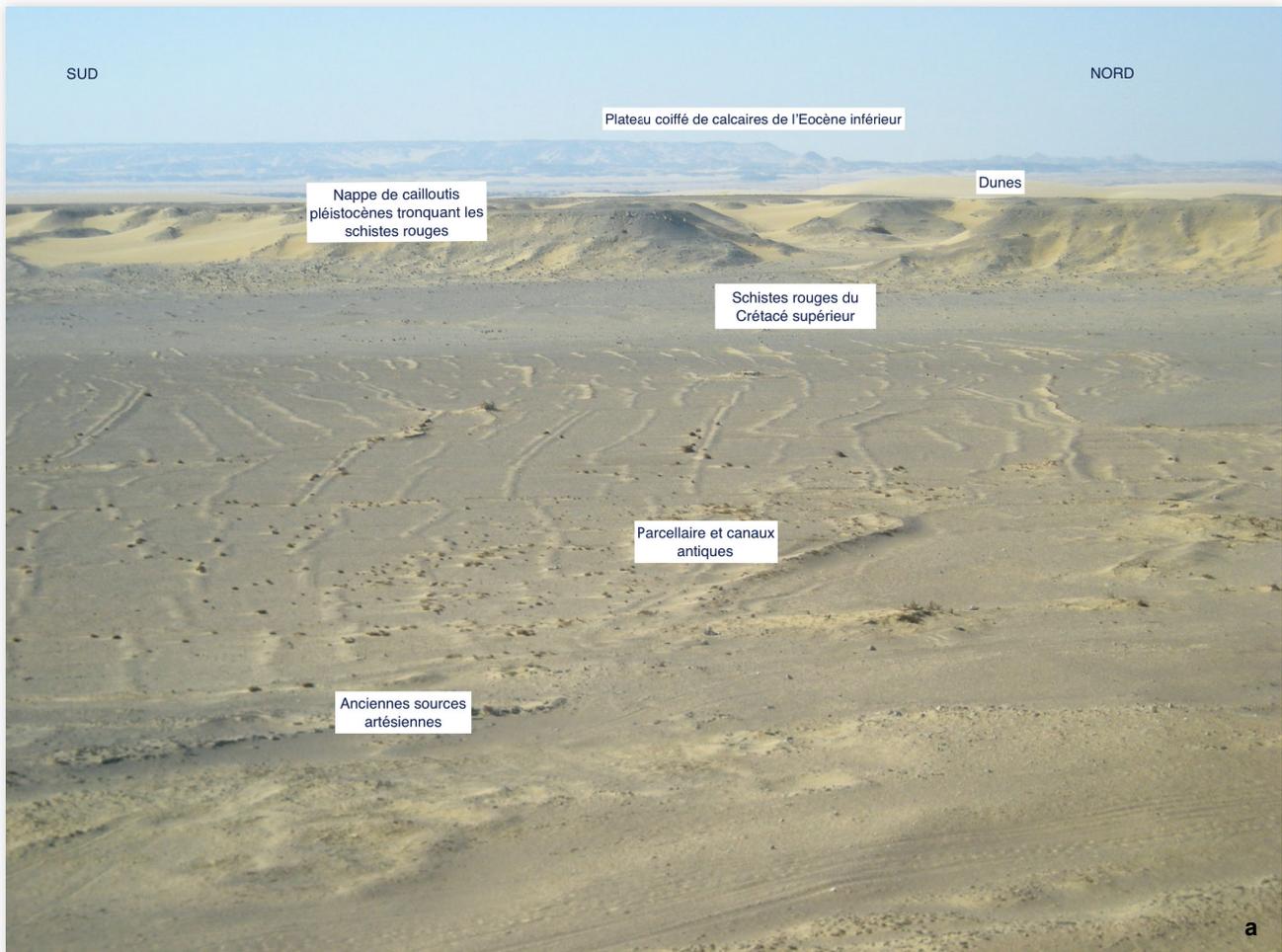


Figure 2 : le parcellaire irrigué de la micro-oasis d'El-Deir, dépression de Kharga

a - La cuvette visible au premier plan correspond à un dôme érodé par la déflation dans des schistes ; les canaux d'irrigation étaient alimentés par des sources artésiennes. Au second plan, les schistes sont protégés par une nappe de cailloutis Pléistocène mis en place pendant une phase pluviale. Les dunes soulignent la mobilité du sable. Vue vers l'ouest. Ph J.-P. Bravard.

b - Surface et buttes témoins (yardangs) résultant de la déflation éolienne. Ces yardangs sont composés à leur base de sables et limons mis en place par l'écoulement des sources pendant l'Holocène humide ; le sommet de ce qui subsiste correspond à un « sol d'irrigation » (ptolémaïque et romain). Ph. J.-P. Bravard.



2) La mobilité dunaire sous l'effet du vent dominant qui souffle du nord ; 3) Le fonctionnement torrentiel d'un oued au pied du grand escarpement oriental de la dépression de Kharga. Sur la longue durée, les sols d'irrigation, bien développés à l'époque ptolémaïque malgré des épisodes de déflation bien documentés, mais peu cohésifs et donc fragiles, ont subi de forts décapages puis un certain degré de reconstruction grâce à l'humidité produite par la restauration de l'hydraulique autour des puits au IV^e s. ap. J.-C. Malgré tout, les volumes d'eau disponibles se sont réduits et

l'intensité du travail humain n'a pu compenser le déficit hydrique. L'oasis de Trimithis a été abandonnée au IV^e s. ap. J.-C. et celle de Kharga au VI^e s. ap. J.-C., les sociétés oasiennes n'étant plus capables de recueillir l'eau ni de la valoriser.

Les oasis qui fournissaient des produits agricoles de grande valeur à la vallée du Nil (coton, huile de ricin, etc.) ainsi que de l'eau aux caravanes (cf. le fort du Deir construit vers 288 ap. J.-C.), ont lentement succombé devant la désertification due à l'épuisement des puits. Sans être exclusive, l'explication par la montée de la

contrainte hydrique et le déclin de la résilience de la société oasienne a joué un rôle certain dans la crise finale des oasis entre le IV^e et le VI^e s. ap. J.-C., sans préjuger des déterminants politiques, militaires et sociaux plus traditionnels qui restent pertinents [18].

CONCLUSION

Survoler, comme le fait cet article, la longue gestation de la géoarchéologie et des géosciences dans leurs relations avec l'archéologie, puis le foisonnement de ces nouvelles disciplines scientifiques depuis bientôt 40 ans révèle une forte accélération et des succès très nombreux. Le tableau partiel qui a été livré pour la France et une partie de la Méditerranée est, nous l'espérons avec d'autres, convaincant mais il montre mal l'ampleur des efforts consentis et l'ampleur planétaire des apports scientifiques de ces disciplines à la charnière de l'histoire des sociétés et de leur environnement. Très vite, forte de la multiplicité des approches locales et de leur potentiel de généralisation, la collaboration de la géoarchéologie et des géosciences d'une part, et de l'archéologie et de l'histoire d'autre part – sans exclure la nécessité sociale de justifier ces démarches – a démontré l'intérêt de leur

contribution à certaines grandes questions de notre époque et de notre futur. Les réponses apportées aux questionnements sur notre passé ont certes leur part de non reproductibilité inhérentes à des caractères souvent uniques, mais elles éclairent de lumières plus ou moins vives nos interrogations sur les causes des crises anciennes, sur leurs effets sociétaux parfois porteurs de la mort de sociétés entières mais aussi de capacités insoupçonnées de résilience et d'adaptation. Sans faire dire au passé ce qu'il ne peut dire, mais que nous souhaitons trop souvent lui extorquer, c'est le grand mérite du dialogue interdisciplinaire que d'apporter, parce qu'il est multiple, contradictoire et en général sans concession, sinon des réponses fermes, du moins un certain nombre de propositions raisonnables. Ces réponses seront indispensables dans les décennies à venir lorsque les choix à faire face au changement climatique et à ses graves effets indirects seront trop tardifs pour être capables d'influer sur nos politiques et devront, faute de mieux, interroger notre capacité d'adaptation au changement et les possibilités de survie d'une partie de l'humanité. ■

[18] BRAVARD ET AL. 2016a, BRAVARD ET AL. 2016b.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie les organisateurs, en particulier Bruno Gavazzi, de leur invitation aux Rencontres Géosciences – Archéologie 2019, ainsi que les deux relecteurs pour leurs remarques constructives.

BIBLIOGRAPHIE

- AUDOUZE, Françoise et al, 1998**, « Land use, settlement pattern and degradation in the Ancient Rhone Valley », dans S.E. Van Der Leeuw (éd.), *Understanding the natural and anthropogenic causes of land degradation and desertification in the Mediterranean basin. Synthesis*, The Archaomedes Project, Luxembourg, European Commission, Environment and Climate Program.
- BAGNALL, Roger S. & TALLET, G. (éd.), 2019**, *The Great Oasis of Egypt. The Kharga and Dakhla Oases in Antiquity*. Cambridge.
- BENCHETRIT, Maurice, 1955**, « Le problème de l'érosion des sols en montagne et le cas du Tell algérien (Essai de géographie appliquée) », *Revue de géographie alpine* 43/3, p. 605-640.
- BERGER, Jean-François, 2011**, « Hydrological and post-depositional impacts on the distribution of Holocene archaeological sites: The case of the Holocene middle Rhône River basin, France », *Geomorphology* 129, p. 167-182.
- BERGER, Jean-François, BROCHIER, Jacques-Léopold & BRAVARD, Jean-Paul, 1999**, « La géoarchéologie », *Les Nouvelles de l'Archéologie* 78/4, p. 8-12.

- BERGER, Jean-François, NUNINGER, Laure & VAN DER LEEUW, Sander, 2007**, « Modeling the role of resilience in socio-environmental co-evolution : the Middle Rhone Valley between 1000 BC and AD 1000 », dans T. Kolher & Sander Van Der Leeuw (éd.), *Modeling Socioecological Systems*, Santa Fé, p. 41-59.
- BERGER, Jean-François, SHENNAN, Stephen, WOODBRIDGE, Jessie, PALMISANO, Alessio, MAZIER, Florence, NUNINGER, Laure, GUILLON, Sébastien, DOYEN, Elise, BEGEOT, Carole, ANDRIEU-PONEL, Valérie, AZUARA, Julien, BEVAN, Andrew, FYFE, Ralph & ROBERTS, Neil (2019)**, « Holocene land cover and population dynamics in Southern France », *The Holocene*, en ligne : <https://doi.org/10.1177/0959683619826698>
- BONNAMOUR, Louis, 2017**, "Etienne Raffort, peintre de la Saône", *Bulletin de l'Académie de Villefranche et du Beaujolais* 40, p. 34-41.
- BOUSQUET, Bernard, 1996**, Tell-Douch et sa région : *Géographie d'une limite de milieu à une frontière d'Empire*, Le Caire.
- BOURDIER, Franck, 1963**, *Le Bassin du Rhône au Quaternaire*, géologie et préhistoire, 2 vol., Paris.
- BRAVARD Jean-Paul, VÉROT-BOURRÉLY, Agnès & SALVADOR, Pierre-Gil, 1992**, « Le climat d'après les informations fournies par les enregistrements sédimentaires fluviaux étudiés sur des sites archéologiques », *Les Nouvelles de l'Archéologie* 50, p. 7-13.
- BRAVARD, Jean-Paul, MOSTAFA, Ashraf, GARCIER, Romain, TALLET, Gaëlle & BALLET, Pascale, 2016a**, « Rise and fall of an Egyptian oasis: artesian flow, irrigation soils and historical agricultural development in El-Deir, Kharga Depression, Western Desert of Egypt », *Geoarchaeology, An International Journal* 31/6, p. 467-486.
- BRAVARD, Jean-Paul, MOSTAFA, Ashraf, DAVOLI, Paola, ADELSBERGER, Katherine, BALLET, Pascale, GARCIER, Romain & CALCAGNILE, Lucio, 2016b**, « Construction and destruction of irrigation soils from the Pharaonic to the Roman period at Amheida (Trimithis), Dakhla Oasis, The Western Desert of Egypt », *Geomorphologie: Relief, Processus, Environnement* 22/3, p. 305-324.
- BROOKES, Ian A., 1989**, « Above the salt: sediment accretion and irrigation agriculture in an Egyptian oasis », *Journal of Arid Environments* 17/3, p. 335-348.
- CHATEAUBRIAND, François-René de, 1811**, *Itinéraire de Paris à Jérusalem et de Jérusalem à Paris, en passant par la Grèce, et en revenant par l'Égypte, la Barbarie et l'Espagne*, Paris, 3 vol.
- DOUGUEDROIT, Annick, 1976**, *Les paysages forestiers de Haute-Provence et des Alpes-Maritimes. Géographie, écologie, histoire*, Thèse de géographie, Aix-en-Provence.
- DUFAURE, Jean-Jacques, BOMER, Bernard, GUÉRÉMY, Pierre & LHÉNAFF, René, 1984**, La Mobilité des paysages méditerranéens, *Revue de Géographie des Pyrénées et du Sud-Ouest*, Travaux II, Toulouse, 387 p.
- FOUACHE, Eric, 2010**, « L'approche géoarchéologique », dans *Regards croisés sur l'étude archéologique des paysages anciens. Nouvelles recherches dans le Bassin méditerranéen, en Asie centrale et au Proche et au Moyen-Orient*, Lyon (Travaux de la Maison de l'Orient et de la Méditerranée 56), p. 17-30.
- HIRTH, Claudine, 1971**, « Éléments d'explication à la formation des Rieds ello-rhénans au nord de Colmar, du début du Post-glaciaire à la canalisation du Rhin au XIX^e siècle », *Bull. Soc. Hist. Nat. Colmar*, 54, p. 21-44.
- JORDA, Maurice, 1980**, « Morphogénèse et évolution des paysages dans les Alpes de Haute-Provence depuis le Tardiglaciaire. Facteurs naturels et facteurs anthropiques », *Bull. Ass. Géographes Fr.* 472, p. 295-304.
- KUPER, R., KRÖPELIN, S., 2006**, « Climate-controlled Holocene occupation in the Sahara: Motor of Africa's evolution », *Science* 313/5788, p. 803-807.
- NEBOIT, René, 1983**, *L'Homme et l'érosion*, Fac. Lettres et Sc. humaines de l'université Clermont II, Nlle série 17.
- PROVANSAL, Mireille & LEVEAU, Philippe, 2006**, « Morphogénèse, anthropisation et changements climatiques : état du champ scientifique », dans Philippe Allée & Laurent Lespez (dir.), *L'Erosion entre société, climat et paléoenvironnement*. Clermont-Ferrand (Coll. « Nature et Sociétés » 3), p. 191-202.
- SCHUMM, Stanley, 1977**, *The Fluvial System*, New York.
- THÉVENOT, Jean-Paul, 1973**, *Le village préhistorique d'Ouroux-sur-Saône*, Solutré-Pouilly (Travaux du centre de Recherches de Solutré 1).
- VITA FINZI, Claudio, 1969**, *The Mediterranean Valleys. Geological Changes in Historical Times*, Cambridge.

LES ORIGINES D'OSTIE : QUELLES INTERACTIONS AVEC LA DYNAMIQUE D'EMBOUCHURE ? (DELTA DU TIBRE, ITALIE)

Ferréol SALOMON¹

¹ UMR 7362 Laboratoire Image, Ville, Environnement ; UNISTRA/CNRS ;
ferreol.salomon@live-cnrs.unistra.fr

RÉSUMÉ

Les origines d'Ostie ont fait l'objet de nombreuses études archéologiques et historiques. Selon les auteurs anciens, la fondation d'Ostie est attribuée à Ancus Martius qui aurait régné entre 646 et 616 av. J.-C. Cependant les données archéologiques disponibles à Ostie ne permettent pas de remonter avant le IV^e/III^e s. av. J.-C. Dans cet article nous nous proposons d'examiner ce désaccord chronologique dans une perspective géoarchéologique.

À partir d'une synthèse géomorphologique et chronostratigraphique, on observe que l'éventuelle Paléo-Ostia d'Ancus Martius aurait été fondée à la fin d'une période de forte progradation (IX^e et VI^e s. av. J.-C.) et au début d'une longue période d'érosion du lobe d'embouchure.

Au cours de cette même période, le chenal d'embouchure du Tibre migre vers le sud jusqu'au IV^e/III^e s. av. J.-C. Il semble ainsi inévitable qu'un éventuel noyau de peuplement fondé à l'embouchure même du Tibre à la fin du VII^e s. av. J.-C. aurait été rapidement affecté par une érosion littorale et possiblement fluviale.

The origins of Ostia have been the subject of numerous archaeological and historical studies. According to ancient authors, the foundation of Ostia is attributed to Ancus Martius who would have reigned between 646 and 616 BCE. However, archaeological data available at Ostia do not support the existence of the city before the 4th-3rd century BCE. In this article we examine this chronological disagreement through a geoarchaeological perspective.

Based on geomorphological and chronostratigraphic data available for the Tiber Delta, we observe that the timing of the foundation of Paleo-Ostia by Ancus Martius corresponds to the end of a period of strong progradation (9th – 6th BCE) and to the beginning of a long period of erosion of the river mouth promontory. During this same period, the lowermost channel of the Tiber migrated towards the south until the 4th – 3rd century BCE. Thus, it seems inevitable that any settlement founded right at the mouth of the Tiber at the end of the 7th century BCE would have been eroded by the combined action of the river and the waves in the middle of the 1st millennium BCE.

MOTS-CLÉS

Géoarchéologie,
géomorphologie fluvio-littorale,
antiquité romaine,
Ostie,
Paléo-Ostia,
embouchure,
delta du Tibre,
Italie.

KEYWORDS

Geoarchaeology,
geomorphology,
Roman period,
Ostia,
Palaeo-Ostia,
river mouth,
Tiber delta,
Italy.

Article accepté après évaluation par deux experts selon le principe du double anonymat

Les origines d'Ostie font l'objet d'un large débat depuis le XIX^e s. Le cœur du problème est l'inadéquation entre les données historiques et les données archéologiques. La tradition littéraire antique fait remonter la fondation d'Ostie à Ancus Martius, quatrième des sept rois de Rome (646 à 616 av. J.-C. d'après la chronologie de Varron), alors que les faits archéologiques font remonter sa fondation au IV^e/III^e s. av. J.-C. [1]. Cette datation est associée à la forteresse primitive d'Ostie, le *castrum*. Cette forteresse marque profondément l'urbanisme de la ville pour les époques républicaine et impériale. Elle fut découverte et fouillée par G. Calza [2].

Dans cette querelle entre la tradition littéraire et des faits archéologiques, la géoarchéologie tente elle aussi d'apporter des éléments de réflexion. En accord

avec J. Le Gall [3], A.G. Segre [4] et C. Giraudi [5], il est selon nous essentiel d'associer le destin de la ville d'Ostie à celui de l'évolution de l'embouchure du Tibre. Dès l'origine, la ville est intimement liée à cette embouchure. Le nom même d'Ostie (*Ostia*) est inspiré du terme *ostium* qui signifie « embouchure » en latin. Cependant, une d'embouchure est un point extrêmement mobile dans l'espace et dans le temps, dépendant tout autant de la position du littoral que du chenal du fleuve. Des travaux récents montrent que l'embouchure du Tibre a affecté l'Ostie archéologique [6]. La « Paléo-Ostia » des textes aurait elle aussi pu être touchée par cette dynamique d'embouchure. Nous souhaitons ici tester cette hypothèse.

Depuis maintenant 20 ans, de nombreuses opérations géoarchéologiques ont été réalisées à Portus et à Ostie. Nous proposons ici une synthèse des données morphologiques et chronostratigraphiques renseignant les modifications littorales et fluviales survenues à l'embouchure du Tibre au cours du 1^{er} millénaire av. J.-C. (fig. 1). Nous proposons ensuite de replacer la fondation de la Paléo-Ostia d'Ancus Martius dans le contexte morpho-dynamique de l'embouchure du Tibre du milieu du 1^{er} millénaire avant J.-C.

[1] MARTIN 1996 ; ZEVI 1996 ; 2001 ; 2002.

[2] CALZA *et al.* 1953.

[3] LE GALL 1953, p. 64.

[4] SEGRE 1986.

[5] GIRAUDI, TATA & PAROLI 2009.

[6] SALOMON *et al.* 2018.

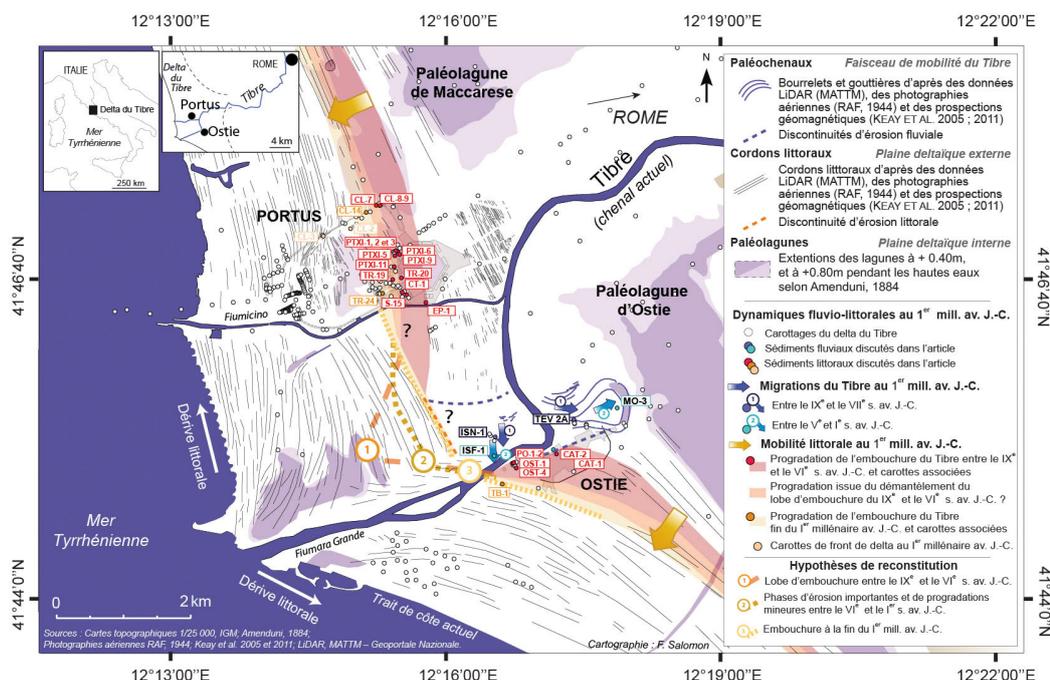


Figure 1
 Carte synthétique des données disponibles pour reconstituer la dynamique de l'embouchure du Tibre au milieu du 1^{er} millénaire av. J.-C. (F. Salomon).

CONTEXTE HISTORIQUE ET ARCHÉOLOGIQUE

Les textes antiques s'accordent tous pour attribuer la paternité de la fondation d'Ostie à Ancus Martius [7]. Si la plupart des auteurs ne s'attardent pas sur la question, quelques-uns apportent quelques précisions. Ainsi, Tite-Live [8] nous fait-il savoir que la fondation d'Ostie fait suite à la conquête du delta du Tibre sous Ancus Martius. Selon ce même auteur, la création de la ville fut accompagnée par la construction de salines. Aurelius Victor [9] et Ennius [10] lui attribuent déjà un rôle de port, mais cette fonction pourrait être plus tardive [11]. La première mention historique précise d'Ostie ne date que des années précédant 278 av. J.-C. [12], alors que des navires carthaginois y furent envoyés pour défendre Rome contre Pyrrhus [13]. Rome manquait à cette époque d'une force navale suffisante. Pendant la première guerre punique, c'est de Rome que partiront les bateaux, et non d'Ostie [14].

À l'entrée « Ostia » du *De verborum significatu* du lexicographe Festus [15], le commentaire est pour le moins troublant [16]. Festus dénonce un abus de langage dans le fait d'utiliser « Ostia » au pluriel. Il n'y aurait selon lui qu'une seule ville d'Ostie, fondée par Ancus Martius qui lui donna son genre féminin (*ostium*, l'embouchure, est neutre, Ostia, la ville, est féminin). Il précise que l'on doit utiliser « Ostia » pour la ville et pour la colonie fondée ensuite, mais en aucun cas cela ne justifie pour lui l'utilisation du pluriel. Le pluriel « Ostiae », qui semble un abus de langage, est-il dû uniquement au changement de statut de la ville ou à plusieurs sites successifs d'Ostie ? Est-il aussi possible d'envisager que plusieurs embouchures aient existé simultanément avec une Ostie composée de plusieurs sites ?

Les inscriptions sont une autre source textuelle. Elles offrent une information directe, n'ayant subi aucune reformulation ou faute de transcription au cours du temps. Malheureusement, une seule inscription mentionne les origines d'Ostie qu'elle place sous Ancus

Martius et sa date est tardive (II^e s. ap. J.-C.). Cette inscription illustrerait plutôt une tradition historique romaine déjà bien établie [17].

Les découvertes archéologiques ne peuvent guère nous faire remonter avant le IV^e s. av. J.-C. [18]. Ce bâtiment est couramment daté du IV^e/III^e s. av. J.-C., mais sa datation peut varier entre la fin du V^e s. et le début du III^e s. av. J.-C. [19]. Il s'agit d'une construction en tuf à scories élevée selon un plan rectangulaire et dont les dimensions sont de 194 x 126 m. Le *castrum* fixe le *cardo* et le *decumanus* de la ville. Autour de cette forteresse, des constructions commencent à s'installer à partir du III^e s. av. J.-C. [20]. Le *castrum* est le cœur de l'Ostie républicaine et impériale. Les indices archéologiques disponibles attestant d'une origine plus haute de la ville se réduisent à quelques céramiques, terres cuites, statuettes etc. en des quantités et des concentrations qui ne permettent pas de conclure à la présence d'un site d'implantation précis [21].

Si une Ostie antérieure au *castrum* a existé (Paléo-Ostia), elle ne se trouverait peut-être pas dans l'enceinte de ce *castrum*. Depuis le XIX^e s., archéologues et historiens ont proposé de nombreuses hypothèses pour la localisation de Paléo-Ostia. En 1829, L. Canina (fig. 2) proposait une localisation originelle d'Ostie proche du *Borgo* actuel d'*Ostia Antica* [22]. Selon lui, Paléo-Ostia se serait déplacée vers l'ouest en suivant la progradation du rivage et de l'embouchure du Tibre (fig. 2). Le déplacement du centre urbain d'Ostie était déjà associé à une possible mobilité de l'embouchure au 1^{er} millénaire av. J.-C. Au XX^e s., l'hypothèse d'un sanctuaire archaïque est proposée à la place d'Ostie avec la découverte de terres cuites architecturales datées entre la fin du VI^e s. av. J.-C. et le IV^e s. av. J.-C. auxquelles F. Zevi ajoute une sculpture architecturale du V^e s. av. J.-C. [23]. F. Coarelli [24] propose une hypothèse originale puisqu'il localise Paléo-Ostia non plus sur la rive gauche mais sur la rive droite du Tibre. Il appuie son hypothèse sur des critères topographiques renseignés

[7] Cicéron, *République*, II, 3, 5 et 18, 33 ; Eutrope, I ; Polybe VI, 11a, 6 ; Florus I, 4, 2 ; Pline *Histoire naturelle*, III.56 ; Strabon, V, 3, 5.

[8] Tite-Live, I, 33, 6-9.

[9] Aurelius Victor, *De viris illustribus*, V, 3.

[10] Ennius, *Histoires*, Frag. 22.

[11] Zevi 2001b.

[12] LE GALL 1953, p. 64.

[13] Valère Maxime, III, 10.

[14] Polybe, I, 29 ; Florus, II, 2.

[15] Festus, s.v. Ostia, p. 214 Lindsay.

[16] CÉBEILLAC-GERVASONI, CALDELLI & ZEVI 2006, p. 22.

[17] CÉBEILLAC-GERVASONI, CALDELLI & ZEVI 2006 ; CIL, XIV, Suppl. 4338.

[18] ZEVI 2001, 2002.

[19] CALZA *et al.*, 1953 ; MARTIN 1996 ; ZEVI, 2001, 2002.

[20] ZEVI 2001a.

[21] ZEVI 2002.

[22] CANINA 1838.

[23] MINGAZZINI 1947 ; ZEVI 1971.



Figure 2

Hypothèse de la localisation d'Ostie comme une « course à la mer » d'après Canina (1829). On y voit apparaître les mentions « Ostie des rois » puis « Ostie républicaine », à l'est, et « Ostie impériale », à l'ouest, dans le sens d'une progression du littoral vers l'ouest (L. CANINA, 1829).

par les auteurs anciens, en l'occurrence Denys d'Halicarnasse [25]. Paléo-Ostia fut aussi positionnée loin de l'embouchure. J. R. Brandt [26] suppose que Ficana ait été la première Ostie, sur le Monte Cugno à l'apex du delta du Tibre. D'autres auteurs, comme J. Le Gall [27], A. G. Segre [28], C. Giraudi [29] proposent une mobilité fluvio-littorale et supposent que la ville aurait suivi l'embouchure.

CONTEXTE GÉOARCHÉOLOGIQUE

Lorsque l'on se penche aujourd'hui sur une carte du delta du Tibre, on ne peut qu'être frappé par le tracé très particulier du fleuve. Pénétrant dans la plaine deltaïque, le chenal du Tibre adopte un tracé général d'est en ouest. Au lieu de poursuivre cette trajectoire et se jeter directement dans la mer, le Tibre change brusquement de direction à environ 5 km du littoral actuel pour s'orienter vers le sud. Il s'agit de la grande courbure du Tibre qui mène au site antique d'Ostie. Cette configuration laisse ainsi penser qu'un changement majeur du tracé du Tibre se serait produit, à une période donnée, vers le sud. Dans la partie

distale du delta, le Tibre aurait abandonné le compartiment central pour occuper le compartiment sud. Selon de nombreux auteurs, une défluviation se serait produite entre le IX^e s. et le IV^e s. av. J.-C. [30]. Une telle reconstitution postulerait ainsi en faveur d'une localisation possible de Paléo-Ostia dans le secteur de Portus.

Le premier à poser une telle hypothèse est A.G. Segre en 1967 dans une note explicative à la carte géologique [31]. Par rapport aux recherches plus récentes, Segre propose une datation assez basse de cette défluviation, la faisant remonter seulement au V^e/III^e s. av. J.-C. Segre semble s'être inspiré de l'inadéquation « textes-vestiges archéologiques » pour créer son cadre chronologique. Depuis une dizaine d'années, les données chronostratigraphiques se sont accumulées. Des dépôts mis en place sous influence fluviale en-dessous de Portus furent observés par plusieurs équipes de recherche [32]. Ces données suggèrent une forte influence fluviale dans les dépôts pré-portuaires de Portus datant de la première moitié du 1^{er} millénaire av. J.-C. Des dépôts similaires datés de la même époque furent aussi observés sous le port d'Ostie [33]. Plus récemment des études paléoenvironnementales

[24] COARELLI 1988.

[25] Denys d'Halicarnasse, III, 44, 4.

[26] BRANDT 2002.

[27] LE GALL 1953.

[28] SEGRE IN DRAGONE *et al.* 1967 ; SEGRE 1986.

[29] GIRAUDI 2009.

[30] DRAGONE *et al.* 1967 ; SEGRE 1986 ; GIRAUDI, TATA & PAROLI 2007 ; 2009 ; BELLOTTI *et al.* 2011.

[31] SEGRE IN DRAGONE *et al.* 1967.

[32] GIRAUDI, TATA & PAROLI 2007 ; 2009 ; GOIRAN *et al.* 2008 ; 2010.

[33] GOIRAN *et al.* 2014 ; HADLER *et al.* 2015.

dans le delta du Tibre ont permis d'apporter des clés d'identification pour les dépôts fluviaux et littoraux en contexte d'embouchure [34].

La publication de nombreux résultats issus de prospections géomagnétiques [35] et l'acquisition récente de données LiDAR [36] permettent aujourd'hui de compléter l'interprétation des photographies aériennes et satellites. Des traces de paléochenaux du Tibre sont observables dans la zone du paléoméandre d'Ostie [37] et au sud de l'Isola Sacra [38] (fig. 1). Partout ailleurs, la plaine de progradation du Tibre est recouverte de cordons littoraux (fig. 1). Dans cet article nous nous proposons de synthétiser ces données morphologiques de surface et de les combiner avec les informations issues des travaux géoarchéologiques effectués de Portus [39] à Ostie [40].

SYNTHÈSE DES DONNÉES GÉOMORPHOLOGIQUES ET CHRONOSTRATIGRAPHIQUES DISPONIBLES POUR RECONSTRUIRE L'ÉVOLUTION DE L'EMBOUCHURE DU TIBRE AU 1^{ER} MILLÉNAIRE AV. J.-C.

Cette synthèse s'appuie sur un travail cartographique et chronologique. La figure 1 synthétise des données paléo-morphologiques essentielles pour reconstruire les dynamiques passées du delta du Tibre. Elle présente aussi la localisation des carottages sélectionnés pour cette étude. La figure 2 combine les datations au radio-carbone disponibles pour reconstruire la dynamique d'embouchure du Tibre au 1^{er} millénaire av. J.-C.

La plaine deltaïque du Tibre présente trois ensembles géomorphologiques distincts : la plaine deltaïque interne, la plaine deltaïque externe et le faisceau de mobilité du Tibre (fig. 1). La plaine interne est occupée

par des paléolagunes qui ont été bonifiées à la fin du XIX^e s. Elles ont été cartographiées à partir des cartes d'Amenduni géoréférencées [41]. La plaine externe correspond à la plaine de progradation du delta du Tibre. Cet espace est caractérisé en surface par des cordons littoraux mis en place depuis le milieu de l'Holocène [42]. De nombreux cordons ont été cartographiés sur la base de photographies aériennes prises par la *Royal Air Force* pendant la Seconde Guerre mondiale [43]. Le delta du Tibre était alors encore très peu urbanisé. D'autres cordons littoraux ont été identifiés à partir de données LiDAR [44], et d'images issues de prospections géomagnétiques [45]. Enfin, le faisceau de mobilité du Tibre qui traverse d'est en ouest la plaine deltaïque interne et externe, est marqué par des morphologies fluviales. Parmi celles-ci, le plus significatif est le paléoméandre d'Ostie. Ce dernier a pu être cartographié avec précision grâce à une photographie prise par ballon en 1911 [46]. D'autres morphologies fluviales peuvent aussi être observées comme les bourrelets de convexité sur les photographies aériennes au nord du paléoméandre d'Ostie [47] et sur des images issues de prospections géophysiques au sud de l'Isola Sacra [48].

Les points de carottage proviennent d'une base de données qui réunit stratigraphies et datations absolues obtenues sur le delta du Tibre (fig. 1) [49]. Les données littorales sont issues principalement d'études menées à Portus [50] et à Ostie [51]. Les données fluviales sont une synthèse de publications s'intéressant au paléoméandre d'Ostie [52] ou aux paléochenaux d'embouchure [53]. Sur la figure 3, seules les datations des carottes réalisées en milieu fluvial et littoral avec des datations du 1^{er} millénaire av. J.-C. ont été reportées. Les datations issues des cordons littoraux mis en place antérieurement et postérieurement ne sont pas présentées dans cet article. La description

[34] SALOMON 2013 ; SALOMON *et al.* 2018.

[35] KEAY *et al.* 2005 ; KEAY & PAROLI 2011 ; GERMONI *et al.* 2018.

[36] Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare – MATTM – Geoportale Nazionale.

[37] ARNOLDUS-HUYZENDVELD & PAROLI 1995 ; SHEPHERD 2006 ; SALOMON *et al.* 2017.

[38] GERMONI *et al.* 2018.

[39] Principalement : GIRAUDI, TATA & PAROLI 2009 ; GOIRAN *et al.* 2010 ; SALOMON *et al.* sous presse.

[40] Principalement : GOIRAN *et al.* 2014 ; HADLER *et al.* 2015 ; SALOMON *et al.* 2018.

[41] AMENDUNI 1884.

[42] BELLOTTI *et al.* 1994 ; GIRAUDI 2004 ; BICKET *et al.* 2009.

[43] Aerofototeca Nazionale, Rome - RAF, 1944.

[44] Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare – MATTM – Geoportale Nazionale.

[45] KEAY *et al.* 2005 ; KEAY & PAROLI 2011 ; GERMONI *et al.* 2018.

[46] SHEPHERD 2006 ; SALOMON *et al.* 2017.

[47] Aerofototeca Nazionale, ROME - RAF, 1944.

[48] GERMONI *et al.* 2018.

[49] SALOMON *et al.* 2013.

[50] GIRAUDI, TATA & PAROLI 2009 ; GOIRAN *et al.* 2011 ; SALOMON 2013.

[51] GOIRAN *et al.* 2014 ; HADLER *et al.* 2015 ; SALOMON *et al.* 2018.

[52] SALOMON *et al.* 2017 ; HADLER *et al.* 2020.

[53] SALOMON, GOIRAN, PLEUGER, *et al.*, 2014 ; SALOMON *et al.* 2018, sous presse.

des stratigraphies est disponible dans les publications d'où ont été extraites les données présentées (**tableau 1**). La plupart des datations proviennent de carottages réalisés dans les bassins portuaires d'Ostie et Portus ou dans les canaux de Portus. Seules les parties inférieures de ces carottes ont été considérées pour cet article. Les dépôts portuaires ou de canaux ont été retirés. Cependant, quelques carottes présentent les stratigraphies originelles littorales (S15, CAT-2, OST-4, EP-1, CL-4 et TB-1) ou fluviales (ISF-1, MO-3 et TEV-2A) jusqu'à la surface actuelle.

Les datations par radiocarbone de la figure 3 ont toutes été recalibrées sur OxCal [54]. La courbe de calibration IntCal13.14c a été utilisée pour calibrer le matériel organique d'origine terrestre (matière organique, fragments de végétaux, bois, os charbons) [55]. Pour le matériel d'origine marine, la courbe de calibration marine Marine13.14c a été utilisée [56], avec une correction du delta R pour les coquilles marines ($\Delta R = 57 \pm 30$) et pour les posidonies ($\Delta R = 72 \pm 30$). Cet âge réservoir local a été calculé pour les côtes du Latium et publié il y a quelques années [57]. Sur la figure 3 les couleurs des dates calibrées et corrigées correspondent au matériel daté.

Pour la reconstruction de la dynamique fluviale, seul l'indicateur chronologique a été reporté sur la figure 3.A. Chaque groupe de date est associé à la carotte analysée. En revanche les dates issues de dépôts littoraux ont été reportées sur un diagramme âge-profondeur (**fig. 3.B**). Il est ainsi possible de mettre en lien la sédimentation avec l'évolution du niveau marin relatif. Peu de données sont disponibles pour reconstruire l'évolution du niveau marin dans le delta du Tibre au cours de ces trois derniers millénaires. La courbe relative reconstruite ici se base sur le niveau marin biologique identifié sur le môle nord de *Portus* et daté du III^e/V^e s. ap. J.-C. [58]. Pour des modélisations du niveau marin relatif au niveau régional (Latium), nous renvoyons aux publications de Lambeck *et al.* [59] et Vacchi *et al.* [60]

[54] <https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal/OxCal.html>

[55] REIMER *et al.* 2013.

[56] *Ibid.*

[57] GOIRAN *et al.* 2011, p. 174.

[58] GOIRAN *et al.* 2009.

[59] LAMBECK *et al.* 2010.

[60] VACCHI *et al.* 2016.

CAROTTES SÉDIMENTAIRES	LOCALISATION	DONNÉES SÉLECTIONNÉES	TYPES DE DÉPÔT	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES
MO-3	Fiume Morto	Paléoméandre d'Ostie	Fluvial	SALOMON <i>et al.</i> 2017
TEV-2A	Fiume Morto	Paléoméandre d'Ostie	Fluvial	HADLER <i>et al.</i> 2020
ISF-1	Sud de l'Isola Sacra	Paléochenal d'embouchure	Fluvial	SALOMON <i>et al.</i> 2014 ; 2018
ISN-1	Sud de l'Isola Sacra	Paléochenal d'embouchure (dépôts de canaux exclus)	Fluvial	SALOMON <i>et al.</i> sous presse
CT-1 ; PTXI-1, 2, 3, 5, 6, 9, 11 ; EP-1	Portus	Environnements pré-portuaires (dépôts de canaux exclus)	Littoral	SALOMON 2013
CL-2, 3, 7, 8-9, 14 ; TR-19, 20, 24	Portus	Environnements pré-portuaires (dépôts portuaires exclus)	Littoral	GOIRAN <i>et al.</i> 2010 ; 2011
S15	Portus	Environnements pré-portuaires	Littoral	GIRAUDI <i>et al.</i> 2009
PO-1, 2	Ostie	Environnements pré-portuaires (dépôts portuaires exclus)	Littoral	GOIRAN <i>et al.</i> 2012 ; GOIRAN <i>et al.</i> 2014
OST-1, 4	Ostie	Environnements pré-portuaire (dépôts portuaires exclus)	Littoral	HADLER <i>et al.</i> 2015
CAT-1, 2	Ostie	Paléodynamiques deltaïques sous Ostie	Littoral	SALOMON <i>et al.</i> 2018

Tableau 1

Carottes sédimentaires et types de dépôts associés – Les dépôts pré-portuaires ou pré-canaux du 1^{er} millénaire av. J.-C. ont été uniquement sélectionnés pour cette étude.

DYNAMIQUES FLUVIALES AU 1^{ER} MILLÉNAIRE AV. J.-C. : UNE MIGRATION VERS LE SUD

En sédimentologie, l'identification de la charge de fond du fleuve est essentielle pour attester de la présence d'un paléochenal. Pour le delta du Tibre, ce faciès a été analysé précisément dans les canaux de Portus [61] et dans le paléoméandre d'Ostie [62]. Il s'agit d'un dépôt de sables moyens à grossiers avec des petits graviers entre 2 et 4 mm. Parfois des galets de taille centimétrique peuvent aussi être observés. Plus proche de l'embouchure, les paléochenaux du Tibre présentent une intercalation fine de passées de sables fins à grossiers et de petits graviers [63].

Pour le 1^{er} millénaire av. J.-C., les sédiments fluviaux les plus anciens ont été retrouvés dans la carotte TEV-2A réalisée dans le pincement du pédoncule du paléoméandre d'Ostie [64], et à la base de la carotte ISN-1 réalisée dans le canal Portus-Ostie [65]. Cette mobilité fluviale est datée entre le IX^e et le VII^e s. av. J.-C. Des sédiments fluviaux plus récents, datés entre le V^e et le I^{er} s. av. J.-C., ont été identifiés dans la carotte MO-3, réalisée dans les derniers bourrelets de convexités en face de l'apex du paléoméandre d'Ostie et dans la carotte ISF-1, prélevée sur la rive droite du Tibre actuel en face de la Torre Bovacciana.

La combinaison de ces données chrono-sédimentaires confirme le modèle général d'évolution du paléoméandre d'Ostie et du paléochenal d'embouchure du Tibre esquissé et publié récemment [66]. Le 1^{er} millénaire av. J.-C. est caractérisé par une migration du paléochenal d'embouchure du Tibre du nord vers le sud et par la formation du paléoméandre d'Ostie vers l'est. Il est possible aussi que le paléochenal d'embouchure se soit contracté au cours de ce millénaire. Le faisceau de mobilité du Tibre à la fin de l'Holocène se trouve dans la zone sud de l'Isola Sacra. Il est limité au nord par les dépôts de cordons littoraux identifiés par prospections géomagnétiques [67], et au sud par les carottes OST-4 et CAT-2 qui présentent une sédimentation uniquement littorale pour le 1^{er} millénaire av. J.-C. [68]. Entre le IV^e/III^e s. et le I^{er} s. av. J.-C.,

le paléochenal du Tibre au nord du *castrum* d'Ostie se déplacera légèrement vers le nord [69]. Au cours du 1^{er} millénaire av. J.-C., il est envisageable que le chenal du Tibre ait aussi emprunté différents paléochenaux de manière simultanée dans l'espace de mobilité du Tibre défini précédemment [70].

DYNAMIQUES LITTORALES AU 1^{ER} MILLÉNAIRE AV. J.-C. : FORMATION D'UN IMPORTANT LOBE D'EMBOUCHURE SUIVI DE SON ÉROSION

Les stratigraphies littorales de Portus à Ostie présentent toutes une stratigraphie similaire [71]. Il s'agit de dépôts sableux très bien triés avec de fines laminations horizontales limono-sableuses à sablo-limoneuses. Cette régularité des dépôts est interrompue à des profondeurs allant de 9 m à 6 m sous le niveau marin actuel. Entre ces profondeurs, on observe alors des laminations obliques et entrecroisées, un mauvais tri des particules et une interstratification de niveaux sableux, limoneux et organiques. Ces niveaux organiques ont souvent été prélevés pour datation aussitôt la carotte extraite. Ces dépôts entre 9 et 6 m ont été interprétés comme étant associés aux barres immergées le long du littoral [72]. En-dessous de ces niveaux de barres immergées le grain moyen est inférieur à 200 µm (sables fins à très fins), et prend des valeurs supérieures à 200 µm au-dessus (sables moyens à grossiers) [73].

Une forte progradation du trait de côte entre le IX^e et le VI^e s. av. J.-C. avait déjà été identifiée sous Ostie [74]. Ce travail de synthèse démontre que cette progradation peut être observée d'Ostie à Portus. Les carottes CAT-2 et OST-4 à Ostie mais aussi S15 et EP-1 à Portus sont essentielles. La sédimentation peut être suivie de la base des carottes, à environ 10m de profondeur, jusqu'à la surface. Ces carottes, en particulier, démontrent la progradation du trait de côte dans la première partie du 1^{er} millénaire av. J.-C. Les datations au radiocarbone réalisées dans les 7 premiers mètres sous le niveau marin actuel mais

[61] SALOMON et al. 2014.

[62] SALOMON et al. 2017.

[63] SALOMON et al. 2014 ; 2018.

[64] HADLER et al. 2020.

[65] SALOMON et al. sous presse.

[66] SALOMON et al. 2017 ; 2018.

[67] KEAY & PAROLI 2011 ; GERMONI et al. 2018.

[68] HADLER et al. 2015 ; SALOMON et al. 2018.

[69] SALOMON et al. 2018.

[70] *Ibid.* ; HADLER et al. 2020.

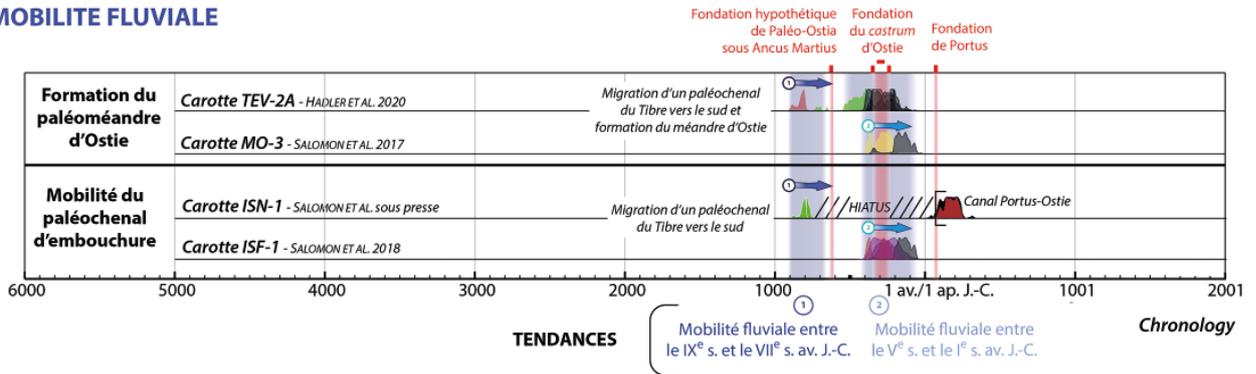
[71] GIRAUDI, TATA & PAROLI, 2009 ; SALOMON 2013 ; GOIRAN et al. 2014 ; HADLER et al. 2015.

[72] SALOMON 2013 ; voir NOLI, DE GIROLAMO & SAMMARCO 1996 pour la caractérisation sédimentaires des barres immergées du delta du Tibre dans l'actuel delta.

[73] SALOMON 2013.

[74] SALOMON et al. 2018.

A. MOBILITE FLUVIALE



B. MOBILITE LITTORALE - Datations des cordons littoraux du 1^{er} millénaire av. J.-C.

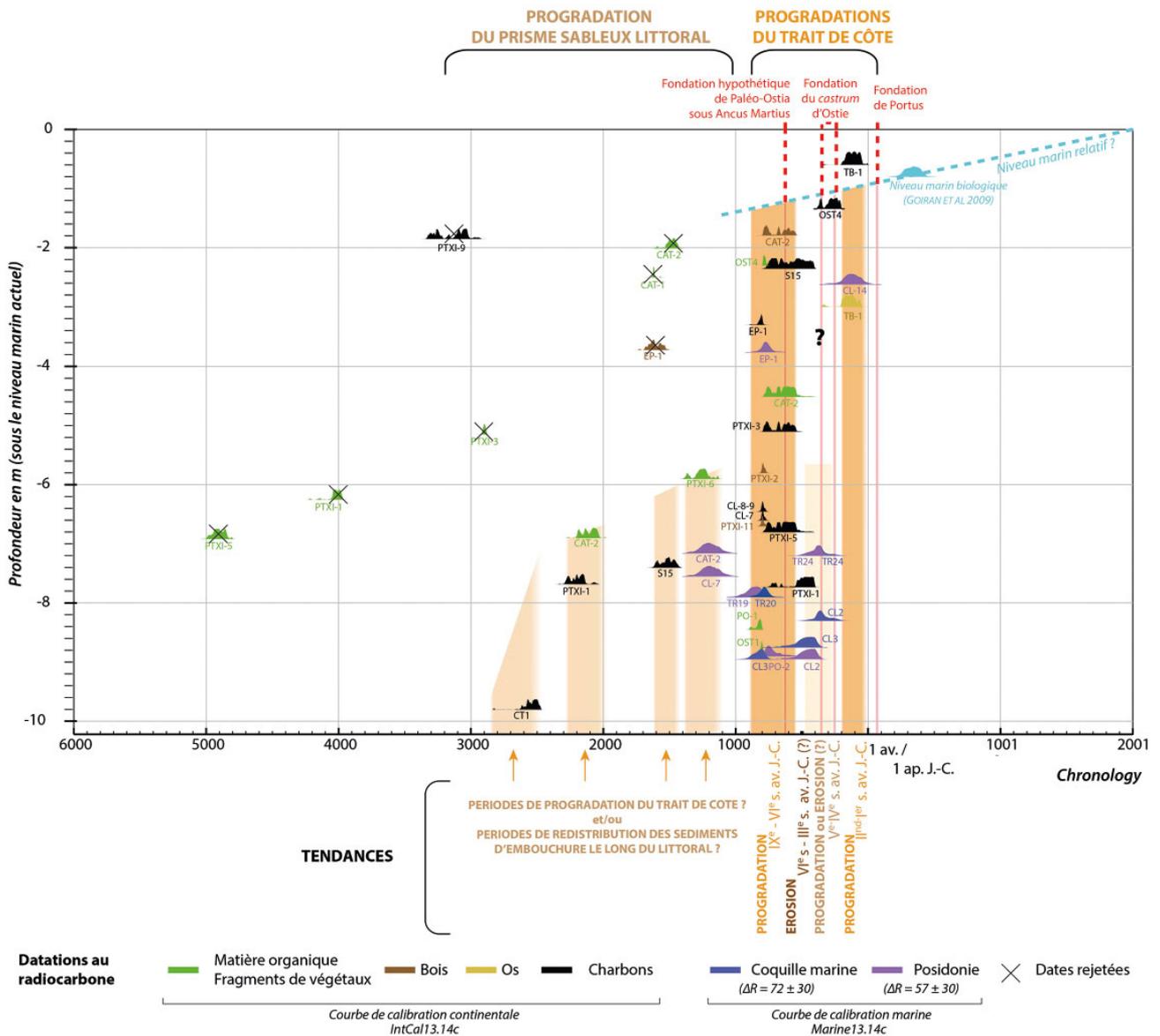


Figure 3

Chronologie de la mobilité fluviale et littorale du I^{er} millénaire av. J.-C. à l'embouchure du Tibre (F. Salomon). Les résultats de cette synthèse pourraient suggérer que le *castrum* était un site de repli face à l'érosion fluviale et littorale.

bien antérieures au 1^{er} millénaire av. J.-C. ont été rejetées de l'interprétation (**fig. 3**). Il s'agit d'éléments organiques remobilisés par le fleuve et déposés en domaine littoral. Nous rappelons ici que les carottes sélectionnées dans ce travail sont issues uniquement du groupe de cordons littoraux mis en place au 1^{er} millénaire av. J.-C. Les sables déposés entre 6 et 10 m de profondeur sous le niveau marin actuel et juste antérieur au 1^{er} millénaire av. J.-C. correspondent à la mise en place du front de delta (domaine littoral immergé).

La forte courbure des cordons littoraux observée en plan au sud d'Ostie suggère la formation d'un lobe d'embouchure émergé pénétrant assez loin le domaine marin entre le IX^e et le VI^e s. av. J.-C. (**fig. 1**). Une inflexion similaire des cordons littoraux peut être observée plus à l'ouest de la plaine deltaïque du Tibre, de part et d'autre du Fiumara Grande (**fig. 3**). Ces derniers cordons correspondent à une progradation très rapide du lobe d'embouchure au cours du XVI^e s. ap. J.-C. La formation de ce lobe au Petit Âge Glaciaire peut être reconstruite grâce à des cartes anciennes [75]. Les cartes du début du XVII^e s. permettent de voir le démantèlement du lobe d'embouchure par l'érosion. Les sédiments déposés à l'embouchure furent ensuite redistribués le long du littoral suivant les dérives littorales vers le nord et vers le sud [76]. Une forte érosion paraît aussi suivre la formation du lobe d'embouchure du IX^e/VI^e s. av. J.-C. Aucune inflexion significative des cordons littoraux n'est observée à l'ouest d'Ostie dans les dépôts directement postérieurs au 1^{er} millénaire av. J.-C. Aucun lobe d'embouchure ne peut être associé au paléochenal de la carotte ISN-1. Une discontinuité d'érosion est envisagée entre cette carotte et les cordons littoraux observés juste à l'ouest (pointillés jaunes numérotés 3 sur la figure 3). Il est possible que cette érosion ait débuté juste après la mise en place du lobe d'embouchure datée du IX^e/VI^e s. av. J.-C., et qu'elle se soit poursuivie au cours du 1^{er} millénaire av. J.-C. Nous supposons qu'une partie de la progradation enregistrée au sud et au nord de l'embouchure soit associée au démantèlement de ce lobe.

La dynamique littorale aux V^e et IV^e s. av. J.-C. est encore difficile à caractériser (Fig. 3). Aucun carottage ne permet de dater clairement la formation d'un

cordons littoral à cette époque. En effet, les sables littoraux datés de cette époque sont en dessous de 6 m de profondeur sous le niveau marin actuel (carottes TR-24, PTXI-1, CL-2 et CL-3). Aucune sédimentation ne peut être suivie jusqu'à la surface dans les carottes réalisées. Deux hypothèses sont ainsi possibles : soit cette sédimentation infralittorale est issue d'une phase de progradation, soit elle est à associer au démantèlement du lobe d'embouchure formé au IX^e/VI^e s. av. J.-C.

La fin du 1^{er} millénaire av. J.-C. est associée avec une nouvelle phase de progradation. Les carottes TB-1 à Ostie et CL-14 à Portus enregistrent l'atterrissement de nouveaux espaces littoraux. Dans ce cas, les datations ont été réalisées dans les trois derniers mètres sous le niveau marin actuel. À cette époque l'embouchure est à situer à l'ouest du port d'Ostie en activité [77], entre ISF-1 (domaine fluvial de l'embouchure) et TB-1 (domaine littoral de l'embouchure).

PALÉO-OSTIA ET LES DYNAMIQUES D'EMBOUCHURE DU TIBRE AU 1^{ER} MILLÉNAIRE AV. J.-C.

La figure 1 propose une reconstitution de l'évolution du lobe d'embouchure du Tibre au cours du 1^{er} millénaire av. J.-C. Si la présence d'un important lobe d'embouchure formé entre le IX^e/VI^e s. av. J.-C. est démontrée, sa position et sa morphologie ne sont pas connues précisément. De même, les modalités et la durée exacte de son érosion sont encore inconnues.

Revenons maintenant à la question initiale ayant trait à l'existence d'un site originel d'Ostie fondé par Ancus Martius à la fin du VII^e s. av. J.-C. Les données géoarchéologiques permettent d'éclairer le contexte morpho-dynamique dans lequel cette Paléo-Ostia aurait été fondée. La figure 3 indique la fondation hypothétique de Paléo-Ostia, la période de construction du *castrum* et celle de Portus sur les chronologies fluviales et littorales. Il est à noter que le règne d'Ancus Martius (646-616 av. J.-C.) se place à un moment charnière entre la fin de la période de forte progradation de l'embouchure du Tibre et le début d'une longue phase d'érosion. La fondation d'un site à l'embouchure même du Tibre à cette époque aurait subi sans conteste une forte érosion au cours des décennies ou des siècles suivants. Cependant, nous ne souhaitons pas ici pré-supposer de la localisation exacte de Paléo-Ostia. La littérature archéologique et historique a proposé de nombreuses hypothèses de localisation pour cette ville d'Ostie originelle, allant d'Ostie à Portus [78] en passant par Ficana [79]. Ceci dépend en effet de l'acceptation du terme « embouchure » et de l'échelle

[75] SALOMON 2013.

[76] *Ibid.*

[77] GOIRAN *et al.* 2014.

[78] CANINA 1838 ; COARELLI 1988 ; MINGAZZINI 1947 ; ZEVI 2002.

[79] BRANDT 2002.

spatiale considérée [80]. En revanche, les résultats géoarchéologiques permettent de cartographier les espaces affectés par l'érosion du 1^{er} millénaire av. J.-C. qui aurait pu faire disparaître des données archéologiques. Ainsi tout site archéologique fondé au milieu du 1^{er} millénaire av. J.-C. aurait pu être affecté par l'érosion s'il était situé : (1) à l'embouchure même du Tibre ; (2) au sud de l'Isola Sacra sur la rive gauche du fleuve ; (3) dans l'espace de mobilité du paléoméandre d'Ostie.

EN GUISE DE CONCLUSION

De nombreuses études sont encore nécessaires pour améliorer la reconstitution des dynamiques d'embouchure du Tibre. Cependant, les données réunies dans cet article permettent d'apporter des éléments de discussion concernant Paléo-Ostia.

Les données présentées dans cet article révèlent une forte progradation de l'embouchure du Tibre entre le IX^e et le VI^e s. av. J.-C. Il est très probable que cette forte progradation ait été rapidement suivie d'une érosion du lobe d'embouchure nouvellement formé. Cette tendance à l'érosion à l'embouchure se poursuit probablement jusqu'au I^{er} s. av. J.-C. malgré quelques pulsations de progradation au cours de la seconde moitié du 1^{er} millénaire av. J.-C. Ces déplacements

du trait de côte au 1^{er} millénaire sont accompagnés d'une migration du fleuve depuis le centre de l'Isola Sacra vers le sud au moins à partir du IX^e s. av. J.-C. et probablement d'une contraction du paléochenal d'embouchure. La migration du fleuve vers le sud semble se poursuivre jusqu'au IV^e/III^e s. av. J.-C.

Ce travail n'ambitionne pas de prouver l'existence de l'Ostie d'Ancus Martius, mais elle suggère le destin d'un site qui aurait été fondé à l'embouchure du Tibre à cette époque. Ce site aurait été érodé très rapidement, à une échelle décennale ou séculaire. Si nous nous replaçons dans un récit historique supposant l'existence d'une Paléo-Ostia à l'embouchure même du Tibre et fondée à la fin du VII^e s. av. J.-C., alors cette ville aurait été démantelée par l'érosion fluvio-littorale. Dans ce scénario, au lieu d'une « course à la mer » comme le suggère L. Canina avec un déplacement du site d'est en ouest (Fig. 2), la localisation du *castrum* d'Ostie pourrait être celle d'un site « de repli » succédant après une érosion à un site plus ancien. Au final, ce scénario permettrait de concilier les données de l'archéologie, celles de l'histoire et celles de la géoarchéologie. ■

[80] BHATTACHARYA & GIOSAN 2003.

[81] MORETTI 1993, p. 14-17.

REMERCIEMENTS

Je remercie ici la *Soprintendenza Speciale Archeologia Belle Arti e Paesaggio di Roma* et le *Parco Archeologico di Ostia* qui ont autorisé la réalisation de ces carottages géoarchéologiques. Je remercie en particulier Jean-Philippe Goiran, Jean-Paul Bravard, Fausto Zevi et Simon Keay pour leur soutien et leurs conseils qui permettent aujourd'hui la publication de cette synthèse. Merci enfin aux deux relecteurs anonymes qui ont contribué à enrichir cet article ainsi qu'à Bruno Gavazzi et Marie-José Morant pour leur travail d'édition.

BIBLIOGRAPHIE

AMENDUNI G., 1884, « Sulle opere di bonificazione della plaga litoranea dell'Agro Romano che comprende le paludi e gli stagni di Ostia, Porto, Maccarese e delle terre vallive di Stracciaccappa, Baccano, Pantano e Lago dei Tartari », *Relazione del progetto generale* 15/7, p. 36.

ARNOLDUS-HUYZENDVELD A. & PAROLI L., 1995, « Alcune considerazioni sullo sviluppo storico dell'ansa del Tevere presso Ostia e sul porto-canale », *Archeologia Laziale* 12, p. 383-392.

BELLOTTI P., CALDERONI G., DI RITA F., D'OREFICE M., D'AMICO C., ESU D., MAGRI D., MARTINEZ M.P., TORTORA P. & VALERI P., 2011, « The Tiber river delta plain (central Italy): Coastal evolution and implications for the ancient Ostia Roman settlement », *The Holocene* 21/7, p. 1105-1116.

- BELLOTTI P., CHIOCCI F.L., MILLI S., TORTORA P. & VALERI P., 1994**, « Sequence stratigraphy and depositional setting of the Tiber delta: integration of high-resolution seismics, well logs, and archeological data », *Journal of Sedimentary Research-Section B-Stratigraphy and Global Studies* 64/3, p. 416-432.
- BHATTACHARYA J.P. & GIOSAN L., 2003**, « Wave-influenced deltas: geomorphological implications for facies reconstruction », *Sedimentology* 50/1, p. 187-210.
- BICKET A.R., RENDELL H.M., CLARIDGE A., ROSE P., ANDREWS J. & BROWN F.S.J., 2009**, « A multiscale geoarchaeological approach from the Laurentine shore (Castelporziano, Lazio, Italy) », *Géomorphologie: Relief. Processus. Environnement* 4, p. 257-270.
- BRANDT J.R., 2002**, « Ostia and Ficana - Two Tales of One City? », *Mediterranean Archaeology* 15.
- CALZA G., BECATTI G., FLORIANI SQUARCIAPINO M., CALZA R., PENSABENE P., PIETROGRANDE A.L., BACCINI P., PAROLI L. & PAVOLINI C., 1953**, *Scavi di Ostia 1 1*, Roma.
- CANINA L., 1838**, « Sulla stazione delle navi di Ostia: sul porto di Claudio con le fosse indicate nella iscrizione scoperta l'anno 1836 e sul porto interno di Traiano e la fossa distinta col nome di questo imperatore », *Atti della Pontificia Accademia romana di archeologia* 8, p. 257-310.
- CÉBEILLAC-GERVASONI M., CALDELLI M.L. & ZEVI F., 2006**, *Epigraphie latine*, Paris.
- COARELLI F., 1988**, « I santuari, il Fiume, gli Empori », *Storia di Roma*, 1, p. 127-152.
- DRAGONE F., MANO A., MALATESTA A. & SEGRE A., 1967**, « Note illustrative del Foglio 149 Cerveteri della Carta Geologica d'Italia », *Servizio Geologico d'Italia* 4, p. 1-93.
- GERMONI P., KEAY S., MILLETT M. & STRUTT K., 2018**, « Ostia beyond the Tiber: recent archaeological discoveries in the Isola Sacra », in Mireille Cébeillac-Gervasoni, Nicolas Laubry & Fausto Zevi (dir.), *Ricerche su Ostia e il suo territorio*, Atti del Terzo Seminario Ostiense, Roma, École française de Rome, 21-22 ottobre 2015, Rome (Collection de l'École française de Rome 553).
- GIRAUDI C., 2004**, « Evoluzione tardo-olocenica del delta del Tevere », *Il Quaternario* 17, 2/2, p. 477-492.
- GIRAUDI C., TATA C. & PAROLI L., 2007**, « Carotaggi e studi geologici a Portus: il delta del Tevere dai tempi di Ostia Tiberina alla costruzione dei porti di Claudio e Traiano », *The Journal of Fasti Online*.
- GIRAUDI C., TATA C. & PAROLI L., 2009**, « Late Holocene evolution of Tiber river delta and geoarchaeology of Claudius and Trajan Harbor, Rome », *Geoarchaeology* 24/3, p. 371-382.
- GOIRAN J.-P., SALOMON F., MAZZINI I., BRAVARD J.-P., PLEUGER E., VITTORI C., BOETTO G., CHRISTIANSEN J., ARNAUD P., PELLEGRINO A., PEPE C. & SADORI L., 2014**, « Geoarchaeology confirms location of the ancient harbour basin of Ostia (Italy) », *Journal of Archaeological Science* 41, p. 389-398.
- GOIRAN J.-P., SALOMON F., PLEUGER E., VITTORI C., MAZZINI I., BOETTO G., ARNAUD P. & PELLEGRINO A., 2012**, « Résultats préliminaires de la première campagne de carottages dans le port antique d'Ostie », *Mélanges de l'École Française de Rome* 123/2, Chroniques.
- GOIRAN J.-P., SALOMON F., TRONCHÈRE H., DJERBI H., CARBONEL P., OGNARD C. & OBERLIN C., 2011**, « Géoarchéologie des ports de Claude et de Trajan, Portus, delta du Tibre », *Mélanges de l'École Française de Rome Antiquité* 123/1, p. 157-236.
- GOIRAN J.-P., TRONCHÈRE H., CARBONEL P., SALOMON F., DJERBI H., OGNARD C., LUCAS G. & COLALELLI U., 2008**, « Portus, la question de la localisation des ouvertures du port de Claude : approche géomorphologique », *Mélanges de l'École Française de Rome* 121/1, Chroniques, p. 217-228.
- GOIRAN J.-P., TRONCHÈRE H., COLALELLI U., SALOMON F. & DJERBI H., 2009**, « Découverte d'un niveau marin biologique sur les quais de Portus: le port antique de Rome », *Méditerranée* 112/1, p. 59-67.
- GOIRAN J.-P., TRONCHÈRE H., SALOMON F., CARBONEL P., DJERBI H. & OGNARD C., 2010**, « Palaeoenvironmental reconstruction of the ancient harbors of Rome: Claudius and Trajan's marine harbors on the Tiber delta », *Quaternary International* 216/1-2, p. 3-13.
- HADLER H., FISCHER P., OBROCKI L., HEINZELMANN M. & VÖTT A., 2020**, « River channel evolution and tsunami impacts recorded in local sedimentary archives - The 'Fiume Morto' at Ostia Antica (Tiber River, Italy) », *Sedimentology*.
- HADLER H., VÖTT A., FISCHER P., LUDWIG S., HEINZELMANN M. & ROHN C., 2015**, « Temple-complex post-dates tsunami deposits found in the ancient harbour basin of Ostia (Rome, Italy) », *Journal of Archaeological Science* 61, p. 78-89.
- KEY S., MILLETT M., PAROLI L. & STRUTT K., 2005**, *Portus: An Archaeological Survey of the Portus of Imperial Rome*, London.
- KEY S. & PAROLI L., 2011**, *Portus and its Hinterland: Recent Archaeological Research*, London.
- LAMBECK, K., ANTONIOLI, F. & ANZIDEI, M., 2010**. « Sea level change along the Tyrrhenian coast from early Holocene to the present », *Atti dei Convegni Lincei* 254, p. 11-26.
- LE GALL J., 1953**, *Le Tibre, fleuve de Rome dans l'antiquité*, Paris.
- MARTIN A., 1996**, « Un saggio sulle mura del castrum di Ostia (Reg. I, ins. X, 3) », dans A. Gallina Zevi & A. J. Claridge (dir.), *"Roman Ostia" revisited*, London (Archaeological and Historical Papers in Memory of Russell Meiggs, British School at Rome and Soprintendenza archeologica di Ostia), p. 19-38.
- MINGAZZINI P., 1947**, « Esisteva un abitato ostiense anteriore alla colonia romana ? », *Atti della Pontificia Accademia romana di archeologia. Rendiconti* 23-24, p. 75-83.
- NOLI P., DE GIROLAMO P. & SAMMARCO P., 1996**, « Parametri meteomarinari e dinamica costiera », *Il mare del Lazio*, Università "La Sapienza" di Roma, Regione Lazio Assessorato opere e reti di servizi e mobilità.
- REIMER P.J., BARD E., BAYLISS A., BECK J.W., BLACKWELL P.G., BRONK RAMSEY C., BUCK C.E., CHENG H.,**

- EDWARDS R.L., FRIEDRICH M., GROOTES P.M., GUILDERTON T.P., HAFLIDASON H., HAJDAS I., HATTÉ C., HEATON T.J., HOFFMANN D.L., HOGG A.G., HUGHEN K.A., KAISER K.F., KROMER B., MANNING S.W., NIU M., REIMER R.W., RICHARDS D.A., SCOTT E.M., SOUTHON J.R., STAFF R.A., TURNEY C.S.M. & PLICHT J. VAN DER, 2013**, « IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP », *Radiocarbon* 55/4, p. 1869-1887.
- SALOMON F., 2013**, *Géoarchéologie du delta du Tibre : Evolution géomorphologique holocène et contraintes hydro-sédimentaires dans le système Ostie - Portus*, Thèse de doctorat en Géographie Physique / Géoarchéologie, Université Lyon 2, Lyon.
- SALOMON F., GOIRAN J.-P., BRAVARD J.-P., ARNAUD P., DJERBI H., KAY S. & KEAY S., 2014**, « A harbour-canal at Portus: a geoarchaeological approach to the Canale Romano: Tiber delta, Italy », *Water History* 6/1, p. 31-49.
- SALOMON F., GOIRAN J.-P., PLEUGER E., MAZZINI I., ARNOLDUS-HUYZENDVELD A., GHELLI A., BOETTO G. & GERMONI P., 2014**, « Ostie et l'embouchure du Tibre », *Chronique des activités archéologiques de l'École française de Rome*, En ligne.
- SALOMON F., GOIRAN J.-P., BRAVARD J.-P., DELILE H., ATHANASSAS C.D., BALLANTYNE R.M., JUVIGNÉ E. & KEAY S., SOUS PRESSE**, « Geoarchaeology at Portus. The analysis of sedimentary cores from the centre of the port (Chapter 12) », in Keay S. *et al.*, *Portus*, sous presse.
- SALOMON F., GOIRAN J.-P., NOIROT B., PLEUGER E., BUKOWIECKI E., MAZZINI I., CARBONEL P., GADHOUM A., ARNAUD P., KEAY S., ZAMPINI S., KAY S., RADDI M., GHELLI A., PELLEGRINO A., MORELLI C. & GERMONI P., 2018**, « Geoarchaeology of the Roman port-city of Ostia: Fluvio-coastal mobility, urban development and resilience », *Earth-Science Review* 177, Supplement C, p. 265-283.
- SALOMON F., GOIRAN J.-P., PANNUZI S., DJERBI H. & ROSA C., 2017**, « Long-Term Interactions between the Roman City of Ostia and Its Paleomeander, Tiber Delta, Italy », *Geoarchaeology* 32/2, p. 215-229.
- SALOMON F., LEBRUN-NESTEROFF L., GOIRAN J.-P., BOETTO G., ROSA C., ARNOLDUS-HUYZENDVELD A., GERMONI P., GHELLI A., MAZZINI I., VITTORI C. & ZAMPINI S., SOUS PRESSE**, « A multi-proxy analysis of the evolution of the Portus-Ostia canal », dans S. Keay *et al.* (éd.), *Archaeology of the Isola Sacra*, p. 56-76.
- SEGRE A.G., 1986**, « Considerazioni sul Tevere e sull'Aniene nel Quaternario. In: Il Tevere e le altre vie d'acqua del Lazio antico », *Archeologia Laziale* 7/2, p. 9-17.
- SHEPHERD E.J., 2006**, « Il "Rilievo Topofotografico di Osita dal Pallone" », *AArea II*, p. 15-38.
- VACCHI, MATTEO, MARRINER, NICK, MORHANGE, CHRISTOPHE, SPADA, GIORGIO, FONTANA, ALESSANDRO & ROVERE, ALESSIO, 2016**, « Multiproxy assessment of Holocene relative sea-level changes in the western Mediterranean: Sea-level variability and improvements in the definition of the isostatic signal », *Earth-Science Reviews* 155, p. 172-197.
- ZEVI F., 1971**, « Museo Ostiense, Nuove immissioni », *Soprintendenza alle antichità di Ostia*, p. 35.
- ZEVI F., 1996**, « Sulle fasi piu antiche di Ostia », dans A. Gallina Zevi & A. Claridge, "Roman Ostia" revisited: *archaeological and historical papers in memory of Russell Meiggs*, London, p. 69-89.
- ZEVI F., 2001**, « Les débuts d'Ostie », dans J.-P. Descoeurdes (dir.), *Ostia port et porte de Rome antique*, Genève, p. 3-9.
- ZEVI F., 2002**, « Origini di Ostia », dans C. Bruun & A.G. Zevi (éd.), *Ostia e Portus nelle loro relazioni con Roma*, Roma, p. 11-32.

GÉOARCHÉOLOGIES DES CONTEXTES URBAINS : MIEUX COMPRENDRE LES MODALITÉS DE L'ARTIFICIALISATION DES GÉOSYSTÈMES

Quentin BORDERIE^{1,2,*}, Rowena Y. BANERJEA³, Stéphane BONNET^{4,5}, Yannick DEVOS⁶, Cristiano NICOSIA⁷, Christophe PETIT², Ferréol SALOMON⁸, Nathalie SCHNEIDER^{8,9}, Barbora WOUTERS⁶, Patrice WUSCHER^{8,10}

¹ Conseil départemental d'Eure-et-Loir. ² UMR 7041 ArScAn, équipe Archéologies environnementales, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne. ³ University of Reading, Royaume-Uni. ⁴ Ville d'Aix-en-Provence
⁵ UMR 7299 Centre Camille Julian. ⁶ Maritime Cultures Research Institute (MARI), Vrije Universiteit Brussel (VUB), Belgique. ⁷ Dipartimento dei Beni Culturali, Università di Padova, Italie. ⁸ UMR 7362 Live, CNRS, Université Strasbourg. ⁹ Institut national de recherches archéologiques préventives
¹⁰ Archéologie Alsace. * quentinborderie@yahoo.fr

RÉSUMÉ

L'objet des approches géoarchéologiques de l'urbain est constitué du site, de la ville en tant qu'artefact et bassin artificiel de sédimentation anthropique. Dans ces contextes, les relations entre les sociétés et le géosystème produisent des formations pédo-sédimentaires denses et diverses. Les échelles traitées sont celles d'un socio-système complexe, incluant le substrat pédo-géo-chimique local, les formations superficielles artificielles et les relations avec l'hinterland. Dans un contexte actuel d'artificialisation accélérée des espaces, comprendre ces systèmes peut être une clé pour aborder l'Anthropocène. Différentes approches géoarchéologiques de cet objet urbain hybride, conduites en Europe, sont exposées dans cet article. De l'âge du Fer à la période moderne, elles

abordent les questions de topographie préurbaine, de gestion sociale des flux de matériaux, de pollutions, d'occupation des espaces et d'évolution des stratifications. Les résultats montrent la diversité des relations entre les sociétés et les sols, dans une co-construction sur le temps long de systèmes urbains artificiels.

Geoarchaeological approaches to ancient urban contexts focus on the study of the town as an artefact, and as an artificial and anthropogenic sedimentary basin. In such context the relationship between societies and the geosystem generates diverse and dense pedo-sedimentary formations. The studied scales of such a complex socio-system encompass local geochemical substrate, artificial superficial formations, and relationship between town and hinterland. In the actual conditions of massive and accelerated artificialisation of spaces, the study of those systems can give new clues to better understand the Anthropocene. Different geoarchaeological approaches developed in Europe to study this hybrid urban object are exposed here.

From the Iron Age to modern period, they deal with questions of pre-urban topography, social management of material flows, pollutions, occupation of spaces, stratigraphy, and taphonomy. The obtained results underline the diversity of the relations between societies and soils, rivers, hazards in a long-term co-construction of artificial urban systems, which are our heritage now.

MOTS-CLÉS

Socio-écosystèmes, ville, anthropisation, artificialisation, pollutions, pédologie, micromorphologie, archéologie, paysage, terres noires.

KEYWORDS

Socio-ecosystem, dark earth, town, anthropisation, artificialisation, pollutions, pedology, micromorphology, archaeology, landscape.

Article accepté après évaluation par deux experts selon le principe du double anonymat

INTRODUCTION

LA VILLE ET L'URBAIN

L'impact des modalités anciennes d'urbanisation du paysage et des écosystèmes pourrait paraître bien insignifiant face à l'urbain global, à l'artificialisation effrénée des sols à laquelle nous assistons aujourd'hui et qui contribuent à définir la période actuelle en tant qu'Anthropocène [1]. Pourtant, c'est peut-être cette diversité des formes complexes de l'urbain, depuis l'agglomération néolithique et l'*oppidum* de l'âge du Fer jusqu'à la cité antique et à la ville médiévale, qui contribue aux « racines de l'Anthropocène » [2] et pose les jalons d'une anthropisation totale des paysages.

En échappant à toute définition disciplinaire, les contextes urbains s'imposent d'emblée par leur complexité, la diversité des points de vue qui s'y focalisent [3] et la nécessité de les aborder sans déterminisme quant à leur trajectoire historique [4], à l'aide d'estimateurs et de gradient de distribution qui informent sur le caractère plus ou moins urbain des espaces. Au-delà d'une confrontation entre Nature et Culture [5], entre Société et Milieu [6], la diversité des cas de figure et la singularité des rapports à l'espace et au sol qui se créent dans les contextes urbains invitent plutôt à dépasser le paradigme de l'anthropisation pour côtoyer celui de l'artificialisation, c'est-à-dire de passer d'une vision d'un impact sur le milieu à la construction même du milieu [7].

L'objectif de cet article est de montrer l'apport de différentes approches géoarchéologiques des contextes urbains à la compréhension des géo-systèmes artificiels complexes. Après avoir présenté le contexte d'émergence de la géoarchéologie des contextes urbains, en avoir proposé une définition, ce sont les problématiques liées au bassin sédimentaire urbain

en tant que tel, puis aux co-constructions société-milieu qui seront exposées, avec les méthodes pour les aborder, au travers d'exemples actuels et de résultats récents. Enfin, des éléments de réflexions sur une approche à long terme de l'enregistrement et de la conservation de ces contextes seront proposés.

LES APPROCHES GÉOARCHÉOLOGIQUES DES CONTEXTES URBAINS

Initiée au début des années 1980, au sein d'une archéologie environnementale naissante [8], la géoarchéologie des contextes urbains s'est concrétisée en France par les premières collaborations entre géographes, géologues et archéologues lors de grands chantiers de sauvetage. Les prémices d'une vision géomorphologique furent déjà esquissées par Th. Vacquer dès 1844, lors des travaux haussmanniens à Paris, notamment par la cartographie à l'échelle de la capitale de terres végétales enfouies. À partir de la fin du XX^e s., ce fut le cas lors des fouilles de La Bourse à Marseille et l'étude du port antique [9], ainsi que des travaux préalables à la construction de la ligne D du métro de Lyon [10]. Ces premières collaborations se sont prolongées lors de tables rondes nationales, telle celle organisée par le Centre national d'archéologie urbaine (Cnau) en 1988 [11]. Du fait peut-être d'un cloisonnement disciplinaire fort entre géologues du Quaternaire et archéologues, ces travaux relevaient d'une géomorphologie appliquée dans la ville, plus que d'une géoarchéologie de l'objet urbain.

Dans le même temps, s'est mis en place au Proche et Moyen-Orient une autre géoarchéologie, lors de fouilles programmées des accumulations sédimentaires urbaines dénommées « tell ». D'abord par la mise en place de cartographies du phosphore [12], ces paysages anthropiques sont abordés à partir des années

[1] BEAU & LARRÈRE 2018.

[2] MAGNY 2019.

[3] PAQUOT *et al.* 2000.

[4] GALINIÉ 2000 ; LEPETIT 1996.

[5] DESCOLA 2005.

[6] MUXART *et al.* 2003.

[7] BEAU & LARRÈRE 2018.

[8] BUTZER 1982 ; BUTZER *et al.* 1983 ; HALL & KENWARD 1982.

[9] MORHANGE *et al.* 1996.

[10] BRAVARD *et al.* 1989.

[11] BRAVARD *et al.* 1988.

[12] DAVIDSON 1973 ; 1976.

1980 comme un artéfact en soit [13] dont l'étude mobilise les méthodes des sciences de la Terre et du sol [14]. Ces méthodes sont appliquées en France pour l'étude du site de Lattes (Hérault), où le concept d'unités morpho-fonctionnelles est développé [15]. Malheureusement, cette application des méthodes des géosciences aux occupations humaines souffre encore d'une vision tronquée de l'objet d'étude, qui reste limité à une dichotomie et une opposition entre nature et culture, où le degré « d'anthropisation » est cherché dans les tentatives de généralisation [16]. Et l'on reste finalement ici dans une stratigraphie et une pédo-sédimentologie des contextes urbains.

Quant à l'approche pédologique des sols urbains, elle est initiée en France avec le Groupement d'intérêt scientifique (GIS) « sol urbain », dans les années 1990. Quinze laboratoires firent partie de ce GIS, qui fut relayée par le Cnau [17] et dont l'axe 4.1, piloté par H. Galinié, est intitulé « sols anciens ». De cette vaste organisation scientifique, aboutiront un congrès en 1995 et deux ouvrages [18]. Dans le Référentiel pédologique français, D. Baize et M.-C. Girard [19] proposent la définition des « anthroposols archéologiques », parmi les autres anthroposols. Si cette invention permet une certaine prise en compte de la profondeur historique des sols artificiels, tout en suggérant *a priori* une valeur patrimoniale discutable, elle esquivait toute la complexité de leur constitution sur le temps long, les renvoie en marge des autres anthroposols alors qu'elle pourrait les contenir tous.

Depuis les années 1980, les publications et les rencontres consacrées aux approches géoarchéologiques des contextes urbains sont restées sporadiques, même si elles commencent aujourd'hui à se multiplier. Ainsi, de 1986 à 2016, seuls 26 articles de la revue « Geoarchaeology: an international journal », sur un total de 867, sont consacrés à l'étude des contextes urbains, soit seulement 3%. Un tel constat peut être fait pour d'autres revues spécialisées de géoarchéologie. Depuis les pionnières rencontres du Cnau à Tours en 1988, Paris a accueilli en 2009 une table ronde intitulée « Géoarchéologie de l'urbain », animée par J. Burnouf et J.-P. Bravard [20]. À Bruxelles en 2015 s'est tenu le Congrès international « Congress of Environmental Archaeology in European Cities »,

faisant la part belle à la géoarchéologie [21]. À Caen en 2016, une session de la Réunion des Sciences de la Terre (RST) a été consacrée aux « Géosystèmes urbains » et, deux ans plus tard à Barcelone en 2018, une session du colloque annuel de l'European Association of Archaeologists (EAA) était exclusivement consacrée à l'« Urban geoarchaeology ».

POUR DÉFINIR LA GÉOARCHÉOLOGIE DES CONTEXTES URBAINS

Dans ce contexte d'émergence d'un objet d'étude hybride, comment alors définir la géoarchéologie des contextes urbains ? D'abord en s'inscrivant dans la géoarchéologie telle qu'elle est définie par K. W. Butzer au début des années 1980, « l'étude des interactions dynamiques entre les groupes humains et leurs environnements, par l'étude et l'interprétation des sédiments et des paysages physiques » [22]. Puis, en soulevant des questionnements et des problématiques archéologiques liés aux conditions spécifiques de densité et de diversité propres aux espaces urbains [23], et qui contribuent à la constitution d'une connaissance historique, dans une perception systémique des objets de recherche. Enfin, en pratiquant cette étude du sédiment en mobilisant les méthodes des géosciences, dans une permanente interdisciplinarité.

L'URBAIN : UN BASSIN SÉDIMENTAIRE ANTHROPIQUE

DE LA TOPOGRAPHIE PRÉ-URBAINE AUX FORMATIONS SUPERFICIELLES ANTHROPIQUES

Une des premières problématiques abordées par la géoarchéologie des contextes urbains est peut-être celle du site d'implantation des villes, qualifié à tort de « naturel ». Il s'agit ici de mieux connaître les conditions initiales et de développement de ces places centrales, en ayant accès au potentiel sédimentaire du site et à la topographie pré-urbaine. Les travaux conduits à Grenoble sont précurseurs [24], car ils ont permis de reconsidérer la part des matériaux alluviaux et celle des accumulations anthropiques dans le

[13] ROSEN 1986.

[14] MATTHEWS 1992 ; MATTHEWS *et al.* 1995 ; 1997.

[15] CAMMAS 1994 ; 1999 ; 2003.

[16] GÉ *et al.* 1993.

[17] GARMY 2009.

[18] BARLES *et al.*, 1999 ; CHEVERRY & GASCUEL 2009.

[19] BAIZE & GIRARD 2009.

[20] BORDERIE 2011a.

[21] DEVOS *et al.* 2017b.

[22] BUTZER 1982.

[23] LEVY & LUSSAULT 2003.

[24] PEIRY & FÉOUGIER 1997.

sous-sol, ces dernières constituant un dôme qui était, jusque-là, interprété comme fluviatile. Ceux effectués plus récemment à Tours et à Paris sont particulièrement poussés, puisqu'ils ont permis d'identifier finement la topographie antérieure au développement de la ville et, notamment, la géométrie des anciennes formes d'origine alluviales [25]. En ce qui concerne l'urbanisation du site à l'époque médiévale notamment, le cumul d'observations géoarchéologiques à Bruxelles permet de constater le passage progressif d'activités agraires et pastorales à des activités très diversifiées, produisant souvent des rejets importants [26]. À l'échelle d'une région comme l'Alsace (fig. 1), si l'on compare les différents sites d'implantation des villes depuis l'Antiquité, à l'aune des nombreuses données acquises par l'archéologie préventive, on constate qu'aucun déterminisme ne peut être établi. Ainsi, à l'époque antique, l'agglomération de Strasbourg se situe sur une terrasse alluviale couverte de lœss du Pléistocène supérieur exondée durant tout l'Holocène. La plaine alluviale n'est occupée que par un camp militaire. Malgré les aléas, l'humidité et les risques d'inondation, la ville médiévale se développera dans la plaine alluviale [27]. Les agglomérations antiques d'Horbourg-Wihr 2016 [28], d'Oedenburg (Biesheim-Kunheim, France), installées toutes deux en plaine

alluviale ont connu un développement différent et posent la question de l'acceptation de certains aléas (inondations) par les sociétés [29]. Au contraire d'Horbourg dont elle est voisine, l'agglomération médiévale de Colmar se développe quant à elle sur un cône alluvial pléistocène exondé à l'Holocène, tout comme la ville médiévale de Sélestat. Les indices d'occupation antique et la ville médiévale de Mulhouse se trouvent quant à elle en zone humide, dans la plaine alluviale de l'Ill [30], mais la cartographie de son sous-sol demande encore à être précisée.

Dépasser la notion de site et de potentiel permet d'aborder celle de dynamique des formations superficielles anthropiques [31]. Il s'agit ici de qualifier les différents types de formations, leur extension et leurs dynamiques, leur place dans le processus

[25] LAURENT 2007 ; LAURENT & FONDRILLON 2010 ; NOIZET *et al.* 2013.

[26] DEVOS *et al.* 2017a ; 2019.

[27] SCHWIEN *et al.* 1998.

[28] HIGELIN 2016 ; ROTH-ZEHNER 2018.

[29] OLLIVE *et al.* 2006.

[30] VUILLEMIN 2016.

[31] LEBRET *et al.* 1993.

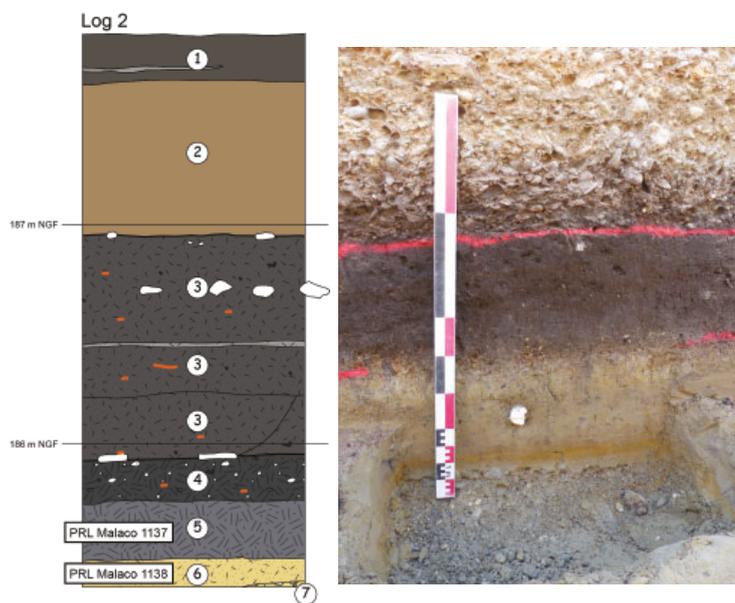
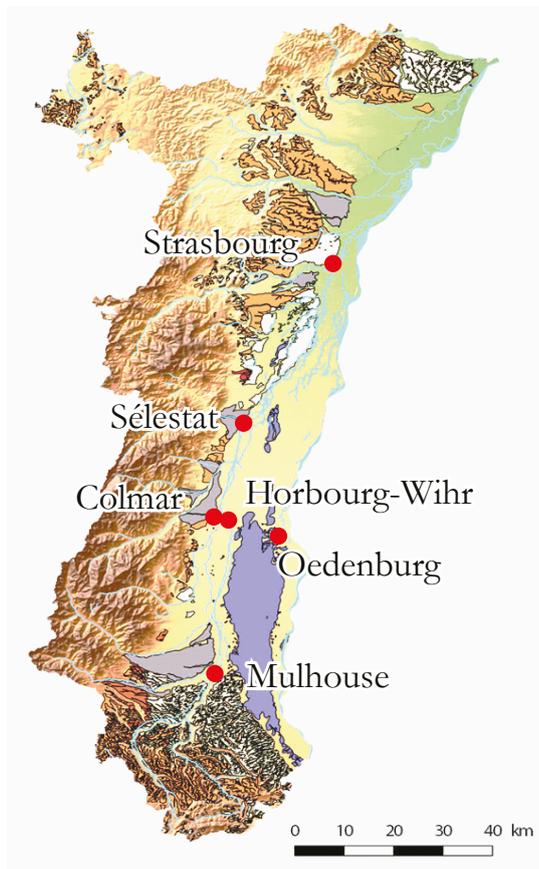


Figure 1 : Localisation des agglomérations alsaciennes citées dans le texte : les zones pléistocènes exondées à l'Holocène sont figurées en jaune (lœss weichsélien), en orange (lœss pléistocènes), en gris (alluvions weichséliennes vosgiennes) et en mauve (alluvions weichséliennes rhénanes). Horbourg-Wihr, log au 50 Grande Rue (Roth-Zehner 2018 ; étude malacologique en cours : Salomé Granai/LGP Meudon et Géoarchéon ; datations OSL : Frank Preusser/ Université de Freiburg) et vue du profil avec le sol hydromorphe sombre sur lequel prend place l'agglomération antique aux 1 et 3 rue des Écoles.

A



cliché JJ.Schwieen

Types de dépôts et évolution	Datations	
Pédogenèse au sommet des alluvions	+700/+1200 AD	Moyen Âge
Limon de débordement	+80 AD	Antiquité
Limon de débordement	+ 480 AD	
Paléochenal de la Bruche, aménagements de l'III	+ 250/+650 AD	
Paléochenal de la Bruche, (ENA, rue Kageneck)	- 1200 BC	Âge du Fer
Paléosol hydromorphe	- 2600/- 2000 BC	Âge du Bronze
Paléochenal sous le fossé des tanneurs	- 2450 BC	
Colluvions loessiques	- 4800 BC	Néolithique
Gravier mélangé	- 6000/- 5000 BC	
Gravier mélangé	- 11000/ -10000 BC	Mésolithique
Loess weichsélien		Quaternaire
Gravier rhénan non daté		
Gravier vosgien non daté		

B

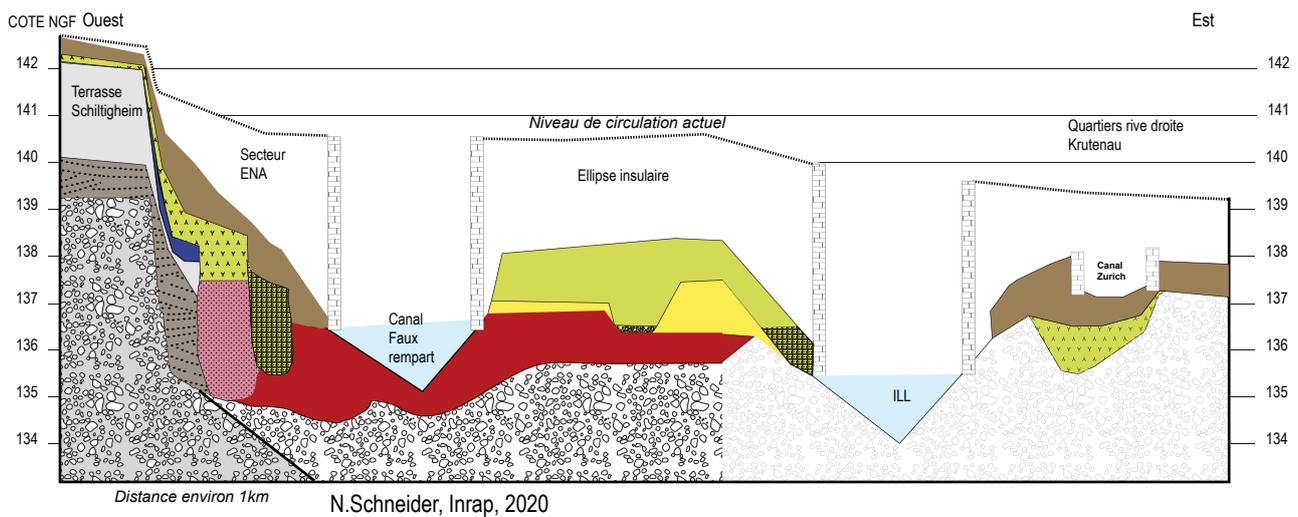


Figure 2

Strasbourg : A : Place de l'Homme de Fer (acquisition de données et DAO J.-J. Schwien, N. Schneider 1991, Tram A) ; B : Chronologie des dépôts alluviaux, synthèse des données 1991-2011, N. Schneider.

d'artificialisation du bassin sédimentaire. Le récolement et la compilation des données (localisations, unités stratigraphiques, types de sédiments, de sols, chronologies, profondeurs, épaisseur, résultats d'analyses, plans anciens, etc.) sont facilités par l'usage de systèmes d'information géographique (SIG) et permettent de proposer des modèles d'organisation et de dynamique. À Aix-en-Provence, une telle compilation a permis de proposer des cartographies dynamiques des épaisseurs de dépôts holocènes, en lien avec les paléo vallons mais aussi les fossés médiévaux [32]. Ainsi a pu être esquissée la topographie au moment de l'installation d'*Aquae Sextiae* (Aix-en-Provence). Ces travaux ont conduit à s'interroger sur la nature même du substrat et, *in fine*, à la découverte de vestiges paléolithiques dans ces formations. Depuis plus de 30 ans, ces récolements sont faits à Strasbourg [33], offrant aujourd'hui une vision dynamique de la constitution du substrat actuel de la ville, qui résulte d'une riche interaction entre les sociétés et l'hydrosystème (fig. 2).

[32] BONNET *et al.* 2018, 2017, 2010.

[33] SCHWIEN *et al.* 1998.

[34] ARLAUD *et al.* 1994; BINI *et al.*, 2018.

[35] BURNOUF & LEVEAU, 2004.

[36] CARCAUD *et al.* 2019.

DES VILLES EN INTERACTION AVEC LES RÉSEAUX HYDROGRAPHIQUES ET LES LITTORAUX

En effet, l'une des thématiques les plus abordées est celle de la relation entre les villes et les hydrosystèmes [34]. Identifier les dynamiques de ces socio-écosystèmes [35], les modalités de leur artificialisation et gestion par les sociétés, pour mieux comprendre ce dont nous héritons aujourd'hui et comment intégrer dans nos politiques la gestion de plusieurs siècles d'interactions complexes et de services éco-systémiques rendus (tab. 1). Ces problématiques d'aménagement, de gestion des risques dépassent le cadre du récit historique, pour s'inscrire dans celle du développement durable de demain [36].

À ce titre, l'acquisition de données dans le cadre d'une archéologie préventive, à Strasbourg depuis 1991, parfois dans des conditions exceptionnelles (fig. 2) a conduit à une compréhension fine des modalités de constitution et d'artificialisation du site, depuis la fin du Pléistocène jusqu'aujourd'hui. Malgré la difficulté inhérente à ce type d'environnement urbanisé depuis des siècles, l'hétérogénéité et la discontinuité des données, il a pu être constaté une rupture des apports alluvionnaires grossiers au Tardiglaciaire, une faiblesse récurrente des volumes enregistrés pour le

Thématiques urbaines	Exemples	Références
Risques fluviaux (crues, mobilité fluviale)	Lyon, Vienne (France)	Bravard <i>et al.</i> 1989
	Tours (France)	Arnaud-Fassetta <i>et al.</i> 2010 Burnouf <i>et al.</i> 2003
	Arles (France)	Alinne, 2007
	Ostie (Italie)	Salomon <i>et al.</i> 2018
	Oedenburg (France)	Ollive <i>et al.</i> 2006
	Londres (Royaume-Uni)	Cohen & Wragg, 2017
Risques littoraux (tempêtes, mobilité littorale)	Dunwich (Royaume-Uni)	Sear <i>et al.</i> 2011
Canaux, chenalisation	Aquileia (Italie)	Arnaud-Fassetta <i>et al.</i> 2010
	Portus (Italie)	Salomon, 2013
	Bruxelles (Belgique)	Devos <i>et al.</i> , 2017c
	Gand (Belgique)	Gelaude, 2019
Bassins portuaires	Marseille (France), Alexandrie (Égypte), Tyr (Liban)	Marriner <i>et al.</i> 2010
	Bruxelles (Belgique)	Timmermans <i>et al.</i> 2020
Franchissements	Avignon (France)	Vella <i>et al.</i> 2013

Tableau 1

Villes et hydrosystèmes : quelques cas d'étude.

début de l'Holocène. Les questions liées aux occupations anciennes restent cependant ouvertes : à partir de l'âge du Bronze le site alluvial de Strasbourg est stabilisé, comme l'indique un premier paléosol observé en plusieurs points de l'ellipse insulaire (4 rue Brûlée, Petite Place du Vieux-Marché-Aux-Vins, ENA), au-dessus duquel seules quelques crues ont été enregistrées. La première occupation du site date de l'époque augustéenne. Cette lacune sédimentaire (alluviale et anthropique) ne trouve pas de réponses dans les observations *intra muros*, mais plutôt dans l'observation des fluctuations du réseau hydrographique dans le fossé rhénan.

DES POLLUTIONS MAL CONNUES ET UN GRADIENT URBAIN-RURAL À MESURER

Le bassin d'accumulation urbain est caractérisé par une pollution très importante des formations pédo-sédimentaires, c'est-à-dire une augmentation significative des teneurs en éléments (métaux lourds, composés organiques) par rapport au fond pédo-géochimique local. La nature de ces pollutions, leur degré, leur extension et modes de diffusion, ainsi que leur origine sont autant de problématiques encore très peu abordées. Si des travaux pionniers et originaux ont été entrepris outre-Manche [37], ils restent isolés en France. Pourtant, la mesure de teneurs de métaux lourds pour des contextes antiques ou du début du Moyen Âge est particulièrement révélatrice : 300 mg/kg dans le port romain à Marseille [38], 1460 mg/kg à Aix-en-Provence [39], 1800 mg/kg dans les terres noires du début du Moyen Âge à Metz [40]. Ces taux dépassent très largement les seuils de tolérance actuels. À Bruxelles, on observe des valeurs qui ne dépassent qu'occasionnellement le fond pédo-géochimique local pour les X^e-XIII^e s., tandis qu'à partir du XIV^e s. des teneurs de métaux lourds deviennent nettement plus élevées [41]. Quant aux éléments constitutifs des composés organiques (carbone, azote, phosphore), des teneurs considérables sont aussi atteintes, avec plus de 20 g/kg de phosphore dans les terres noires du début du Moyen Âge à Beauvais, par exemple [42]. Cet enrichissement, aubaine pour la faune du sol, crée des milieux bioturbés où la lecture des unités stratigraphiques devient alors une gageure, dans les terres noires notamment [43].

[37] DAVIDSON *et al.* 2006 ; GOLDING 2008.

[38] LE ROUX *et al.* 2005.

[39] NIN 2002.

[40] AUGRY & BORDERIE 2014.

[41] DEVOS 2019 ; DEVOS *et al.* 2019.

[42] BORDERIE, 2012.

Ces pollutions, enrichissement et construction de milieux spécifiquement liés à des pratiques urbaines, donnent une nouvelle limite à notre perception de l'urbain. Ce que Davidson *et al.* et Golding [44] ont bien montré, c'est qu'il se dessine une différenciation des formations pédo-sédimentaires urbaines par la diffusion des pollutions, repoussant les limites de la ville au-delà d'une zone où est pratiquée une horticulture urbaine, comme à la périphérie de Paris au XIX^e s. mais aussi dans celle de Metz au Moyen Âge [45]. À Paris, l'analyse des carbonates de spéléothèmes des aqueducs urbains a permis de retracer une histoire de ces pollutions [46]. Les modalités de la diffusion de ces pollutions, atmosphériques ou liées à une redistribution des déchets par les sociétés, demandent encore à être mieux analysées, mais donnent déjà une idée de l'intensité de l'artificialisation des systèmes avant même la première « révolution industrielle ».

DES INTERACTIONS SOCIÉTÉS - MILIEU ARTIFICIEL

LES TRACES PÉDOLOGIQUES DE LA VILLE GAULOISE

Là où les vestiges monumentaux peuvent faire défaut, comme c'est souvent le cas pour les contextes urbains protohistoriques et de la fin de l'âge du Fer, sauf exception [47], investiguer les traces pédologiques des occupations humaines peut être particulièrement intéressant pour renseigner les activités pratiquées, le degré de fréquentation des lieux. À Chartres, la mise en évidence récurrente de couches de « limons verts », entre le substrat argileux et les occupations antiques a conduit à mettre en place une analyse systématique de ces couches, afin de palier l'impossibilité à les interpréter macroscopiquement. Les premiers résultats montrent que ces limons verts résultent de l'occupation de l'espace à la fin l'âge du Fer par l'accumulation de rejets organiques dans les horizons superficiels du sol, bioturbés [48]. La coloration provient de la présence de nombreux cristaux de vivianite, un phosphate de fer qui se rencontre souvent dans les contextes urbains riches en rejets organiques [49]. Les mêmes caractéristiques se retrouvent à Amboise, dans les dépôts antérieurs à l'occupation de l'âge du Fer de

[43] CAMMAS, 2004 ; MACPHAIL, 1994.

[44] DAVIDSON *et al.* 2006 GOLDING 2008.

[45] NICOSIA, 2018.

[46] PONS-BRANCHU *et al.*, 2017.

[47] MONIN, 2005 ; THION *et al.*, 2003.

[48] BORDERIE, 2016A ; COUSSOT, 2008.

[49] BORDERIE, 2011B ; MACPHAIL, 1983.

l'*oppidum*, ou dans les niveaux laténiens de l'*oppidum* d'Alésia (observations C. Petit) qui sont pareillement contaminés au phosphore, mais aussi très riches en micro-déchets produits par l'artisanat (agrégats de silice fondue, scories) (fig. 3).

ARTISANAT, COMMERCE, ACTIVITÉS ET ESPACES

L'artisanat, au même titre que les activités commerciales, donne sens à certaines définitions de l'urbain et en font sa spécificité [50]. Les types d'activités pratiquées en ville, selon les espaces et les pollutions qu'elles génèrent permettent de préciser la connaissance topographique de l'urbain, à l'instar de la gestion des déchets et des structures archéologiques témoins de ces activités. Les travaux récents conduits à Hedeby (Allemagne) ont pu montrer que le travail des métaux précieux (argent) pouvait être pratiqué dans les espaces domestiques, grâce à l'analyse microXRF sur les lames minces de micromorphologie des sédiments des phases précoces de cette place centrale des VIII^e-XI^e s. [51]. Pour la période gallo-romaine, des cartographies de concentration en métaux lourds faites dans l'*insula* IX de Silchester (Royaume-Uni), ont pu être confrontées avec les résultats de l'analyse micromorphologique des sols intérieurs successifs et ainsi, comprendre la complexité de l'organisation des espaces, la localisation des zones de circulation, les modalités de construction de ces sols. Les pollutions au cuivre et au plomb, attribuables à une activité

métallurgique, se trouvent dans les espaces domestiques et sont associées à des phases très riches en phosphore et en excréments d'herbivores, interprétables comme des espaces d'écuries [52]. Ces résultats particulièrement précis sont un cas encore isolé de l'application de la micromorphologie aux stratifications de la période romaine.

Les espaces de commerces médiévaux peuvent être difficiles à cerner dans leur matérialité [53]. Si les zones de stockage de denrées peuvent être identifiables à la concentration de certaines structures (comme les silos, tels ceux découverts à Blois [54] pour les VIII^e-XI^e s.), les espaces d'échanges sont plus difficiles à percevoir. Une approche micromorphologique conduite lors de la fouille des stratifications antérieures au pavement de la place du Grand-Marché-de-Lierre (Belgique) a montré comment s'est opéré, aux XI^e et XII^e s., le passage d'un espace cultivé à un espace de commerce qui, jusqu'au XIV^e s., recueille les rejets très diversifiés d'un espace occasionnellement très fréquenté [55]. La nature des activités pratiquées dans les espaces urbains peut aussi être

[50] WEBER, 1921 ; WICKHAM, 2005.

[51] WOUTERS 2016.

[52] BANERJEA 2011 ; COOK *et al.* 2010 ; 2014.

[53] BLIECK & GUIFFRAY 1994.

[54] AUBOURG & JOSSET 2000.

[55] WOUTERS *et al.* 2017.

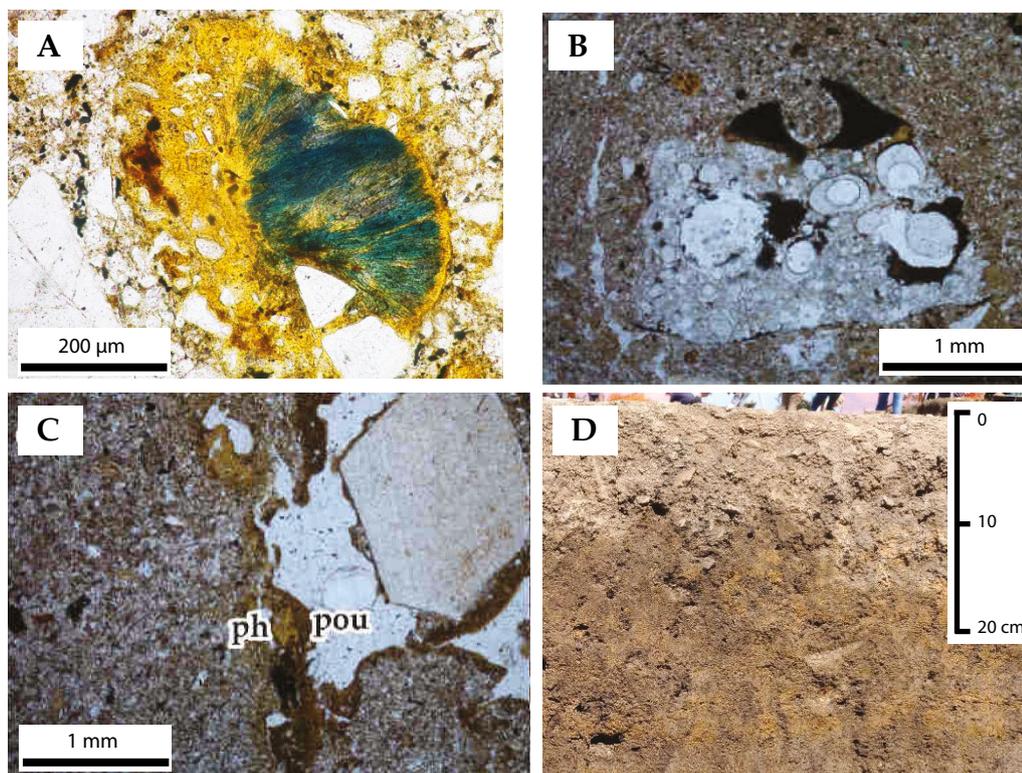


Figure 3
Oppida de Chartres et d'Amboise : pollution des couches archéologiques contemporaines ou antérieures à l'occupation de l'âge du Fer (d'après Borderie 2016a).

déduite par la découverte de micro-constituants dans des contextes de réutilisation. C'est le cas des glumes de graminée, issues du traitement des céréales, utilisées comme litières végétales sur les sols d'intérieurs du ^xe s., découverts à Gien (France) dans des bâtiments à vocation domestique [56], ou encore par la présence de très nombreuses déjections d'herbivores, riches en phytolithes, trouvées à Saint-Denis dans un contexte de zone humide en périphérie immédiate de l'agglomération du ^{ix}e s. [57].

Ces différents cas de figure montrent comment l'application d'une méthodologie couplant la micromorphologie, la géochimie, les données archéobotaniques, ouvre des perspectives intéressantes quant à l'interprétation de l'usage fait des espaces, leur qualification de « sale » ou « propre » et la pluralité des fonctions présentes.

LA PÉDO-SÉDIMENTATION POST-ANTIQUE ET LES TERRES NOIRES

Une des premières thématiques abordée par la géoarchéologie des contextes urbains, dès le début des années 1980, fut l'étude des terres noires [58]. Ces épaisses couches sombres, d'apparence homogène (fig. 4), mais qui peuvent contenir un abondant mobilier et des structures archéologiques plus diffuses, se retrouvent en effet de manière systématique dans les centres urbains anciens d'Europe. Leur interprétation a posé pendant longtemps des difficultés méthodologiques et elles ont trop souvent été enlevées à la

[56] BORDERIE *et al.* 2018.

[57] WYSS 2018.

[58] MACPHAIL 1981.

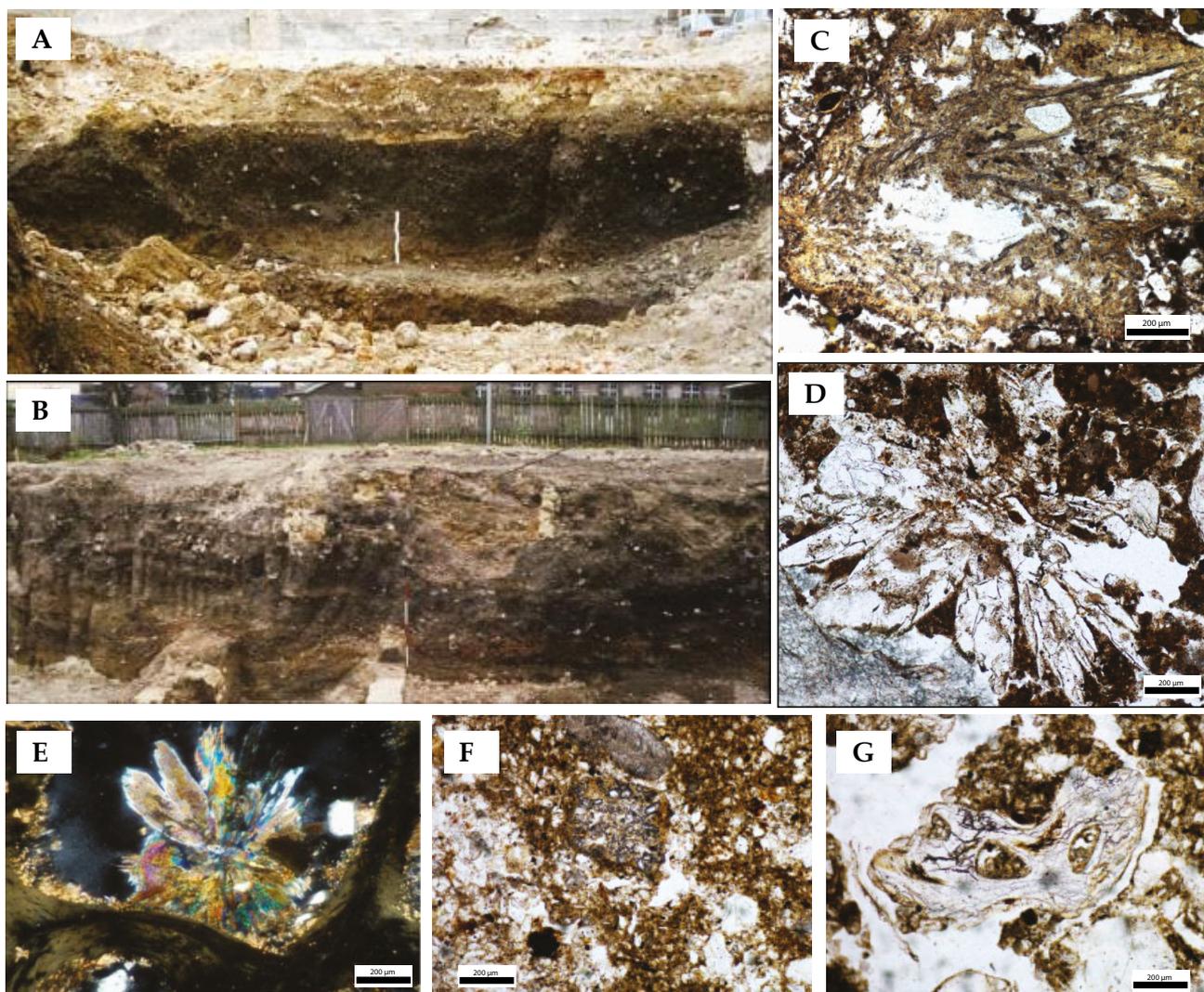


Figure 4

Terres noires. **A** : Évreux (cliché B. Guillot, Inrap), **B** : Noyon (cliché M. Talon) ; Microphotos (C – G) ; **C** : Excrément de grand herbivore, Noyon (LPnA) ; **D** : Cristal de gypse, Metz (LPnA) ; **E** : Vivianite dans un os, Noyon (LPA) ; **F** : Agrégat de silice fondue, Bayeux (LPnA) ; **G** : Fragment d'os chauffé, Bayeux (LPnA). (D'après Borderie *et al.*, 2012 ; Devos *et al.*, 2011 ; Nicosia, 2018).

pelleteuse, interprétées *a priori* comme synonymes de l'abandon des villes [59]. Pourtant, les terres noires constituent l'essentiel des archives de l'histoire de ces villes [60], et leur étude est reconnue aujourd'hui comme prioritaire. Depuis maintenant une trentaine d'années, l'association de fouilles fines à une approche combinant géochimie et micromorphologie, a montré la richesse des informations collectées [61]. Les occupations domestiques de la ville sont renseignées notamment par la richesse en micro-constituants liés aux activités culinaires, les occupations artisanales sont informées par la présence de matériaux chauffés à haute température (silice fondue, verre), la fréquentation est observable par le tassement des dépôts et la présence d'agrégats écrasés, roulés. Enfin, des

horizons de surface très bien conservés peuvent être mis en évidence, par la présence de croûtes ou de phytolithes en connexion disposés sub-horizontalement. Ces activités prennent place sur un sol vivant, bioturbé à mesure de l'accrétion. Les terres noires sont des cumulosols anthropiques, qui recueillent les rejets d'activités urbaines très diversifiées et en aucun cas ne résultent d'un abandon, mais d'un usage multiple des espaces [62].

MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

Plus récemment, dans le prolongement des découvertes faites lors de l'étude des terres noires pour les contextes du début du Moyen Âge, les interrogations géoarchéologiques se sont portées sur les matériaux de construction. Si, au travers d'une archéologie du bâti surtout antique ou de la fin du Moyen Âge, la pierre, les mortiers et le bois sont des sujets d'étude récurrents, les matériaux en terre et en végétaux plus fins sont quasiment invisibles. Pourtant, l'analyse micromorphologique des sols d'intérieurs de bâtiments du premier Moyen Âge montre que, en France comme dans une grande part de l'Europe du

[59] GALINIÉ 2004.

[60] CNRA 2002.

[61] BORDERIE *et al.* 2014 ; CAMMAS 2004 ; DEVOS *et al.* 2011 ; MACPHAIL 1981 ; 1994 ; NICOSIA 2018 ; NICOSIA *et al.* 2017.

[62] BORDERIE 2016b ; BORDERIE *et al.* 2012 ; NICOSIA *et al.* 2017.

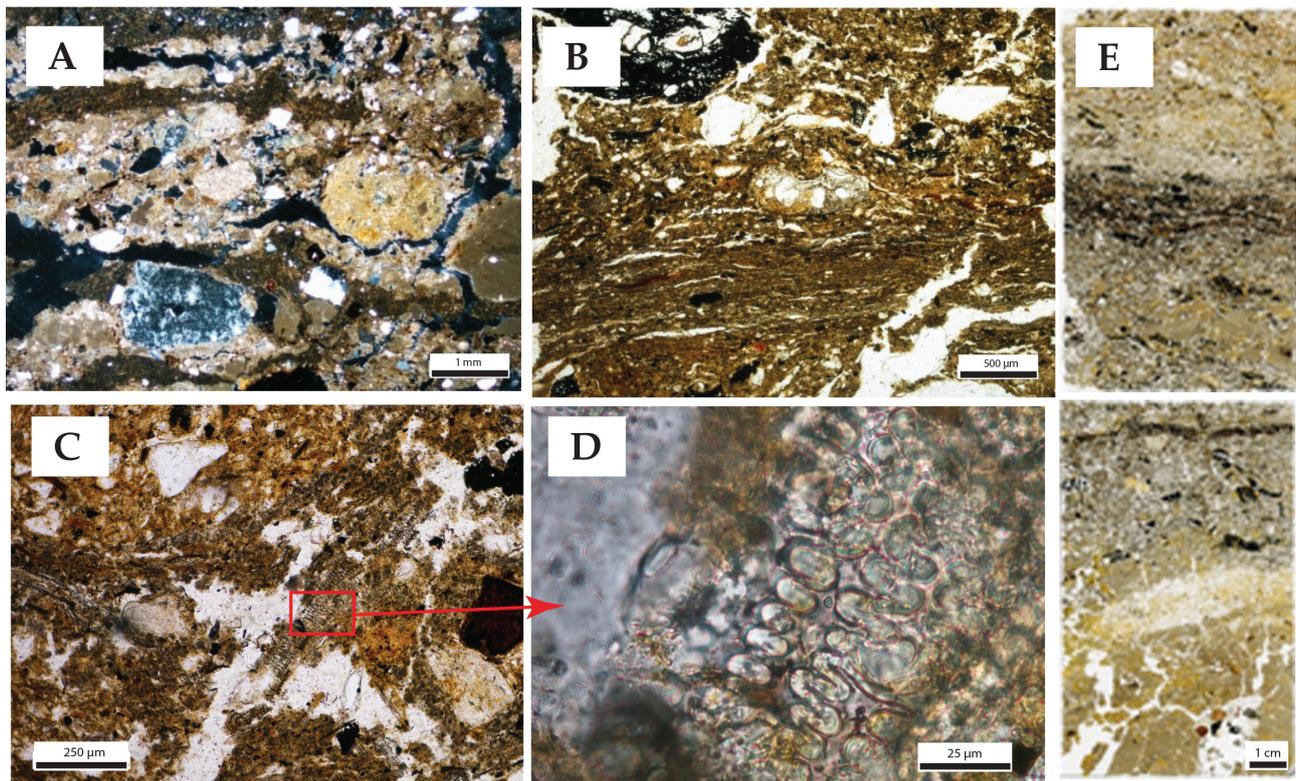


Figure 5

Sols d'intérieur de bâtiments. Microphotographies (A-D) : **A** : Alternance de sols argileux carbonatés et de couches de déchets (LPnA, Saint-Denis, France, XII^e s.) ; **B** : Sol végétal en graminées, surmontés par une couche de déchets contenant des cendres, de la silice fondue et des charbons fins (LPnA, Gien, France, X^e s.) ; **C** : Sol végétal en graminées (LPnA, Gien, France, X^e s.) ; **D** : (zoom de C) phytolithe de céréale, probablement *Triticum durum* (LPnA, Gien, France, X^e s.) ; **E** : Scan de lames minces d'accumulations d'intérieur de maison (Ribe, Danemark, VIII^e s.) (d'après Borderie *et al.*, 2018 ; Croix *et al.*, 2019 ; Wouters, 2016).

Nord-Ouest, les architectures mobilisent des quantités considérables de limons, de sables et d'argile, de végétaux (**fig. 5**). Le cas de Gien et des jonchées de glumes de graminée a déjà été évoqué plus haut, ceux de Saint-Denis et de Noyon (France) sont tout aussi évocateurs. Pour ce dernier cas, la conservation en milieu humide de stratifications d'intérieur, mais aussi extérieures aux bâtiments, montre comment les végétaux constituent la majorité des accumulations dans les espaces occupés, où la réfection des surfaces est régulièrement alimentée par le dépôt de fines couches de limons ou de sables argileux [63]. À Ribe (Danemark), la fouille d'une parcelle des VIII^e-IX^e s. en 2018 a été couplée à une campagne systématique de prélèvements micromorphologiques. Il a pu être montré, ici aussi, la part importante des végétaux dans la constitution des stratifications internes aux bâtiments, par la construction des sols en végétaux (herbes, chaumes), recouverts de cendres et régulièrement rechapés d'argile [64]. La remobilisation de ces couches par des processus de bioturbation [65] ou de réaménagement des espaces [66] peut contribuer alors à la fabrication des terres noires. Les couches de préparation des sols d'occupation, régulièrement composées de limons tassés, en sont un autre exemple. Ces couches ont notamment été observées en Belgique, à Tongres [67], Bruxelles [68] et Ypres [69].

PATRIMOINE ET CONSERVATION DES ARCHIVES

PÉDOGENÈSE ET PROCESSUS POST-ABANDON

L'approche géoarchéologique, par définition, s'attache à comprendre les processus de formation des sites archéologiques [70], donc à l'évolution des pédo-stratifications. Les processus de recouvrement et d'érosion, le changement dans les activités et la fréquentation des lieux sont des problématiques régulièrement abordées, tout autant que le type de pédogenèse qui se met en place, puisque tous ont un impact sur la conservation des stratifications urbaines et l'interprétation qu'il est possible d'en faire. Dans le cas des agglomérations

dites « abandonnées » de Silchester (Royaume-Uni) ou Gabies (Italie), le passage d'un usage du sol de type urbain à un usage agricole a été analysé. Dans le premier cas [71], pour l'*insula* III, il a été montré que les activités se limitaient progressivement à des actions de rejets de déchets culinaires, de fumier, puis de matériaux de construction altérés et dégradés, avant que ne se mette en place une pédogenèse, caractérisée par la structuration du sol en horizons différenciés. La préservation des espaces intérieurs et extérieurs de l'agglomération antique a donc été rendue possible par la rapidité des enfouissements. À Gabies [72], au contraire, les enfouissements sont très progressifs, du fait de la topographie du site, sur un versant. Les stratifications urbaines ont donc été recouvertes par des apports de colluvions issus de l'érosion de contextes urbains situés plus haut sur le versant. Un andosol s'est ensuite structuré, dont les agrégats pédologiques sont constitués pour une grande partie de dépôts archéologiques, siège d'une mise en culture dans sa partie supérieure. Dans les deux cas, les sols qui se structurent ont des matériaux parentaux d'origine anthropique, artificiels.

CONSERVATION DE L'ENREGISTREMENT ARCHÉOLOGIQUE

La densité des stratifications urbaines, et leur diversité, par l'analyse de multiples configurations d'enregistrements archéologiques permettent, pas à pas, de mieux comprendre les différentes modalités possibles quant à leur préservation. Ces paramètres sont un enjeu majeur pour la conservation patrimoniale, où les aménagements de sites peuvent modifier les conditions de milieux et, par là même, la qualité de l'enregistrement. Les recherches sur les terres noires ont été, à ce titre, particulièrement bénéfiques. Elles ont pu montrer comment les traces ténues d'occupations structurées de manière latente peuvent être perçues [73], mais aussi comment la bioturbation pouvait intervenir dans un environnement urbanisé et densément occupé, du fait de la nature même des productions sédimentaires anthropiques, riches en matières organiques [74]. Les indices indirects prennent alors tout leur sens lorsque la structuration macroscopique est peu lisible, telles ces pollutions organiques, aux métaux lourds, tels

[63] BORDERIE 2014.

[64] CROIX *et al.* 2019.

[65] BORDERIE 2014.

[66] BORDERIE *et al.* 2018.

[67] WOUTERS *et al.* 2019.

[68] DEVOS 2019.

[69] WOUTERS *et al.* 2018.

[70] SCHIFFER 1987.

[71] BANERJEA 2011.

[72] BORDERIE 2015.

[73] GÉBUS & GAMA 2004.

[74] BORDERIE 2014 ; CAMMAS 2004 ; MACPHAIL 1994.

ces petits agrégats de sols d'intérieur de bâtiments, remobilisés, mais qui témoignent bien de la présence d'espaces bâtis [75].

Si le cadre urbain général de la conservation des stratifications, selon la nature des milieux, avait été théorisé dès les années 1980 [76], les documents d'évaluation du patrimoine archéologique des villes de France (Depavf) avaient rendu pratique l'utilisation de cette information, notamment dans les volumes consacrés à Soissons [77], où la profondeur estimée des destructions était figurée, et à Douai [78], où la possibilité d'une conservation de vestiges organiques était cartographiée. Quant aux risques fluviaux et littoraux en termes de conservation des vestiges, ce sont des paramètres non négligeables qui sont traités par la géoarchéologie [79].

CONCLUSION

DES APPROCHES GÉOARCHÉOLOGIQUES

Depuis son émergence dans les années 1980, la géoarchéologie des contextes urbains a donc connu une évolution des approches, de son objet d'étude et de sa pratique. De la géomorphologie et stratigraphie pratiquées dans la ville, l'on est passé progressivement à une géomorphologie anthropique de la ville, une « archéo-morphologie ». Cette discipline définit aujourd'hui pleinement ce qu'est la géoarchéologie des contextes urbains en considérant les espaces urbains comme des bassins de sédimentation anthropique autant que comme des artefacts, dont l'étude est nécessairement celle d'une co-construction société-milieu, pour la plus grande part artificiels. Depuis les années 1980, l'archéologie de sauvetage, puis l'archéologie préventive ont eu un rôle fondamental dans la mise en place de ces approches, lors des premières collaborations entre géographes, géologues et archéologues, dans la mise en pratique des méthodes, des transferts méthodologiques, jusqu'à la définition de problématiques interdisciplinaires, puis plus radicalement géoarchéologiques. Parmi les méthodes mobilisées, la micromorphologie a eu un rôle central et occupe désormais une place pivot dans l'analyse des stratifications et des sols urbains, au même titre que les approches spatiales et l'usage des SIG. Aujourd'hui, un des enjeux majeurs reste la permanence et la systématisation d'un suivi scientifique des sites urbains, par la présence d'une équipe locale [80].

Les cas de Lyon, mais aussi de Bruxelles sont à ce titre exemplaires et montrent tout le bénéfice gagné par le cumul et la mise en perspective de travaux conduits sur le long terme, de manière systématique [81]. Ce sont ces équipes qui peuvent, en outre, valoriser cette plus-value, scientifiquement, mais aussi auprès des concitoyens, des élus, des aménageurs, dans une relation vivante au sein de la cité.

DE L'ÉTUDE DES SOCIO-ÉCOSYSTÈMES URBAINS ANCIENS À LA COMPRÉHENSION DES GÉO-SYSTÈMES À L'ANTHROPOCÈNE

L'étude des contextes urbains nécessite donc d'aborder l'objet d'étude dans toute sa complexité, comme une co-construction des sociétés et d'un milieu le plus souvent artificiel. L'approche géoarchéologique de cet objet hybride s'affranchit de la notion de « remblais anthropiques » proposée à défaut par les cartes géologiques. Elle dépasse la notion de « matrix » avancée par A. Rosen [82] ou encore celle de « terres noires » [83], elle permet d'identifier et d'interpréter les dynamiques des socio-écosystèmes urbains qu'elle recouvre, d'aborder la diversité des activités humaines au-delà d'une vision fonctionnelle discontinue. Cette dynamique est celle de la gestion des flux de liquides et de solides, de déchets et de matériaux, la création d'anthropo-reliefs et d'anthropo-sols [84].

En définitive, la géoarchéologie des contextes urbains nous renseigne aujourd'hui autant sur les manières d'habiter un espace que sur le rapport au sol et au déchet que cela sous-tend : la gestion des espaces et des ressources, la gestion des risques et des héritages. Autant de problématiques qui, dans notre Anthropocène actuel hyper artificialisé pourraient fournir les clés d'une co-construction sur le temps long de ce qui fait l'urbain. ■

[75] BORDERIE *et al.* 2018 ; DEVOS *et al.* 2019.

[76] CARVER 1987.

[77] ROUSSELLE 2002.

[78] DEMOLON *et al.* 1990.

[79] CANUTI *et al.* 2000.

[80] BORDERIE *et al.* 2018.

[81] DEVOS *et al.* 2019 ; FRANC 2016.

[82] ROSEN 1986.

[83] FONDRILLON 2009.

[84] DESACHY 2008.

REMERCIEMENTS :

Nous tenons à remercier les deux relecteurs anonymes pour leurs remarques très constructives, ainsi que Stéphane Gaillot, Michaël Wyss, Nicole Rodrigues, Hélène Noizet, Alexandra Legrand-Pineau, Mélinda Bizri, Richard Jonvel, Brigitte Boissavit-Camus, Amélie Laurent, Hélène Dulauroy, Marie-Christine Lacroix, Bruno Desachy, Hélène Dulauroy-Lynch, Jean-Marc Fémolant, Sébastien Lefèbvre, Anne Gebhardt, Alain Queffelec, Pauline Dugas.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLINNE, Cécile, 2007**, « Les villes romaines face aux inondations. La place des données archéologiques dans l'étude des risques fluviaux », *Géomorphologie: relief, processus, environnement* 13, p. 67-84.
- ARLAUD, Catherine, BURNOUF, Joëlle, BRAVARD, Jean-Paul, LUROL, Jean-Marc & VÉROT-BOURRELY, Agnès, 1994**, *Lyon Saint-Jean : les fouilles de l'îlot Tramassac*. Service régional de l'archéologie, Lyon (Documents d'archéologie en Rhône-Alpes, 4. Série Lyonnaise 10).
- ARNAUD-FASSETTA, Gilles, CARCAUD, Nathalie, CASTANET, Cyril & SALVADOR, Pierre-Gilles, 2010**, « Fluviale palaeoenvironments in archaeological context: Geographical position, methodological approach and global change – Hydrological risk issues », *Quaternary International* 216/1-2, p. 93-117, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.03.009>
- AUBOURG, Viviane & JOSSET, Didier, 2000**, « Le site du promontoire du château de Blois du VIII^e au XI^e s. (Loir-et-Cher). (Première partie : niveaux et structures) », *Revue Archéologique du Centre de la France* 39, p. 161-197.
- AUGRY, Stéphane & BORDERIE, Quentin, 2014**, « Le jardin du cloître des carmélites de Metz (XVII^e-XVIII^e siècles). Étude archéologique de l'aménagement d'un jardin en contexte urbain », *Archéopages* 37, p. 28-31. <https://doi.org/10.4000/archeopages.342>
- BAIZE, Denis & GIRARD, Michel-Claude, 2009**, *Référentiel pédologique 2008*, Association Française pour l'Étude du Sol (Afes), Paris.
- BANERJEA, Rowena Y., 2011**, « Microscopic perspectives on the use of Period 3 MTRB 1/ERTB 1 », dans Michael Fulford & Amanda Clarke, (éd.), *Silchester: City in Transition. The Mid-Roman Occupation of Insula IX c. A.D. 125-250/300. A Report on Excavations Undertaken since 1997*, London (Britannia Monograph Series), p. 63-95.
- BARLES, Sabine, BREYSSE, Denys, GUILLERME, André & LEYVAL, Corinne, 1999**, *Le sol urbain*, Paris.
- BEAU, Rémi & LARRÈRE, Catherine, 2018**, *Penser l'Anthropocène*, Paris.
- BINI, Monica, FABIANI, Fabio, PAPPALARDO, Marta & SCHULDENREIN, Joseph, 2018**, « Special issue of Geoarchaeology: Urban geoarchaeology in the Mediterranean Basin », *Geoarchaeology: an International Journal* 33, p. 3-12, <https://doi.org/10.1002/gea.21674>
- BLIECK, Gilles & GUIFFRAY, Alain, 1994**. « Genèse et évolution d'une place publique. L'exemple de Lille », dans Pierre Demolon, Henri Galinié & Frans Verhaeghe (éd.), *Archéologie des villes dans le Nord-Ouest de l'Europe (VII^e-XIII^e siècle)*. Actes du IV^e Congrès International d'Archéologie Médiévale (Douai, 1991), Douai, p. 207-224.
- BONNET, Stéphane, JORDA, Christophe & NIN, Nuria, 2010**, « Nouvelles données sur la paléogéographie et le peuplement à Aix-en-Provence (Bouches-du-Rhône) : premiers résultats des approches géomorphologiques et géoarchéologiques », *Quaternaire* 21, p. 485-496.
- BONNET, Stéphane, MAGNIN, Frédéric, NIN, Nuria & DUTOUR, Yves, 2017**, *Archéologie environnementale de la vallée de l'Arc de l'âge du Fer à l'Antiquité tardive. Rapport d'activité de la première année du PCR*, Direction archéologie et muséum de la ville d'Aix-en-Provence, Aix-en-Provence.
- BONNET, Stéphane, PANNEAU, Marc & GIROUX, Hugues, 2018**, « La modélisation au service de l'évaluation et de la caractérisation du sol urbain d'Aix-en-Provence », *Les Nouvelles de l'Archéologie* 153, p. 45-51, <https://doi.org/10.4000/nda.4865>
- BORDERIE, Quentin, 2011a**, « Géoarchéologie de l'urbain, retour sur la journée d'étude du 29 octobre 2009 », *Les Nouvelles de l'Archéologie* 123, p. 61-64, <https://doi.org/10.4000/nda.1487>
- BORDERIE, Quentin, 2011b**, *L'espace urbain entre Antiquité et Moyen Âge, géoarchéologie des terres noires : études de cas*, Thèse de doctorat, Archéologie et Environnement, Université de Paris 1 - Panthéon Sorbonne.
- BORDERIE, Quentin, 2012**, « Some quantitative aspect of thin section analysis for the archaeological research », dans Rosa M. Poch, Maria Casamitjana & Michele L. Francis (éd.), *Proceedings the 14th International Working Meeting on Soil Micromorphology, Lleida 8-14 July 2012*, Lleida.
- BORDERIE, Quentin, 2014**, « De la matrice sédimentaire aux pratiques socio-spatiales : deux stratifications de terres noires à Noyon (Oise) », dans Jeanne Brancier, Caroline Trémeaud & Thibault Valette (éd.), *Des vestiges aux sociétés, regards croisés sur le passage des données archéologiques à la société sous-jacente*, Paris, p. 61-64.
- BORDERIE, Quentin, 2015**, *Gabies, expertise géoarchéologique, campagne 2014*, Rapport non publié, Louvre, Paris.

- BORDERIE, Quentin, 2016a**, *Chartres, Hôtel Montescot, étude géoarchéologique, stratigraphie et micromorphologie*, Rapport non publié, Service Archéologique de la ville de Chartres, Chartres.
- BORDERIE, Quentin, 2016b**, « Percevoir la complexité urbaine par l'étude de ses franges, les terres noires des IV^e-XI^e siècles à Metz, Beauvais et Noyon », dans Claire Besson, Olivier Blin & Bertrand Triboulot (éd.), *Franges urbaines et confins territoriaux : la Gaule dans l'Empire*, Bordeaux, p. 277-289.
- BORDERIE, Quentin, DEVOS, Yannick, NICOSIA, Cristiano, CAMMAS, Cécilia & MACPHAIL, Richard I., 2014**, « Dark Earth in the geoarchaeological approach of urban contexts », dans Gilles Arnaud-Fassetta & Nathalie Carcaud (éd.), *French Geoarchaeology in the 21th century*, Paris, p. 245-255.
- BORDERIE, Quentin, FONDRILLON, Mélanie, NICOSIA, Cristiano, DEVOS, Yannick & MACPHAIL, Richard I., 2014**, « Bilan et nouveaux éclairages sur les terres noires : des processus complexes de stratification aux modalités d'occupation des espaces urbains », dans Xavier Rodier & Elisabeth Lorans (éd.), *Actes du 137e Congrès des Sociétés Historiques et Scientifiques, Université François Rabelais, Tours, 23-28 Avril 2012*, Paris, p. 235-250.
- BORDERIE, Quentin, BALL, Terry B., BANERJEA, Y.R., BIZRI, M., LEJAL, C., SAVE, S. & VAUGHAN-WILLIAMS, A., 2018**, « Early Middle Ages houses of Gien (France) from the inside: geoarchaeology and archaeobotany of 9th-11th c. floors », *Environmental Archaeology*, p. 1-19, <https://doi.org/10.1080/14614103.2018.1534716>
- BORDERIE, Quentin, BONNET, Stéphane, BOS, Teddy, GAILLOT, Stéphane, LECANTE, Pauline, LEROY, Eric, MEURISSE-FORT, Murielle, TRONCHÈRE, Hervé, GERMAIN-VALLÉE, Cécile & WUSCHER, Patrice, 2018**, « Le paysage géo-archéologique de collectivité : milieu aride ou terre de culture ? », *Les Nouvelles de l'Archéologie* 153, p. 29-38, <https://doi.org/10.4000/nda.4749>
- BRAVARD, Jean-Paul, VÉROT, Agnès, BURNOUF, Joëlle, AMOROS, Claude & JACQUET, C., 1988**, « Les fossés urbains en eau : proposition d'une analyse des conditions hydrodynamiques par une méthode morpho-écologique », dans *Fouille, enregistrement et analyse des fossés et de leur comblement en milieu urbain, Actes de la Table Ronde organisée au Centre National d'Archéologie Urbaine à Tours les 23 et 24 avril 1988*, Tours, p. 22-32.
- BRAVARD, Jean-Paul, BURNOUF, Joëlle & VÉROT, Agnès, 1989**, « Géomorphologie et archéologie dans la région lyonnaise : questions et réponses d'un dialogue interdisciplinaire », *Bulletin de la Société Préhistorique Française* 86, p. 429-440.
- BURNOUF, Joëlle, CARCAUD, Nathalie, CUBIZOLLE, Hervé, GARCIN, Manuel, TRÉMENT, Frédéric & VISET, Lionel, 2003**, « Interactions sociétés/milieus dans le bassin versant de la Loire depuis le Tardiglaciaire jusqu'à la période industrielle », dans Tatiana Muxart, Franck-Dominique Vivien, Bruno Villalba & Joëlle Burnouf, (éd.), *Des milieux et des hommes : fragments d'histoires croisées*, Paris, p. 65-77.
- BURNOUF, Joëlle & LEVEAU, Philippe, 2004**, *Fleuves et marais, une histoire au croisement de la nature et de la culture, Sociétés préindustrielles et milieux fluviaux, lacustres et palustres : pratiques sociales et hydrosystèmes*, Paris.
- BUTZER, Karl W., 1982**, *Archaeology as human ecology*, Cambridge.
- BUTZER, Karl W., MIRALLES, Ismael & MATEU, Juan F., 1983**, « Urban geo-archaeology in medieval Alzira (Prov. Valencia, Spain) », *Journal of Archaeological Science* 10, p. 333-349, [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(83\)90071-7](https://doi.org/10.1016/0305-4403(83)90071-7)
- CAMMAS, Cécilia, 1994**, « Approche micromorphologique de la stratigraphie urbaine à Lattes : premiers résultats. », *Lattara* 7, p. 181-202.
- CAMMAS, Cécilia, 1999**, « Dynamique pédo-sédimentaire urbaine : modes de construction et d'occupation à Lattes au IV^e s. av. n. è. », *Lattara* 12, p. 211-227.
- CAMMAS, Cécilia, 2003**, « Microstratigraphie de la place 123, activités et rythmes de sédimentation au IV^e s. », *Lattara* 16, p. 67-86.
- CAMMAS, Cécilia, 2004**, « Les « terres noires » urbaines du Nord de la France : première typologie pédo-sédimentaire », dans Laurent Verslype & Raymond Brulet (éd.), *Dark Earth – Terres Noires, Actes de la table ronde de Louvain-La-Neuve, Louvain-la-Neuve*, p. 43-55.
- CANUTI, Paolo, CASAGLI, Nicola, CATANI, Filippo & FANTI, Riccardo, 2000**, « Hydrogeological hazard and risk in archaeological sites: some case studies in Italy », *Journal of Cultural Heritage* 1, p. 117-125.
- CARCAUD, Nathalie, ARNAUD-FASSETTA, Gilles & EVAÏN, Caroline, 2019**, *Villes et rivières de France*, Paris.
- CARVER, Martin O. H., 1987**, « The nature of urban deposits », dans John Schofield & Roger Leech (éd.), *Urban Archaeology in Britain* (CBA Research report 61), London, p. 9-26.
- CHEVERRY, Claude & GASCUEL, Chantal, 2009**, *Sous les pavés la terre*, Montreuil.
- CNRA, 2002**, « La recherche archéologique en France. Bilan 1995-1999 du Conseil national de la recherche archéologique », *Les nouvelles de l'archéologie* 88.
- COHEN, Nathalie & WRAGG, Elliott, 2017**, « *The River's Tale* »: *Archaeology on the Thames Foreshore in Greater London*, London.
- COOK, Samantha R., BANERJEA, Rowena Y., MARSHALL, L.-J., FULFORD, M., CLARKE, A. & VAN ZWIETEN, C., 2010**, « Concentration of copper, zinc and lead as indicator of hearth usage at the Roman town of Calleva Atrebatum (Silchester, Hampshire, UK) ». *Journal of Archaeological Science* 37, p. 871-879, <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.11.017>
- COOK, Samantha R., CLARKE, Amanda, FULFORD, Michael & VOSS, Jochen, 2014**, « Characterising the use of urban space: a geochemical case study from Calleva Atrebatum (Silchester, Hampshire, UK) Insula IX during the late first/early second century AD », *Journal of Archaeological Science* 50, p. 108-116, <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.07.003>
- COUSSOT, Céline, 2008**, *Étude géoarchéologique du site C219*, Rapport non publié, Service Archéologique de la ville de Chartres.
- CROIX, Sarah, DECKERS, Pieterjan, FEVEÏLE, Claus, KNUDSEN, M., SKYTTE QUISTGAARD, S., SINDBÆK, S.M. & WOUTERS, Barbora, 2019**, « Single Context, Metacontext, and High Definition Archaeology: Integrating New Standards of Stratigraphic Excavation and Recording », *Journal of Archaeological Method and Theory* 26, p. 1-42, <https://doi.org/10.1007/s10816-019-09417-x>

- DAVIDSON, Donald A., 1973**, « Particle size and phosphate analysis: evidence for the evolution of a tell », *Archaeometry* 15, p. 143-152.
- DAVIDSON, Donald A., 1976**, « Processes of tell formation and erosion », dans Donald A. Davidson & Myra L. Shackley (éd.), *Geoarchaeology: Earth Science and the Past*, London, p. 255-266.
- DAVIDSON, Donald A., DERCON, Gerd, STEWART, Mairi & WATSON, Fiona, 2006**, « The legacy of past urban waste disposal on local soils », *Journal of Archaeological Science* 33, p. 778-783, <https://doi.org/10.1016/j.jas.2005.10.017>
- DEMOLON, Pierre, LOUIS, Etienne & LOUIS-VAUBANCE, Murielle, 1990**, *Document d'évaluation du patrimoine archéologique des villes de France : Douai*, Tours.
- DESACHY, Bruno, 2008**, *De la formalisation du traitement des données stratigraphiques en archéologie de terrain*, Thèse de doctorat, Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- DESCOLA, Philippe, 2005**, *Par-delà nature et culture*, Paris.
- DEVOS, Yannick, 2019**, *Dark Earth in Brussels (Belgium). A geoarchaeological study*, Thèse de doctorat, Vrije Universiteit Brussel.
- DEVOS, Yannick, VRYDAGHS, Luc, DEGRAEVE, Ann & MODRIE, Sylvianne, 2011**, « Unravelling urban stratigraphy. The study of Brussels' (Belgium) Dark Earth. An archaeopedological perspective », *Medieval and Modern Matters* 2, p. 51-76, <https://doi.org/10.1484/J.MMM.1.102776>
- DEVOS, Yannick, NICOSIA, Cristiano, VRYDAGHS, Luc, SPELEERS, L., VAN DER VALK, J., MARINOVA, Elena, CLAES, Britt., ALBERT, Rosa Maria, ESTEBAN, Irene, BALL, Terry B., COURT-PICON, Mona & DEGRAEVE, Ann, 2017a**, « An integrated study of Dark Earth from the alluvial valley of the Senne river (Brussels, Belgium) », *Quaternary International* 460, p. 175-197, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.06.025>
- DEVOS, Yannick, VAN NEER, Wim, MARINOVA, Elena & DEGRAEVE, Ann, 2017b**, « Editorial: Proceedings of the Conference on the Environmental Archaeology of European Cities (CEAEC) », *Quaternary International* 460, p. 1-2, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.06.012>
- DEVOS, Yannick, NICOSIA, Cristiano, VRYDAGHS, Luc, LANGOHR, Roger & MARINOVA, Elena, 2017c**, « L'évolution du paysage bruxellois, un regard archéologique », *Bruxelles Patrimoines* 23-34, p. 8-17.
- DEVOS, Yannick, NICOSIA, Cristiano & WOUTERS, Barbora, 2019**, « Urban geoarchaeology in Belgium: Experiences and innovations », *Geoarchaeology: an international Journal*, p. 1-15, <https://doi.org/10.1002/gea.21755>
- FONDRILLON, Mélanie, 2009**, « À propos des recherches sur les terres noires urbaines : dépasser le concept d'attente », *Archéologie Médiévale* 39, p. 1-16.
- GALINIÉ, Henri, 2000**, *Ville, espace urbain et archéologie*, Tours.
- GALINIÉ, Henri, 2004**, « L'expression «terres noires», un concept d'attente », dans Laurent Verslype & Raymond Brulet (éd.), *Dark Earth - Terres Noires, Actes de la Table Ronde de Louvain-La-Neuve*, Louvain-la-Neuve, p. 1-11.
- GARMY, Pierre, 2009**, *Villes, réseaux et systèmes de villes : contribution de l'archéologie*, thèse d'Habilitation à diriger les Recherches, Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- GÉ, Thierry, COURTY, Marie-Agnès, MATTHEWS, Wendy & WATTEZ, Julia, 1993**, « Sedimentary formation processes of occupation surfaces », dans Paul Goldberg, David T. Nash & Michael Petraglia (éd.), *Formation Processes in Archaeological Context*, Madison, Wisconsin (Monographs in world archaeology 17), p. 149-163.
- GÉBUS, Laurent & GAMA, Franck, 2004**, « Le quartier de la Pierre-Hardie et l'îlot Turmel dans la ville de Metz en Lorraine : deux exemples d'études archéologiques des couches sombres attribuées aux IV^e-XII^e siècles », dans Laurent Verslype & Raymond Brulet (éd.), *Dark Earth - Terres Noires, Actes de la Table Ronde de Louvain-La-Neuve*, Louvain-la-Neuve, p. 135-144.
- GELAUDE, Frank, 2019**. « De ontwikkeling en groei van de rivierhaven Gent tussen 1100 en 1300 (O.-VI.) », *Archaeologia Medievalis, Chronique, Kroniek, Chronik* 42, p. 66.
- GOIRAN, Jean-Philippe, TRONCHÈRE, Hervé, SALOMON, Ferréol, CARBONEL, Pierre, DJERBI, Hatem & OGNARD, Carole, 2010**, « Palaeoenvironmental reconstruction of the ancient harbors of Rome: Claudius and Trajan's marine harbors on the Tiber delta », *Quaternary International* 216/1-2, p. 3-13, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.10.030>.
- GOIRAN, Jean-Philippe, SALOMON, Ferréol, MAZZINI, Iliaria, BRAVARD, Jean-Paul, PLEUGER, Elisa, VITTORI, Cécile, BOETTO, Giulia, et al., 2014**, « Geoarchaeology confirms location of the ancient harbour basin of Ostia (Italy) », *Journal of Archaeological Science* 41, p. 389-398, <https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.08.019>
- GOLDING, Kirsti A., 2008**, *The effect of waste disposal on soils in and around historic small towns*, PhD Thesis, University of Stirling.
- HALL, Allan R. & KENWARD, Harry K. (éd.), 1982**. *Environmental archaeology in the urban contexts*, CBA Research Report, Council for British Archaeology, London.
- HIGELIN, Mathias, 2016**, « L'agglomération romaine d'Horbourg-Wihr. Carte archéologique et synthèse thématique », *Cahiers Alsaciens d'Archéologie d'Art et d'Histoire*, 59, p. 81-102.
- LAURENT, Amélie, 2007**, *Évaluation du potentiel archéologique du sol en milieu urbain*, Thèse de doctorat, Université François Rabelais, Tours.
- LAURENT, 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, p. 307-343.
- LE ROUX, Gaël, VÉRON, Alain & MORHANGE, Christophe, 2005**, « Lead pollution in the ancient harbours of Marseille », *Méditerranée* 104, p. 31-35.
- LEBRET, Patrick, CAMPY, Michel, COUTARD, Jean-Pierre, FOURNIGUET, Jackie, ISAMBERT Michel, LAUTRIDOU, Jean-Paul, LAVILLE, Pierre, MACAIRE, Jean-Jacques, MENILLET, François & MEYER, Robert, 1993**, « Cartographie des formations superficielles. Réactualisation des principes de représentation à 1/50000 », *Géologie Française* 4, p. 39-54.

- LEPETIT, Bernard, 1996**, « La ville : cadre, objet, sujet. Vingt ans de recherches françaises en histoire urbaine », *Enquête. Anthropologie, Histoire, Sociologie* 4, <https://doi.org/10.4000/enquete.663>
- LEVY, Jacques & LUSSAULT, Michel, 2003**, *Dictionnaire de la Géographie et de l'espace des sociétés*, Paris.
- MACPHAIL, Richard I., 1981**, « Soil and botanical studies of the "Dark Earth" », dans Martin Jones & G. W. Dimbleby (éd.), *The Environment of Man: The Iron Age to the Anglo-Saxon Period*, Oxford (BAR British Series 87), p. 309-331.
- MACPHAIL, Richard I., 1983**, « The micromorphology of dark earth from Gloucester, London and Norwich: an analysis of urban anthropogenic deposits from the Late Roman to Early Medieval periods in England », dans P. Bullock & C. P. Murphy (éd.), *Soil Micromorphology*, vol. 1 *Techniques and Applications*, Rothamsted, p. 245-252.
- MACPHAIL, Richard I., 1994**, « The Re-working of urban stratigraphy by human and natural processes », dans Allan R. Hall & Harry K. Kenward, (éd.), *Urban-Rural Connexion: Perspectives from Environmental Archaeology*, Oxford (Symposia of the Association for Environmental Archaeology 12), p. 13-44.
- MAGNY, Michel, 2019**, *Aux racines de l'Anthropocène, une crise écologique reflète d'une crise de l'homme*, Lormont.
- MARRINER, Nick, MORHANGE, Christophe & GOIRAN, Jean-Philippe, 2010**, « Coastal and ancient harbour geoarchaeology: a short review », *Geology Today* 26, p. 21-27.
- MATTHEWS, Wendy, 1992**, *The micromorphology of occupational sequences and the use of space in a Sumerian city*, PhD thesis, University of Cambridge.
- MATTHEWS, Wendy, FRENCH, Charles A.I., LAWRENCE, T., CUTLER, D.F. & JONES, M.K., 1997**, « Microstratigraphic traces of site formation processes and human activities », *World Archaeology* 29, p. 281-308.
- MATTHEWS, Wendy, POSTGATE, Nicholas, PAYNES, S., CHARLES, M. P. & DOBNEY, K., 1995**, « The Imprint of Living in an Early Mesopotamian City: questions and answers », dans Rosemary-Margaret Luff & P. Rowley-Conway (éd.), *Whither Environmental Archaeology?*, Oxford (Oxbow Monograph 38), p. 171-212.
- MONIN, Michèle, 2005**, « Le murus gallicus de Lyon (Rhône) », *Bulletin de l'Association Française pour l'étude l'âge Fer* 33, p. 67-71.
- MORHANGE, Christophe, 2001**, *Mobilité littorale de quelques sites portuaires antiques de Méditerranée : Marseille, Pouzzoles, Cumes, Kiton et Sidon*, Thèse de doctorat, Université de Provence - Aix-Marseille I, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00269281>
- MORHANGE, Christophe, PROVENSAL, Mireille, HESNARD, A., BOUIRON, Marc, BOURCIER, Michel, CARBONEL, Pierre & WEYDERT, Pierre, 1996**, « Morphogenèse et impacts anthropiques sur les rives du Lacydon à Marseille (6000 av. J.-C. - 500 ap. J.-C.) », *Annales de Géographie* 105, p. 32-46.
- MUXART, Tatiana, VIVIEN, Franck-Dominique, VILLALBA, Bruno & BURNOUF, Joëlle, 2003**, *Des milieux et des hommes : fragments d'histoires croisées*, Paris.
- NICOSIA, Cristiano, 2018**, *Geoarcheologia delle stratificazioni urbane postclassiche*, Antenor Quaderni 45, Roma.
- NICOSIA, Cristiano, DEVOS, Yannick & MACPHAIL, Richard I., 2017**, « European Dark Earth », dans Cristiano Nicosia & George Stoops (éd.), *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology*, Oxford, p. 331-343.
- NIN, Nuria, 2002**, « L'artisanat à Aix-en-Provence durant l'Antiquité », dans Jean-Claude Béal & Jean-Claude Goyon (éd.), *Les artisans dans la ville antique*, Lyon, p. 235-250.
- NOIZET, Hélène, BOVES, Boris & COSTA, Laurent, 2013**, *Paris de parcelles en pixels*, Paris.
- OLLIVE, Vincent, PETIT, Christophe, GARCIA, Jean-Pierre & RÉDDÉ, Michel, 2006**, « Rhine flood deposits recorded in the Gallo-Roman site of Eddenburg (Haut-Rhin, France) ». *Quaternary International* 150, p. 28-40.
- PAQUOT, Thierry, LUSSAULT, Michel & BODY-GENDROT, Sophie, 2000**, *La ville et l'urbain : l'état des savoirs*, Paris.
- PEIRY, Jean-Luc & FÉOUGIER, Cyril, 1997**, « À propos de la fondation de Grenoble : un réexamen de l'hypothèse d'une installation sur un môle alluvial », dans Jean-Paul Bravard & Michel Prestreau, (éd.), *Dynamique du paysage : entretiens de géoarchéologie*, Actes de la Table Ronde des 17 et 18 novembre 1995, Lyon (Document d'Archéologie en Rhône Alpes 15), p. 169-176.
- PONS-BRANCHU, Edwige, ROY-BARMAN, Matthieu, JEAN-SORO, Liliane, GUILLERME, André, BRANCHU, Philippe, FERNANDEZ, Matthieu, DUMONT, Emmanuel, DOUVILLE, Eric, MICHELOT, Jean-Luc & PHILLIPS, Andy, 2017**, « Urbanization impact on sulfur content of groundwater revealed by the study of urban speleothems: Case study in Paris, France », *Science of the Total Environment* 579, p. 124-132.
- ROSEN, Arlen M., 1986**, *Cities of clay, the geoarchaeology of tells*, Chicago.
- ROTH-ZEHNER, Muriel, 2018**, *Horbourg-Wihr (Haut-Rhin) : 50 Grand'Rue : Fouille d'un quartier antique au centre de Horbourg-Wihr*, Rapport de fouilles programmées, Sélestat.
- ROUSSELLE, Dominique, 2002**, *Document d'évaluation du patrimoine archéologique des villes de France : Soissons*, Tours.
- SALOMON, Ferréol, 2013**. *Géoarchéologie du delta du Tibre : Évolution géomorphologique holocène et contraintes hydro-sédimentaires dans le système Ostie - Portus*, thèse de doctorat, Université de Lyon 2.
- SALOMON, Ferréol, GOIRAN, Jean-Philippe, NOIROT, Brice, PLEUGER, Elise, BUKOWIECKI, Evelyne, MAZZINI, Ilaria & CARBONEL, Pierre, 2018**, « Geoarchaeology of the Roman port-city of Ostia: Fluvio-coastal mobility, urban development and resilience », *Earth-Science Review* 177, p. 265-283, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.10.003>
- SCHIFFER, Michael B., 1987**, *Formation processes of archaeological records*, Albuquerque.
- SCHWIEN, Jean-Jacques (éd.), 1991**, *Tramway de l'agglomération strasbourgeoise. Étude d'impact archéologique*, Strasbourg.
- SCHWIEN, Jean-Jacques, SCHNEIDER, Nathalie & WATTON, Marie-Dominique, 1998**, « Le site naturel de Strasbourg et ses aménagements hydrographiques de l'Antiquité à l'époque moderne », *Archéologie Médiévale* 28, p. 33-70.
- SEAR, David A., BACON, S.R., MURDOCK, A., DONEGHAN, G., BAGGALEY, P., SERRA, C. & LeBAS, T.P., 2011**, « Cartographic, Geophysical and Diver Surveys of the Medieval Town Site at Dunwich, Suffolk, England », *International Journal of Nautical Archaeology* 40, p. 113-132.

- THION, Pierre, FAYE, Olivier, GEORGES-LEROY, Murielle, DREIDEMY, Christophe & PÉRICHON, Denis, 2003**, « Les fortifications gauloises de Metz (Moselle) », *Annales de l'Est, La fortification en Lorraine : de l'enceinte gauloise de Metz à la ligne Maginot*, Nancy, p. 7-34.
- TIMMERMANS, Julie, DEVOS, Yannick, GHESQUIÈRE, Valérie, DE CUPERE, Bea, DEFORCE, Koen, SPELEERS, Lien, VRYDAGHS, Luc & VAN BELLINGEN, Stephan, 2020**, « Brucity/parking 58 : Un ancien quai de Senne (xv^e siècle) (RBC/BHG) », *Archaeologia Medievals Chronique-Kroniek-Chronik* 43, p. 80-81.
- VELLA, Marc-Antoine, GHILARDI, Matthieu, DIOUF, Ousmane, PARISOT, Jean-Claude, HERMITTE, Daniel, PROVANSAL, Mireille, FLEURY, Jules, DUSSOUILLEZ, Philippe, DELANGHE-SABATIER, Doriane & DEMORY, François, 2013**, « Géoarchéologie du Rhône dans le secteur du pont Saint-Bénézet (Avignon, Provence, France) au cours de la seconde moitié du deuxième millénaire apr. J.-C.: étude croisée de géographie historique et des paléoenvironnements », *Géomorphologie Relief Processus Environments* 19, p. 287-310.
- VUILLEMIN Adrien, 2016**, « La Cour de Lorraine à Mulhouse, du Haut-Empire à la Seconde Guerre Mondiale », *Annuaire historique de la Ville de Mulhouse* 27, p. 147-163.
- WEBER, Max, 1921**, *Die Stadt*, (trad. P. Fritsch - *La Ville*, Paris, 1982).
- WICKHAM, Chris I., 2005**, *Framing the Early Middle Ages*, Oxford.
- WOUTERS, Barbora, 2016**, *Geoarchaeological and micromorphological approaches to the formation and biographies of Early Medieval towns in Northwest Europe*, Thèse de doctorat, Vrije Universiteit Brussel/University of Aberdeen.
- WOUTERS, Barbora, DEVOS, Yannick, BARTHOLOMIEUX, Bart & BRADT, Tomas, 2018**, « Towns on the edge: Urban geoarchaeology of medieval Ieper (Colaertplein) », dans *4th EAA Annual Meeting (Barcelona, 2018). Abstract Book*. Barcelona, p. 566.
- WOUTERS, Barbora, DEVOS, Yannick, MILEK, Karen, VRYDAGHS, Luc, BARTHOLOMIEUX, Bart, TYS, Dries, MOOLHUIZEN, Cornelia & VAN ASCH, Nelleke, 2017**, « Medieval markets: A soil micromorphological and archaeobotanical study of the urban stratigraphy of Lier (Belgium) », *Quaternary International* 460, p. 48-64.
- WOUTERS, Barbora, DEVOS, Yannick, VRYDAGHS, Luc, BALL, Terry B., DE WINTER, Natasja & REYGEL, Patrick, 2019**, « An integrated micromorphological and phytolith study of urban soils and sediments from the Gallo-Roman town *Atuatuca Tungrorum* (Tongeren, Belgium) », *Geoarchaeology* 34, p. 448-466.
- WYSS, M., 2018**, « Plus d'un millénaire de techniques hydrauliques dans le *castellum* de Saint-Denis », dans *Actes des journées archéologies d'Île-de-France, novembre 2017*, Paris.

DE LA FORMATION GÉOLOGIQUE À LA TRANCHÉE : TROUVER ET COMPRENDRE LES SITES ARCHÉOLOGIQUES MENACÉS PAR LES TRAVAUX D'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE

Patrice WUSCHER^{1,2,*}, Christophe JORDA^{3,4}, Quentin BORDERIE^{4,5},
Nathalie SCHNEIDER^{3,2}, Laurent BRUXELLES^{3,6}

¹ Archéologie Alsace

² Laboratoire Image Ville Environnement, UMR 7362 Université de Strasbourg/CNRS

³ INRAP

⁴ Archéologie des Sociétés Méditerranéennes, Université Paul Valéry/CNRS

⁴ Département d'Eure-et-Loir

⁵ UMR 7041 Arscan «Archéologies Environnementales», Paris I, Paris Nanterre, CNRS et Ministère de la Culture

⁶ Laboratoire Traces - UMR 5608, Université Toulouse Jean Jaurès

*contact : patrice.wuscher@archeologie.alsace

RÉSUMÉ

Les sciences de la terre ont été mises à contribution dès les premières recherches paléolithiques au XIX^e siècle pour trouver les sites archéologiques et participer à l'étude de l'adaptation des sociétés du passé aux changements environnementaux. Elles ont pris un rôle important dans les dispositifs d'archéologie préventive élaborés à partir des années 1980 pour sauvegarder les vestiges menacés par les travaux d'aménagement du territoire. La présente contribution vise à illustrer la démarche pluridisciplinaire à l'œuvre depuis plusieurs décennies, depuis les études documentaires et cartographiques jusqu'à l'ouverture de tranchées de diagnostic. Elle se propose également de montrer quelques apports de la géoarchéologie et de l'archéologie préventive aux questions géomorphologiques, à la reconstitution des dynamiques des paysages et à l'impact de l'Homme sur l'environnement. Les exemples présentés ont été choisis dans

des contextes géographiques différents, le sud de la France, le bassin de Paris et l'Alsace, et s'échelonnent du Paléolithique à l'époque moderne pour illustrer les potentiels de la démarche qui gagnerait à être appliquée de façon plus systématique.

Earth sciences were used since the earliest paleolithic research in the 19th century to find archaeological sites and to study the adaptation of past societies to environmental changes. They took an important role in the preventive archaeology systems developed from the 1980s to save the remains threatened by territory development. This contribution aims to illustrate the multidisciplinary approach developed over several decades, from documentary and cartographic studies to the opening of test pits. It also intends to show some contributions of geoarchaeology and preventive archaeology to geomorphological questions, to the reconstruction of landscape dynamics and to the question of human impact on the environment. The examples presented were chosen in different geographical contexts, in the south of France, Paris basin and Alsace, from the paleolithic to the modern era, to illustrate the potential of the approach which would benefit from being applied more systematically.

MOTS-CLÉS

Géomorphologie, géoarchéologie, archéologie préventive, diagnostics archéologiques, paysages.

KEYWORDS

Geomorphology, geoarchaeology, rescue archaeology, test pits, landscapes.

Article accepté après évaluation par deux experts selon le principe du double anonymat

INTRODUCTION

En reconstituant la paléogéographie, les paléoenvironnements et les stratégies d'adaptation des sociétés du passé aux changements environnementaux, les disciplines archéologiques apportent des éléments de réflexion aux enjeux actuels de la raréfaction des ressources et du réchauffement climatique. Ces travaux démarrent par la recherche de sites archéologiques et la constitution d'un corpus suffisamment étoffé de données. Les sciences de la terre qui permettent notamment de comprendre l'empilement des strates et des paléosols dans les différents compartiments des bassins-versants, des versants aux littoraux, ont depuis longtemps été mises à contribution lors de cette étape fondamentale, depuis les premières recherches paléolithiques dans les gravières de la Somme au XIX^e siècle [1]. Dans le contexte de destruction effrénée de vestiges archéologiques par les travaux d'aménagement du territoire des dernières décennies, ces disciplines ont pris un rôle central dans les dispositifs de cartographie et de fouilles préventives des vestiges archéologiques élaborés à partir des années 1980.

Ainsi, la géomorphologie est associée aux premières opérations d'archéologie préventive [2] et des cartes géomorphologiques et des campagnes de sondages à la tarière sont commanditées pour participer à la détection des vestiges archéologiques menacés par des travaux d'aménagement [3]. En parallèle, des sondages à la pelle mécanique sur 5 à 10% des surfaces aménagées se sont imposés pour détecter les sites archéologiques, tandis que certaines carrières faisaient l'objet jusque dans les années 2000 de suivi de décapage sur l'intégralité de leur emprise [4]. La loi de 2001 a systématisé le dispositif d'archéologie préventive basé sur les diagnostics et les fouilles. Pour les diagnostics, la méthode de sondages autour de 10% des terrains prospectés est devenue la norme, mais est généralement fonction de la puissance du recouvrement sédimentaire. Depuis, cette méthode a souvent été discutée [5] et est régulièrement remise en question, par exemple en 2014 avec le projet de loi relatif à la simplification de la vie des entreprises, dont une des mesures, la mesure n°14, non retenue dans la loi approuvée, prévoyait la possibilité de remplacer les ouvertures mécaniques par des prospections géophysiques.

Le présent article vise à illustrer, à partir de quelques exemples, la nécessité qu'il y a à combiner lecture

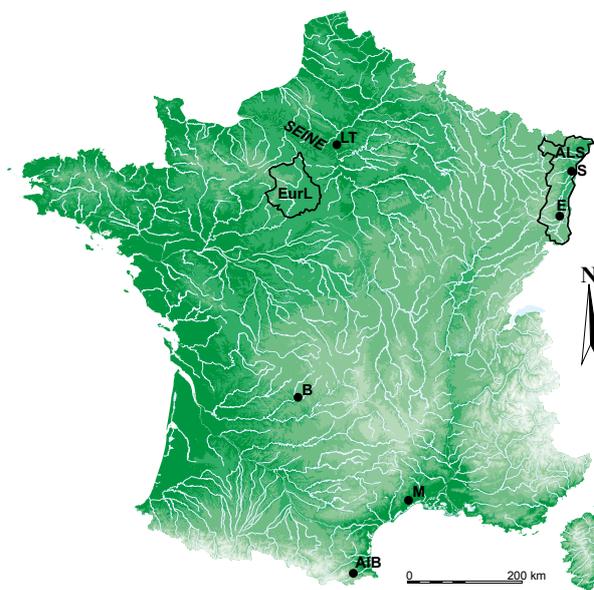


Figure 1

Localisation des principaux sites présentés dans le texte. Eurl : Eure-et-Loir ; Als : Alsace ; B : Brive ; LT : Le Thillay ; E : Ensisheim ; M : Montpellier ; S : Strasbourg ; Alb : Amélieles-Bains (modifié d'après Open Street Map).

géomorphologique et pédosédimentaire multi-scalaire et ouvertures mécaniques systématiques pour aider à trouver les sites archéologiques menacés de destruction, mais aussi pour reconstituer les cadres de vie des sociétés du passé et penser les changements environnementaux et sociaux. Il propose un survol d'ensemble, non exhaustif, du Paléolithique à l'époque contemporaine, dans des contextes géologiques et géomorphologiques différents : le bassin de Paris, le Sud-Ouest, le Languedoc et l'Alsace (fig. 1). Le choix de ces différents cas vise à montrer que la démarche ne s'applique pas seulement au Paléolithique et au Mésolithique, qu'elle ne se limite pas à un nombre restreint de contextes géographiques, qu'elle est commune à la plupart des régions françaises et qu'elle est développée par l'ensemble des opérateurs publics en charge des diagnostics archéologiques.

[1] HUREL & COYE 2011.

[2] BRAVARD *et al.* 1989.

[3] LEBRET & HALBOUT 1991, KRIER 1994, PASTRE 1994.

[4] MORDANT 1994, AUXIETTE & DUBOULOZ 2009.

[5] MARMET *et al.* 2002, DUBOULOZ 2003, DAUGAS & BONIN 2006, MALRAIN 2008, DEPAEPE & SÉARA 2010, GUILHOT 2018.

LE TRAVAIL EN AMONT

PRÉPARER LES OPÉRATIONS DE DIAGNOSTIC

Le principe d'étude géologique préliminaire a été formalisé notamment lors des travaux archéologiques préalables à l'autoroute A5, dans l'est de la France, entre Melun et Chaumont. Le dépouillement des cartes géologiques, pédologiques, topographiques et de la littérature existante, combiné au suivi des sondages géotechniques a ainsi permis de définir : 1/ l'épaisseur des niveaux susceptibles de livrer des vestiges archéologiques ; 2/ les unités lithostratigraphiques régionales quaternaires ; 3/ le cadre chronostratigraphique ; 4/ les zones favorables aux études paléo-environnementales [6]. Cette démarche constitue une des raisons de la réussite de cette opération.

De fait, une lecture critique des cartes géologiques apparaît d'un grand intérêt pour identifier les contextes favorables à la conservation de sites archéologiques. Ces documents sont toutefois hétérogènes et de qualité inégale en fonction des spécialités et de l'intérêt des différents auteurs. En Ile-de-France, les formations loessiques pléistocènes ont ainsi été regroupées, quelle que soit leur nature, comme des « limons de plateaux ». Surtout, l'épaisseur minimale à partir de laquelle ils ont été cartographiés varie d'une carte à l'autre, de trente centimètres [7] à plus de trois mètres [8]. S'il existe de très rares cartes géomorphologiques [9], des recherches géomorphologiques ont été financées par des collectivités territoriales dès les années 1980 pour identifier les sites archéologiques menacés par les travaux d'aménagement du territoire [10]. Les travaux universitaires récents menés sur des tronçons de vallées [11] apparaissent également fondamentaux. Pour préciser ces premières approches et pour identifier les formations superficielles peu étendues, l'examen des cartes topographiques, complété par les données Lidar quand elles existent, est également d'un grand intérêt. Si, par le passé, les expériences de prospection préalable à l'implantation des sondages mécaniques ont montré tout leur intérêt [12], cette méthode est aujourd'hui trop rarement employée.

[6] KRIER 1994.

[7] POMEROL *et al.* 1969.

[8] MÉGNIEN 1987.

[9] CLOOTS *et al.* 1973.

[10] LEBRET & HALBOUT 1991, KRIER 2004.

De façon générale, une phase d'étude géologique et géoarchéologique préparatoire est loin d'être systématique. Son inscription dans les prescriptions de diagnostic par les services régionaux de l'archéologie constituerait un levier important pour généraliser la démarche.

DES PROGRAMMES CIBLÉS DE RECHERCHES POUR CERTAINES PÉRIODES OU CATÉGORIES DE SITES ARCHÉOLOGIQUES

En Ile-de-France, la démarche initiée à partir de 2007 par Frédéric Blaser, dans le cadre du programme d'activité scientifique de l'INRAP consacré au Paléolithique et au Mésolithique de la région [13], a permis la découverte de plus d'une trentaine de nouveaux sites paléolithiques, a fait l'objet d'une table-ronde en cours de publication [14] et a inspiré des programmes similaires en Eure-et-Loir et en Alsace.

En effet, depuis 2013 en Eure-et-Loir, un programme de collecte systématique des données relatives aux formations limoneuses d'origine éolienne est piloté par le conseil départemental, en collaboration avec les services de l'État, l'INRAP et l'agglomération de Chartres. L'objectif de ce programme de recherche est d'analyser les caractéristiques spatiales de la couverture limoneuse dans cette zone située en limite sud de la zone de couverture continue à subcontinue des loëss, à plus de 150 km des sources de limons (Manche). La documentation concernant les enregistrements pédosédimentaires est recensée et harmonisée à l'aide d'un système d'informations géographiques, des prospections de terrain, des diagnostics avec des sondages profonds tous les 50 m jusqu'au substrat tertiaire et des fouilles archéologiques. Les séquences présentes sont analysées, ainsi que leur variabilité à l'échelle du département et leur intégration dans les modèles chrono-stratigraphiques du nord de la France et de l'Europe occidentale. Les résultats montrent que le potentiel pédosédimentaire du département est riche pour la fin du Quaternaire, et plus particulièrement, pour le Pléistocène supérieur et l'Holocène. Des accumulations de plus de 7 m sont conservées localement et les caractères des séquences (texture, carbonatations, cycles climatiques observables) ont permis de délimiter six zones dans la couverture limoneuse de plateau et

[11] Par exemple CASTANET 2008.

[12] DESCHODT 2010, BRUXELLES 2010.

[13] SOUFFI *et al.* 2009.

[14] <https://www.inrap.fr/de-l-ile-de-france-l-europe-du-nord-ouest-les-peuplements-humains-avant-le-13938>

cing dans les formations de versant [15] (fig. 2). Les enregistrements de l'Eémien et du Début Glaciaire weichsélien y sont bien représentés, notamment à Chaudon. Bien que les séquences de plateau soient hydromorphes et polyphasées, elles peuvent contenir des sites du Paléolithique bien préservés, comme à Illiers-Combray [16].

Engagé en 2015, le programme collectif de recherche (PCR) Paleoels, financé par le Ministère de la Culture (DRAC Grand Est), fédère des acteurs du CNRS, de l'INRAP, d'Archéologie Alsace, de l'université et du secteur privé ; il vise à reconstituer les comportements des sociétés paléolithiques et mésolithiques dans les environnements changeants d'Alsace. Pour ce faire, les premières années du projet ont été consacrées à mieux comprendre les formations sédimentaires et les sites archéologiques connus [17]. Plusieurs campagnes d'étude des coupes accessibles, notamment dans les carrières de loess encore en activité, ont ainsi été menées. Elles ont été accompagnées d'un inventaire de la littérature et des travaux universitaires existants.

[15] BORDERIE *et al.* 2017.

[16] BORDERIE *et al.* 2019.

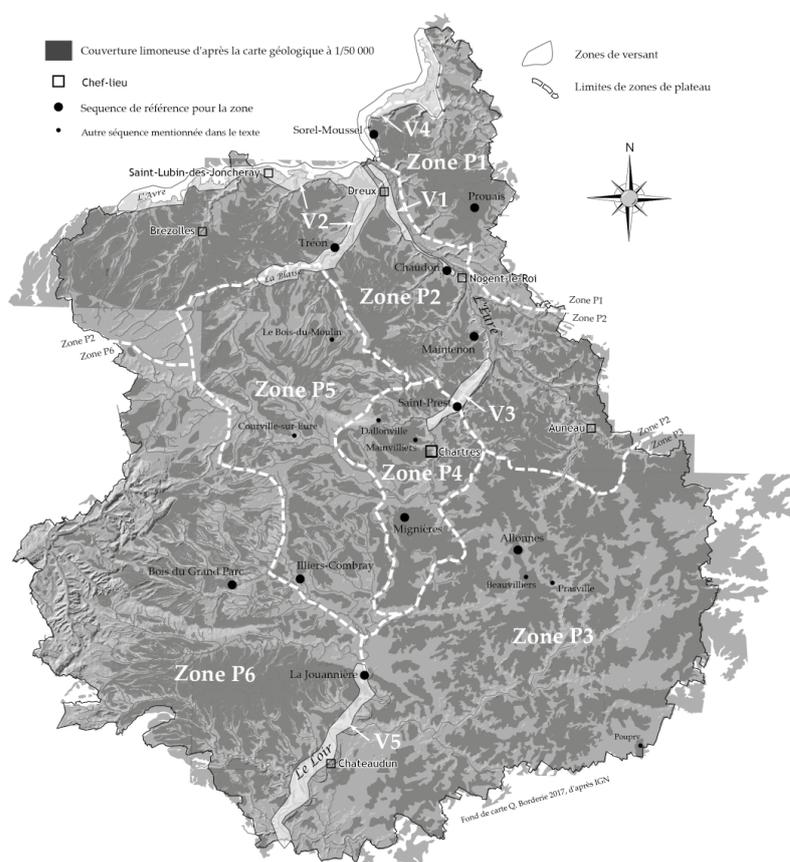
[17] <https://fr.calameo.com/books/00372503877bf49f2aa26>

[18] WUSCHER *et al.* 2019.

Elles ont été réalisées en parallèle d'un réexamen de la documentation et des collections archéologiques. Un aller-retour permanent entre les travaux du PCR et les opérations d'archéologie préventive ainsi qu'une confrontation des travaux archéologiques et géomorphologiques ont permis de dégager des tendances régionales sur la conservation et la localisation des vestiges. Ainsi, des sites mésolithiques et tardiglaciaires peuvent être conservés partout, sauf dans des zones localisées, généralement dans l'axe des cours d'eau, fortement érodées à partir de la Protohistoire. Des horizons contemporains du Paléolithique supérieur ancien sont fréquemment mis au jour, notamment dans les loess, lors des travaux d'aménagement du territoire. Il n'est pas encore possible de dire si le faible nombre d'indices et de sites de cette période tient aux méthodes de diagnostic employées ou à une réelle déprise humaine. Les horizons du Paléolithique moyen et inférieur localisés sur les bordures du Fossé Rhénan ne sont pas rares, notamment sur les versants, à des profondeurs très variables, ce qui explique le nombre important d'indices archéologiques de ces périodes. Les travaux du PCR se poursuivent maintenant à des échelles plus locales et le périmètre du projet a été élargi au Jura alsacien et au Massif Vosgien. Ils s'orientent également vers une réflexion sur les premiers peuplements alsaciens et sur les territoires paléolithiques et mésolithiques [18].

Figure 2

Zonage de la couverture limoneuse d'origine éolienne sur le département d'Eure-et-Loir (d'après BORDERIE *et al.*, 2017). Une variation du type de séquence peut être constatée selon un gradient globalement nord-sud avec une épaisseur moyenne plus importante au nord, où des horizons carbonatés peuvent être conservés en profondeur. Ces caractéristiques ont un impact sur la conservation des vestiges préhistoriques.



Cette démarche pourrait être étendue à la recherche de sites peu documentés d'autres périodes, comme par exemple les sites de berges ou les villages médiévaux et modernes désertés suite aux crues dévastatrices du Petit Âge Glaciaire dans la vallée du Rhin. Un inventaire critique des découvertes anciennes, des études documentaires, des prospections pédestres et subaquatiques et des sondages ciblés devraient permettre de documenter ces sites évoqués par les sources écrites. Surtout, même si les chiffres sont difficiles à évaluer précisément, moins de 25 % des surfaces aménagées en France faisaient l'objet d'un diagnostic archéologique au début des années 2010 [19]. Compte-tenu de ce cadre d'intervention finalement restreint, une meilleure prise en compte des travaux géomorphologiques dans les choix des terrains qui font l'objet de prescriptions de diagnostics serait pertinente.

LA DÉTECTION DES SITES

LA RECHERCHE DE LA PRÉHISTOIRE ANCIENNE

Dans le nord de la France, l'intérêt archéologique de la couverture loessique et du système de terrasses alluviales est connu depuis le XIX^e siècle [20]. Les premières opérations d'archéologie préventive ont été réalisées sur des gisements paléolithiques dans les années 1970 et se sont systématisées dans les années 1990 [21]. La couverture loessique fait l'objet de travaux géomorphologiques et d'archéologie préventive depuis plusieurs décennies, et les sondages sont généralement concentrés sur les versants exposés au nord et au nord-est, où les successions stratigraphiques renferment assez systématiquement des paléosols et des sites archéologiques [22]. Dans le sud-ouest de la France, le potentiel du sous-sol en termes de conservation de sites paléolithiques est également connu de longue date, mais les formations sédimentaires susceptibles de livrer des vestiges sont localisées et discontinues, le plus souvent dans des cavités karstiques. La localisation et le maillage des tranchées sont

donc plus concentrés dans ces formations. Ainsi, avant les travaux de l'aéroport de Brive, un travail de prospection archéologique et géomorphologique préalable aux ouvertures mécaniques a été mené. Par la suite, aux sondages systématiques et régulièrement espacés a été préférée une concentration des tranchées dans les dolines, de manière rayonnante, conformément à la logique des dynamiques sédimentaires, ce qui a conduit à la découverte d'un gisement attribué au Paléolithique moyen ancien [23]. Sur les terrasses de la Garonne, les couvertures limoneuses qui scellent les dépôts graveleux ont eu une histoire polycyclique. Les vestiges anciens sont souvent résidualisés [24] et incorporés dans un petit niveau de graves régulièrement confondu avec le corps de la terrasse graveleuse. L'identification de ce phénomène a conduit les équipes à systématiquement traverser ce premier niveau de graves, ce qui a permis la découverte de nombreux vestiges [25].

La moitié sud-est de l'Ile-de-France et la bordure de la plaine d'Alsace présentent des caractères communs avec le Sud-Ouest et des vestiges archéologiques paléolithiques sont susceptibles d'apparaître à des profondeurs variables, parfois faibles, « presque à fleur de terre » [26]. En revanche, la moitié nord-ouest de l'Ile-de-France de même que les terrasses alluviales et les collines alsaciennes sont caractérisées par des formations sédimentaires continues, similaires à celles du nord de la France. Ces formations sont donc sondées à l'aide d'un maillage régulier et discontinu de sondages profonds par une équipe mixte composée d'archéologues et de géomorphologues. En Ile-de-France et en Alsace, elles sont moins connues et doivent, dans l'état actuel des connaissances, faire l'objet d'un maillage plus systématique pour comprendre leur géométrie, avant de focaliser la prospection sur les paléosols. Le diagnostic mené durant l'hiver 2013 sur 22 ha de la commune du Thillay (95), situé sur la partie occidentale du plateau éocène de la plaine de France, en surplomb de la vallée du Crould, illustre bien cette démarche. Trente sondages ont permis de délimiter l'extension d'une séquence de limons loessiques de trois à quatre mètres d'épaisseur contenant plusieurs paléosols (fig. 3). Trois niveaux archéologiques ont été mis en évidence [27]. Le niveau inférieur est situé à la base d'un paléosol (probablement un sol brun arctique), qui a livré une pièce bifaciale (fig. 4) et des pièces à dos. Les caractéristiques pédosédimentaires de la séquence et le type d'assemblage semblent indiquer un âge weichsélien moyen (environ entre 55 000 et 30 000 ans avant l'actuel). Le deuxième niveau est un paléosol de type gley de toundra qui a livré une dent d'équidé datée par la méthode du radiocarbone

[19] COLLART 2012.

[20] ANTOINE *et al.* 2011.

[21] *Ibid.*

[22] LOCHT *et al.* 2010.

[23] COLONGE *et al.* 2004, BRUXELLES 2010.

[24] Leur matrice sédimentaire a été érodée.

[25] BRUXELLES *et al.* 2003.

[26] FORRER 1925.

[27] WUSCHER *et al.* 2013.

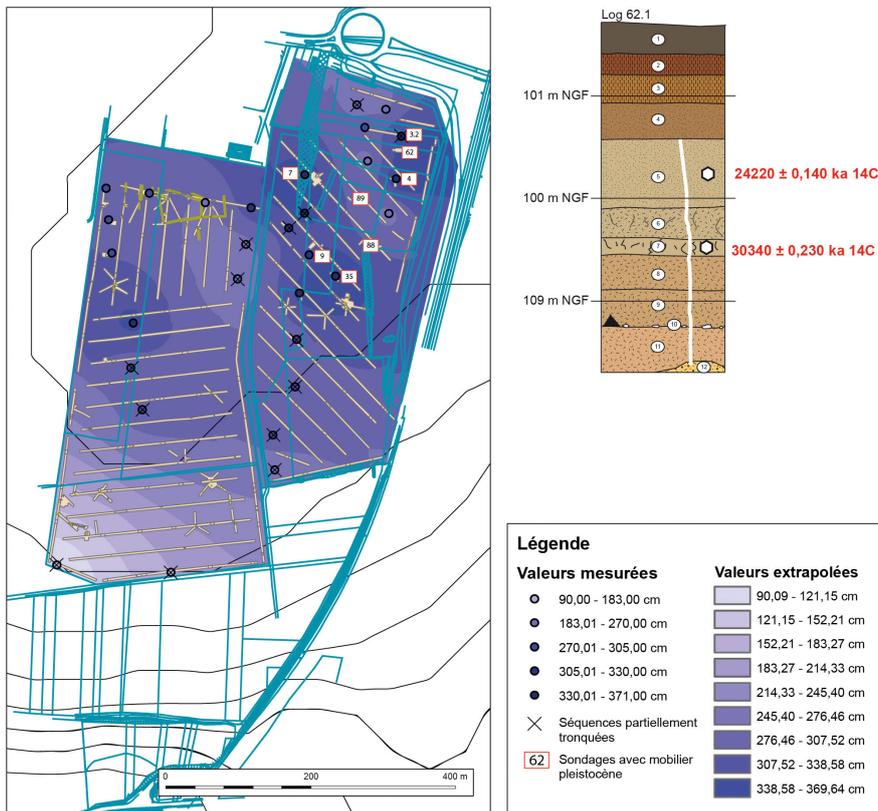


Figure 3

Le Thilly, Val-d'Oise, épaisseur des formations pléistocènes et log du sondage 62.1 représentatif de l'emprise (le triangle placé sur la coupe indique la position de la pièce bifaciale, les datations ont été réalisées à partir des restes osseux découverts dans le sondage 3.2, voisin du sondage 62.1).

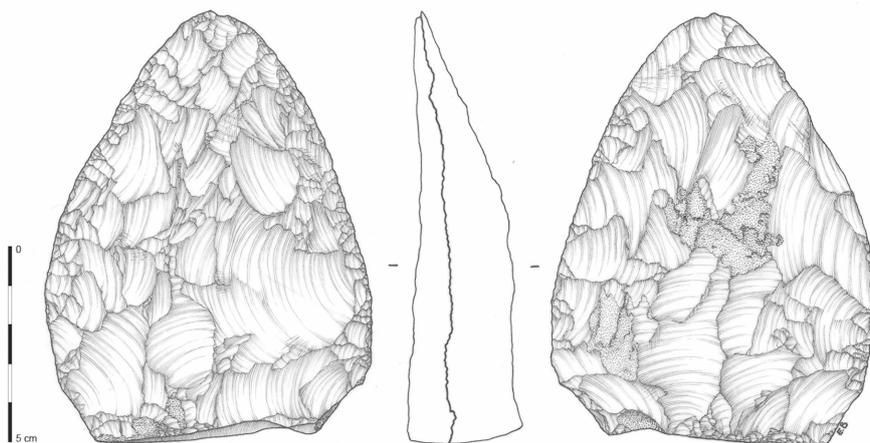


Figure 4

Le Thilly, Val-d'Oise, pièce bifaciale découverte dans l'horizon attribué au weichsélien moyen, environ entre 55 000 et 30 000 ans avant l'actuel (dessin E. Boitard/INRAP).

de $30,340 \pm 0,23$ ka avant l'actuel [28]. Le troisième niveau est constitué de loëss calcaires dans lesquels a été découvert un fragment de phalange d'équidé brûlé qui a livré un âge radiocarbone de $24,220 \pm 0,14$ ka avant l'actuel.

LES INDICES DIFFUS DU MÉSOLITHIQUE

Le Mésolithique s'inscrit dans une période tempérée caractérisée par un couvert forestier étendu. Les vestiges de la période sont parfois représentés par des fosses et des sépultures, mais le plus souvent par des concentrations de mobilier [29]. Sur la majeure partie des terrains menacés par des travaux d'aménagement du territoire, notamment les plateaux ou les versants, la rareté des dépôts sédimentaires de la période n'a pas

été favorable à la conservation des gisements, même si des petits thalwegs ont pu piéger du mobilier ou si des restes lithiques ont pu être enterrés par la faune du sol [30] ou piégés dans des chablis [31]. Des successions stratigraphiques de la période sont toutefois

[28] Datation financée par le Programme d'Activité Scientifique de l'INRAP « Recherches Archéologiques préventives dans le Bassin Parisien du Pléistocène à l'Holocène : Chronologie, caractérisation culturelle et fonctionnement des sites », sous la direction de Bénédicte Souffi, Boris Valentin et Frédéric Blaser.

[29] DUCROCQ 2010.

[30] WUSCHER *et al.* 2012.

[31] DUCROCQ 2010.

conservées en fonds de vallées, en contexte sableux et au pied de certains versants. Mais, même dans ces contextes topographiques particuliers, les vestiges sont généralement dilatés du fait des processus pédologiques (bioturbations) qui caractérisent l'Holocène avant les défrichements néolithiques et protohistoriques [32]. Bien souvent, les vestiges du Mésolithique apparaissent donc au même niveau que les vestiges et les structures en creux des périodes plus récentes. Les spécialistes de la période insistent donc sur l'intérêt des phases d'étude documentaire, prenant notamment en compte les découvertes des prospections pédestres. Ils insistent aussi sur l'indispensable participation de spécialistes du mobilier lithique et sur la nécessaire synergie entre archéologues et géomorphologues [33].

Les travaux menés à Ensisheim dans la vallée de l'Ill illustrent bien cette démarche. Identifiés en 2015 [34], les horizons tardiglaciaires et holocènes font depuis l'objet de travaux réguliers (fig. 5). La plaine de l'Ill a été façonnée après l'incision et la migration du Rhin à l'est du cône de la Hardt, dont les derniers dépôts ont été datés par luminescence stimulée optiquement (OSL) de $16\,200 \pm 1\,200$ ans avant le présent [35]. Le remplissage de la plaine est constitué de sables pédogénéisés recouverts par des limons attribués au Tardiglaciaire sur la base de datations par OSL (unités 8 à 5, fig. 6). Un sol noir se développe sur ces dépôts (unité 3, fig. 6) puis un luvisol (unité 2, fig. 6).

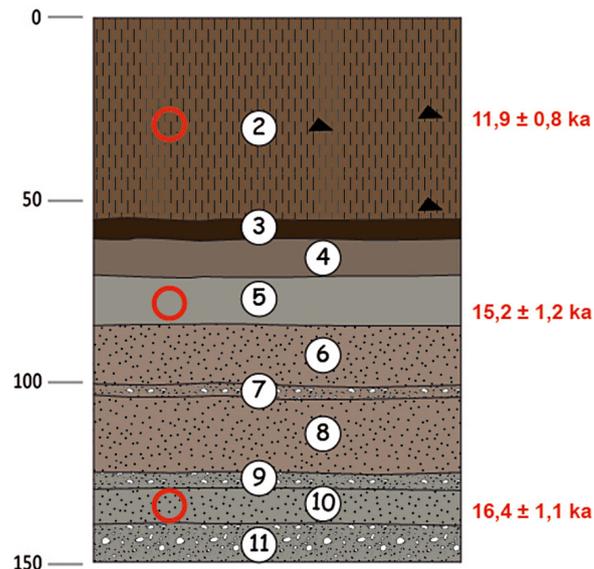


Figure 6

Succession stratigraphique de la nappe II. Les triangles indiquent la position du mobilier mésolithique. Les ronds et les chiffres rouges indiquent les âges OSL. Les deux âges supérieurs sont légèrement trop vieux, ce qui tient aux limites de la méthode.

[32] *Ibid.*, CONFALONIERI & LE JEUNE 2012.

[33] DUCROCQ 2010.

[34] PIERREVELCIN *et al.* 2016.

[35] WUSCHER *et al.* 2018.

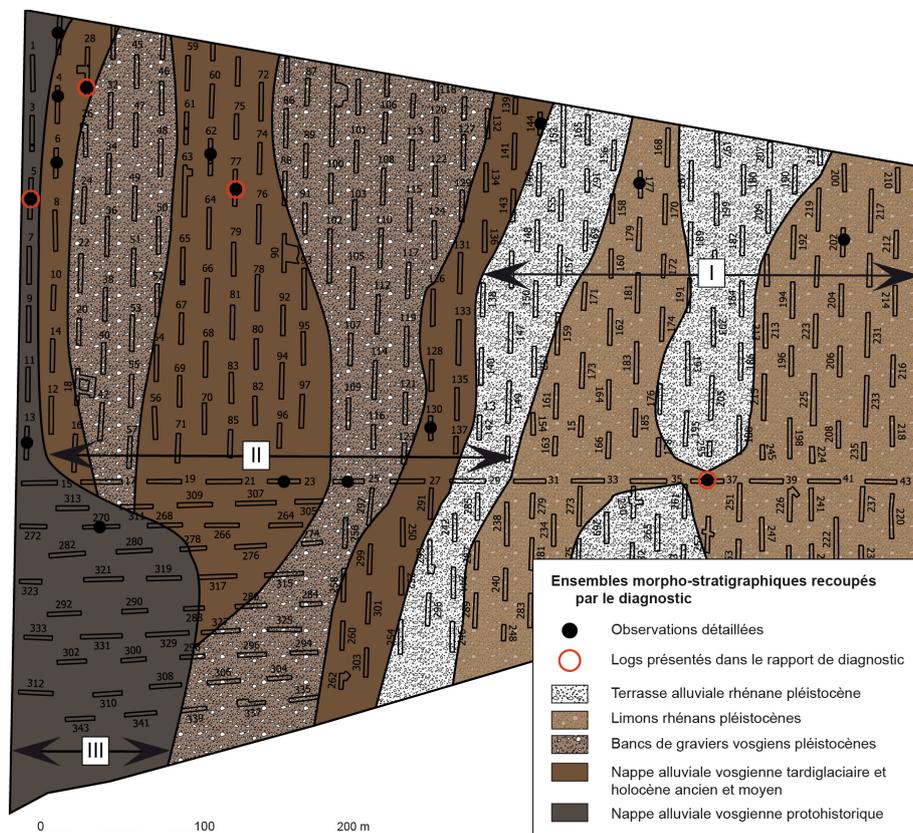


Figure 5

Cartographie des trois nappes alluviales de la plaine de l'Ill à Ensisheim dans l'emprise du diagnostic mené durant l'hiver 2018-2019 :

I : nappe weichsélienne ;

II : nappe tardiglaciaire et holocène ;

III : nappe protohistorique.

Localement, cette succession stratigraphique est tronquée par des dépôts torrentiels contenant des fragments de céramiques protohistoriques [36]. Au sein de ces niveaux, un suivi géomorphologique régulier, 2 à 3 demi-journées par semaine, a permis de cartographier les dépôts, de délimiter les secteurs tronqués à partir de la Protohistoire et de cibler les paléosols, révélant des vestiges du Mésolithique moyen, récent et final [37]. Cette succession stratigraphique peut se suivre de Mulhouse à Colmar [38] et elle a livré une pièce mésolithique à Oberhergheim [39].

DE LA PRÉHISTOIRE RÉCENTE AUX PÉRIODES HISTORIQUES DANS LES SECTEURS À FORT RECOUVREMENT SÉDIMENTAIRE

À la fin de la dernière période glaciaire, il y a 20 000 ans, le niveau général des océans, 120 à 130 m plus bas qu'aujourd'hui, conduit les fleuves à creuser de profonds canyons pour rejoindre le niveau de base. À partir du réchauffement climatique post-glaciaire (après 18000 avant l'actuel), les calottes glaciaires fondent et le niveau des mers remonte très rapidement jusqu'au début de l'Holocène, puis plus progressivement. Ainsi, à la fin du Mésolithique, il y a 8000 ans, le niveau marin est encore entre 7 et 9 m sous l'actuel [40]. Les fleuves accompagnent cette remontée marine en comblant leurs anciennes rias. Le Lez, petit fleuve côtier qui traverse la ville de Montpellier et se jette dans la Méditerranée, en est un bon exemple. De nombreuses opérations d'archéologie préventive ont

été menées dans sa plaine littorale depuis plus de 20 ans et les modes opératoires ont ainsi été adaptés à ce contexte particulier. L'opération de diagnostic menée en 2017 dans le cadre de l'extension de la station d'épuration de Montpellier, à Lattes, en est emblématique (fig. 7). Profond de plus de 9,00 m, un des sondages effectués a permis la mise au jour des occupations qui se sont succédées dans la plaine alluviale au cours des huit derniers millénaires (fig. 8). Dans le même temps, un travail a été mené sur les changements dans la dynamique du Lez afin de mieux appréhender les métamorphoses fluviales en relation avec la remontée marine et les rythmes du peuplement dans cette zone en mutation constante. Quatre grandes phases d'évolution des milieux sont identifiées, qui font écho aux données déjà acquises autour de Lattes [41]. La phase a, datée au moins de la fin du Mésolithique, correspond à un paysage de plaine d'inondation humide, à tendance marécageuse. Pour cette période, on n'a trouvé que peu de vestiges archéologiques, mais l'on sait que la plaine est occupée comme en témoignent les

[36] PIERREVELCIN *et al.* 2016, ROTH-ZEHNER *et al.* 2016.

[37] ROTH-ZEHNER *et al.* 2016, ROTH-ZEHNER *et al.* 2019.

[38] BLONDEAU & WUSCHER 2017, BLONDEAU 2018.

[39] BLONDEAU 2018.

[40] VACCHI *et al.* 2016.

[41] DAVEAU 2007, MARSAC *et al.* 2019.



Figure 7

Sondage de diagnostic préalable à l'extension de la station d'épuration de Montpellier, à Lattes.

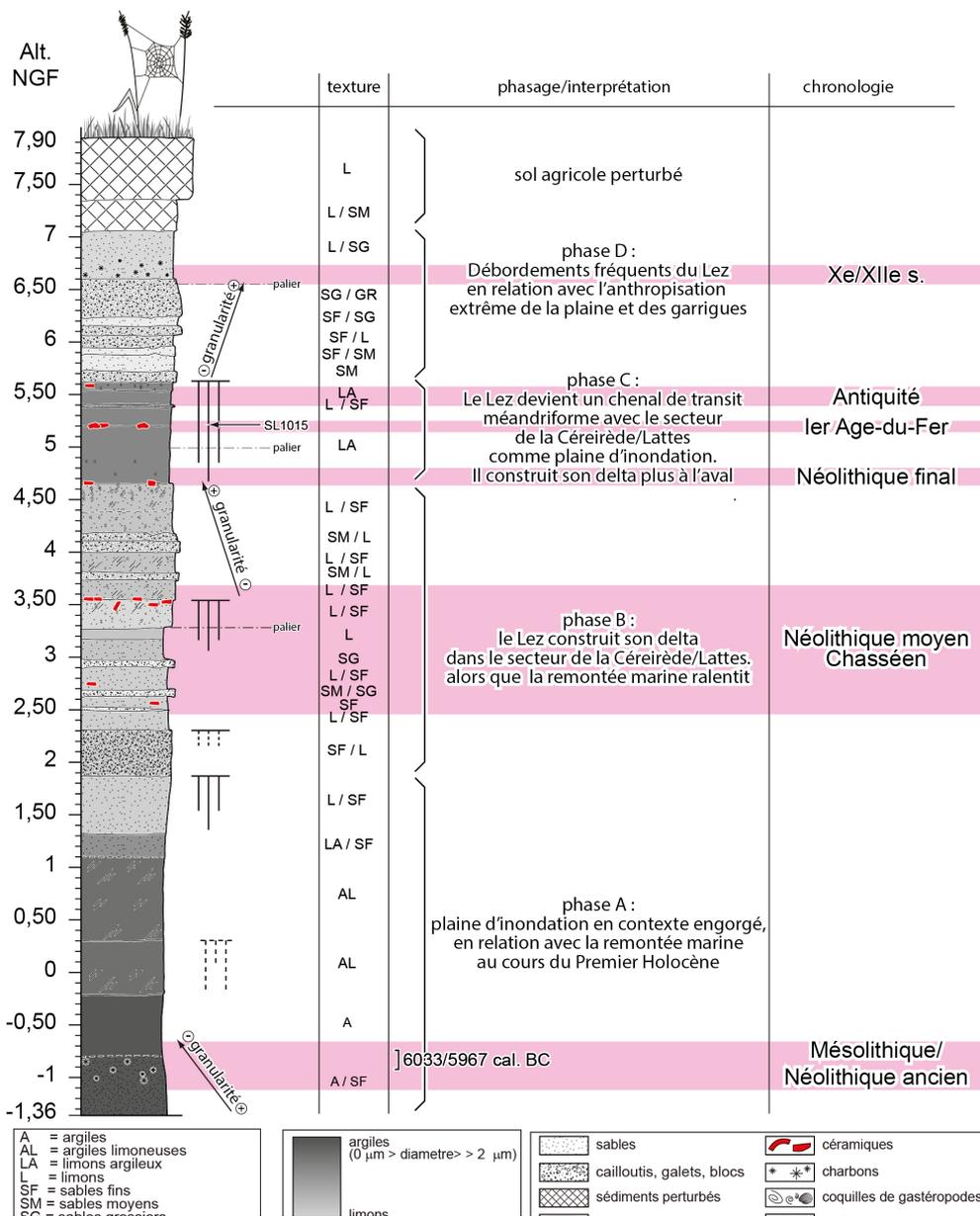


Figure 8
Stratigraphie type de la basse plaine du Lez depuis le Néolithique ancien : l'exemple de la station d'épuration de Montpellier, à Lattes (Hérault).

quelques découvertes ponctuelles (essentiellement des fosses) ou les niveaux charbonneux mis au jour dans plusieurs sondages. La phase b, datable du Néolithique moyen, montre un cours d'eau très énergique, avec des chenaux larges et partiellement tressés, associé à de nombreuses défluviations. Les sédiments qu'il dépose sont systématiquement grossiers, sableux à limono-sableux. Pour cette période, les vestiges sont bien plus nombreux et correspondent à des occupations d'ampleur comme à Port-Ariane [42], à des installations plus ponctuelles comme le tumulus des Rauzes Basses [43] ou des fosses et des silos et des traces d'habitat, comme sur le site de La Céreirède fouillé en 2003 [44]. La phase c inaugure un changement fondamental dans le fonctionnement du fleuve, qui va perdurer jusqu'à aujourd'hui. Évoluant à partir d'environ 2500 ans avant notre ère vers un cours d'eau à chenal unique, sa plaine d'inondation n'est plus exhaussee

que par des limons et argiles de débordement. Dans ce nouveau cadre paysager, l'occupation de la plaine s'intensifie et nombreuses en sont les traces à partir du Néolithique [45]. La phase d, d'âge historique, est marquée par un fonctionnement plus dynamique du fleuve avec de fréquents débordements qui sont mis en relation avec la forte anthropisation de l'ensemble du bassin versant.

Dans les vallées des zones montagnardes et semi-montagnardes, les formations tardiglaciaires et holocènes sont discontinues et très localisées. Ces

[42] DAVEAU 2007.

[43] MARSAC *et al.* 2019.

[44] JUNG *et al.* 2017.

[45] DAVEAU 2007, OTT & TARROU 2013, RASCALOU & BEL 2013, RAUX *et al.* 2013.

secteurs, caractérisés par des dépôts grossiers, se prêtent mal aux carottages et leur observation n'est possible qu'à partir des affleurements mis au jour par les torrents, dont les rives sont souvent défendues par des murs ou des empièvements qui n'ont fait l'objet que de peu d'études. Il est donc difficile de prédire la sensibilité archéologique de ces milieux sans des ouvertures mécaniques. Une lecture conjointe, géomorphologique et archéologique, et une adaptation du maillage des tranchées au sous-sol sont donc indispensables lors des diagnostics. Celui qui a été mené à Amélie-les-Bains, dans la moyenne vallée du Tech (Pyrénées-Orientales, **fig. 9**), permet d'illustrer la démarche [46]. Il est localisé sur une bande de 1 km de long et de 0,3 km de large délimitée au nord par un versant très raide façonné dans les micaschistes du Canigou et les calcaires du Mésozoïque (synclinal d'Amélie-les-Bains) dans lequel s'ouvrent trois bassins-versants torrentiels. Au sud, il domine d'une dizaine de mètres le lit actuel du Tech, fleuve dont le régime hydrologique combine des caractères méditerranéens et montagnards, et qui est marqué par des crues violentes et paroxysmiques, dont la plus célèbre, l'aiguat de 1940, est encore très présente dans les esprits. Une première série de tranchées a été déployée sur l'ensemble de l'emprise, ce qui a permis de cartographier le sous-sol et d'identifier une accumulation de colluvions fossilisant plusieurs paléosols, une berge antique et médiévale ainsi que deux grands cônes de graviers de l'époque moderne. Dans un second temps, les tranchées ont été concentrées sur la berge et les paléosols. Sur la berge, cela a permis de



Figure 9

Amélie-les-Bains, vue de l'environnement du diagnostic archéologique (cliché : Annie Pezin/INRAP).

mettre en évidence des murs, un sol construit de type calade et des fosses constitutifs d'un établissement rural médiéval. Dans les paléosols, les tranchées ont mis au jour un bâtiment sur poteaux de 25 m de long pour 7 m de large, avec des murs de terre massive conservés sur 10 à 20 cm de hauteur, plusieurs foyers, ainsi qu'un abondant mobilier et de nombreuses céramiques écrasées en place, attribuées au Bronze final IIIb (environ 900-800 avant notre ère). Dans le même secteur, a été découvert un ensemble de l'Antiquité Tardive. Structuré autour d'un chemin, il comprenait un bâtiment, une forge, des fosses de plantation de vignes, des murs de terrasse et un ensemble de sépultures dont les emplacements étaient signalés par des amas de pierres [47]. La fouille de cet ensemble funéraire a mis au jour trois tertres funéraires construits en pierres d'environ 5 m de diamètre et de plus de 1 m de haut (**fig. 10**). Fossilisés par environ 1 m de

[46] PEZIN & WUSCHER 2005.

[47] *Ibid.*



Figure 10

Amélie-les-Bains, vues des tertres funéraires du Bronze final (cliché : Patrice Wuscher).

colluvions, ils émergeaient entre les tombes antiques et ont été pris pour des structures antiques lors du diagnostic. Malgré les moyens supplémentaires alloués à la fouille, seul l'un d'entre eux a pu être fouillé et a été daté du Bronze final II, avec des réaménagements au Bronze final IIIb [48], ce qui illustre les limites du diagnostic archéologique, qui malgré une lecture pluridisciplinaire, ne constitue qu'un échantillonnage spatial limité.

Au final, l'ouverture de sondages ciblés par un géomorphologue et un archéologue peut s'avérer opportune pour identifier les formations superficielles des terrains prospectés et pour adapter au mieux la localisation des sondages, en privilégiant les paléosols et les berges. Les successions stratigraphiques sont ensuite relevées par les archéologues dans l'ensemble des sondages, tandis que les géomorphologues décrivent toutes les unités stratigraphiques à partir de séquences de référence et donnent un cadre morphosédimentaire général. L'investissement consenti pour reconstituer le fonctionnement hydrosédimentaire et géomorphologique des cours d'eau et des versants permet quant à lui de donner un cadre précis à l'évolution des paysages et de mieux comprendre les fortes interactions entre les dynamiques environnementales et les modalités de peuplement. Il convient également de prendre en compte les impacts anthropiques récents, comme celui non négligeable lié à la mécanisation de l'agriculture qui a abouti à un lissage généralisé des paysages, notamment dans les plaines, enfouissant parfois les vestiges archéologiques sous plusieurs mètres de colluvions en bas des versants.

DU PATRIMOINE À LA RECHERCHE

LA GENÈSE DES FORMES DU RELIEF

À Amélie-les-Bains, les opérations d'archéologie préventive ont permis d'écrire l'histoire géomorphologique holocène d'un tronçon de vallée qui n'était pas accessible sans terrassements mécaniques [49]. Ces opérations permettent également d'aborder des questions géomorphologiques à des échelles vastes, tant chronologiques que spatiales [50]. Ainsi, le fonctionnement quaternaire des terrasses de l'Yonne a été

révélé par des travaux d'archéologie préventive [51], tandis que l'étude du remplissage des fonds de vallée du bassin français de l'Escaut permet d'aborder la néotectonique pléistocène du bassin de Paris et du bassin belgo-néerlandais et participe à reconstituer l'évolution paléogéographique de la mer du Nord [52].

En Alsace, les grandes lignes de l'évolution géomorphologique depuis la formation du Fossé rhénan ont été analysées dans les années 1980 à partir d'une synthèse des données lithostratigraphiques et topographiques disponibles [53]. Le rôle prépondérant de la néotectonique dans cette évolution a été mis en avant. L'épaisseur des formations quaternaires, notamment les plus récentes liées au dernier cycle interglaciaire-glaciaire, Eémien et Weichsélien (environ entre 130 000 et 13500 ans avant l'actuel) et à l'Holocène (depuis environ 13500 avant le présent), était toutefois complexe à apprécier. Du coup, il est difficile d'évaluer la part de la néotectonique dans l'évolution géomorphologique de la moitié sud du Fossé rhénan durant les cent derniers millénaires. Si la relecture récente des nombreux forages et profils sismiques réalisés dans la région permet de mieux cerner la géométrie du fossé et de son remplissage, elle n'a pas permis d'aller beaucoup plus loin dans l'évaluation de l'épaisseur des formations sédimentaires weichséliennes [54]. Cela tient surtout à l'absence d'un horizon repère interglaciaire au sein des masses de graviers du sud de la région et au manque de nouveaux forages et de datations absolues dans les niveaux argileux et organiques intercalés au nord, autour de Strasbourg. Les diagnostics archéologiques menés préalablement à la construction de la Ligne à Grande Vitesse (LGV) Strasbourg-Paris, ainsi que ceux liés aux travaux du Contournement Ouest de Strasbourg (COS), apportent des éléments importants à ces questions. Ils ont ainsi permis de vérifier l'étendue des alluvions pléistocènes à l'ouest d'Achenheim et de préciser l'extension des loess autour de Strasbourg [55] ainsi que dans le champ de fractures de Saverne [56]. Ils permettent également de préciser l'épaisseur de certaines formations superficielles. Ainsi, l'épaisseur des loess du Kochersberg n'excède-t-elle pas en moyenne 5 à 10 mètres sur le tracé du COS, sauf sur les versants de Vendenheim et de Kolbsheim où elle atteint près de 20 mètres [57].

[48] PEZIN 2014.

[49] WUSCHER & PEZIN 2010.

[50] BRUXELLES 2012.

[51] CHAUSSÉ 2003.

[52] DESCHODT 2014.

[53] VOGT 1992.

[54] ELSASS *et al.* 2006 et <http://rgf.brgm.fr/page/vosges-fosse-rhenan-pilote-rgf>

[55] SCHNEIKERT 2017, MOINE *et al.* 2017.

[56] SCHNEIDER & ERTLEN 2017.

[57] SCHNEIKERT 2017, MOINE *et al.* 2017.

L'apport géologique et géomorphologique des diagnostics archéologiques ne se limite toutefois pas aux grands travaux. Ainsi « si certaines observations peuvent être considérées comme mineures, aucune n'est dénuée d'importance » [58]. Par exemple, le diagnostic mené sur 2,6 ha à Eckwersheim (Alsace), préalablement à la construction d'un lotissement, a mis au jour des formations oligocènes presque affleurantes [59], alors que la carte géologique et les tranchées proches du COS semblaient montrer que les collines du secteur étaient façonnées dans une épaisse couverture loessique. Au débouché de la vallée de la Thur, un diagnostic mené sur 2 ha à Pulversheim, a quant à lui mis en évidence des formations torrentielles graveleuses protohistoriques [60] dans un secteur où les dépôts cartographiés attribués au Weichsélien ont une morphologie faiblement différenciée. Surtout, l'absence de déformations reconnues dans l'ensemble des diagnostics archéologiques menés en Alsace durant les deux dernières décennies incite à relativiser la part de la néotectonique dans l'évolution du Fossé rhénan durant les derniers millénaires.

LES DYNAMIQUES PAYSAGÈRES DES DERNIERS MILLÉNAIRES

De fait, même si les diagnostics archéologiques sont implantés principalement dans les zones soumises à des aménagements lourds (autoroutes, zones d'activités et lotissements) ou autour des sites archéologiques connus, et si moins de 25% des surfaces aménagées en France font l'objet d'un diagnostic archéologique [61], la masse de données collectées pendant près de trois décennies a permis de reconstituer les milieux et les territoires des sociétés du passé, comme par exemple pour les sociétés du Paléolithique dans le Sud-Ouest [62].

Les possibilités géoarchéologiques offertes par les données de l'archéologie préventive peuvent aussi être illustrées par les travaux menés sur la plaine littorale autour de Montpellier depuis le Mésolithique. Les nombreux diagnostics et fouilles ont apporté de multiples éléments à la compréhension de leur évolution paléogéographique. En outre, ces paysages deltaïques qui sont de riches milieux vivriers (eau douce, terres cultivables, abondance des ressources), ont été fortement investis par les populations. Réussir à dessiner ces paléopaysages devenait alors une nécessité pour mieux appréhender les modes de peuplement au cours de l'Holocène. On a ainsi choisi d'utiliser l'ensemble de la documentation disponible pour cartographier le littoral du Languedoc à différentes périodes, que ce soient les données publiées par les chercheurs travaillant sur les paléolittoraux ou sur la

variation du niveau marin postglaciaire, les données de fouilles, également les nombreux sondages géotechniques référencés sur le Sig en ligne Infoterre [63]. Les cartes proposées ici (fig. 11) correspondent à cette compilation de données, mais ne sont qu'un état des lieux temporaire. En effet, de nombreuses questions demeurent, en particulier sur la hauteur réelle du niveau marin selon les périodes avec des incertitudes altitudinales pouvant atteindre plusieurs mètres [64]. Pour autant, elles permettent d'appréhender les paléopaysages des différentes phases de peuplement reconnus sur le littoral et d'envisager des liens sérieux entre les populations anciennes et le territoire dont elles disposaient et qu'elles géraient en fonction de leurs besoins.

DES TRACES DES PREMIERS AGRICULTEURS À L'ANTHROPOCÈNE

Discuter la part de l'Homme et du climat dans les changements environnementaux holocènes enregistrés dans les fonds de vallées est une question ancienne en géoarchéologie. Les travaux pionniers menés en Limousin, notamment sur les chantiers de l'autoroute A20, illustrent bien cette démarche. Ils ont notamment montré l'opposition forte entre l'Holocène ancien et moyen, où l'anthropisation reste discrète et localisée, et l'Holocène récent, caractérisé par une modification majeure et irrémédiable des milieux [65]. Des travaux similaires ont été également menés en Alsace, sur les colluvions et les paléosols recoupés par la LGV Strasbourg-Paris dans les paysages loessiques du Kochersberg, avec des sols attractifs pour les agriculteurs et des matériaux sensibles à la pédogenèse et à l'érosion [66].

Dans le Bassin parisien, plusieurs centaines de sondages à la tarière et plusieurs dizaines d'opérations d'archéologie préventive menés pendant près de 30 ans ont permis de détailler l'évolution tardiglaciaire et holocène des grandes et des moyennes vallées, notamment l'Oise, la Marne, la Seine, le Croule et la Beuveronne [67]. Ils ont mis en évidence des remplissages emboîtés,

[58] DESCHODT 2014 p. 555.

[59] CROUTSCH 2019.

[60] SCHNEIKERT & WUSCHER 2016.

[61] COLLART 2012.

[62] BRUXELLES & JARRY 2011, BERTRAN *et al.* 2013.

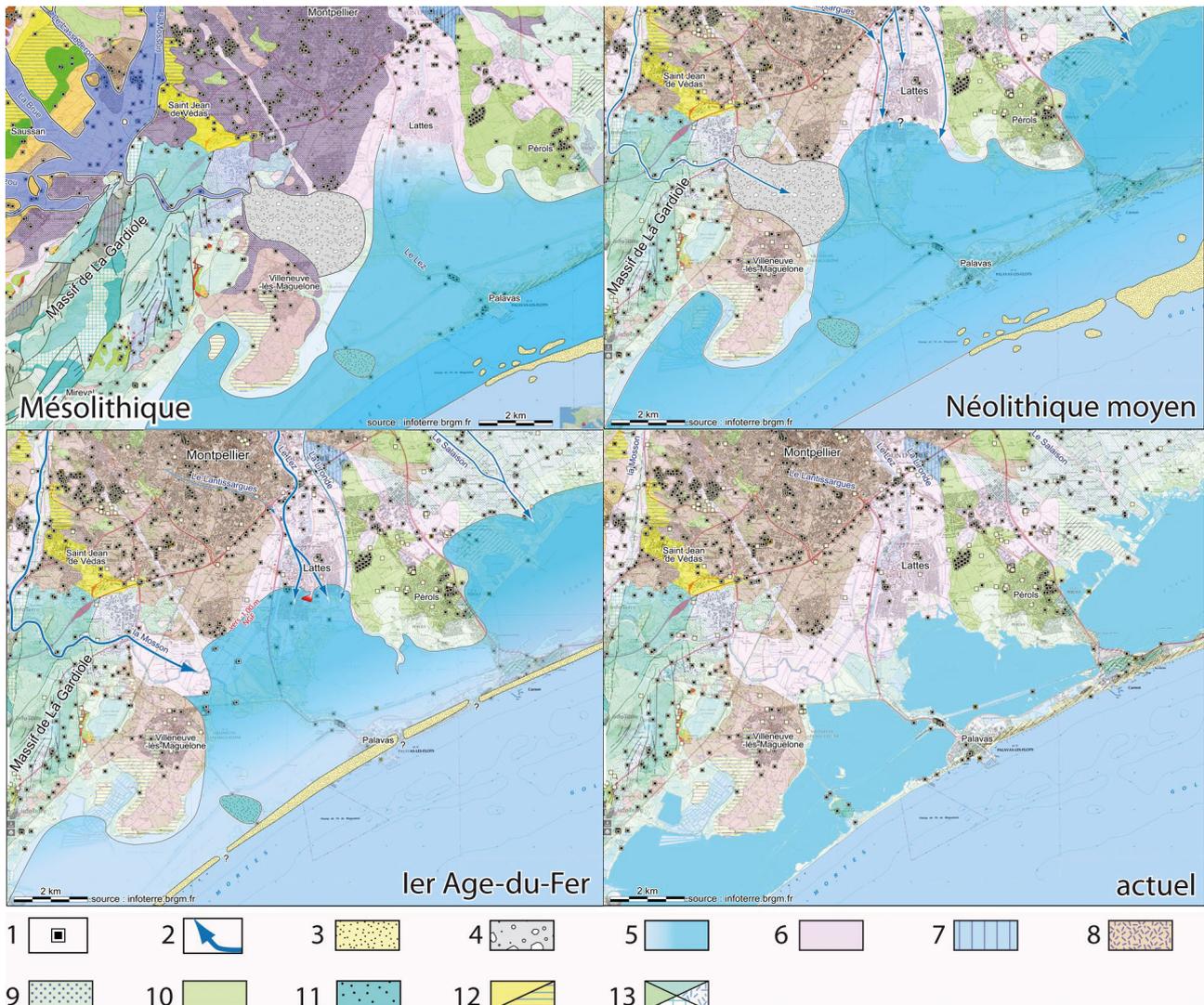
[63] <http://infoterre.brgm.fr/>

[64] RAYNAL *et al.* 2010, VACCHI *et al.* 2016.

[65] ALLÉE *et al.* 1997, ALLÉE *et al.* 2006.

[66] ERTLEN *et al.* 2012, SCHNEIDER *et al.* 2014.

[67] PASTRE *et al.* 2014.



1. sondages BDSS du BRGM (<http://infoterre.brgm.fr/>), 2. paléochenaux du Lez, 3. ancien cordon littoral (-8,00/-10,00 m NGF), 4. alluvions de la Mosson au dessous des -4,00/-7,50 m NGF, 5. étendue schématique possible de la lagune, 6. Alluvions récentes du Quaternaire, 7. Limons et loess du Lez, 8. Colluvions anciennes du Quaternaire, 9. Faciès astien du Pléistocène, 10. Cailloutis d'origine rhodanienne d'âge villafranchien, 11. sables et grès volcano-détritiques, 12. Calcaires coquillers et marnes pliocènes, 13. Calcaires et marnes jurassiques

Figure 11
Évolution du littoral du Languedoc autour de Montpellier au cours de l'Holocène.

caractérisés par une bipartition des enregistrements, avec des dépôts principalement organiques et localisés jusqu'au Subboréal, puis des remblaiements massifs presque exclusivement minéraux. Toutefois, seules les dynamiques des grands bassins versants étaient reconstituées, ce qui n'était pas toujours compatible avec les problématiques territorialisées des archéologues [68]. Il a donc semblé intéressant de travailler sur les colluvions de quatre vallons secs drainant des petits bassins-versants loessiques du nord-ouest de l'Île-de-France [69]. Comme dans les grandes vallées, leur remplissage est bipartite, constitué d'un luvisol cumulé recouvert par des colluvions à dominante minérale beige, entrecoupées parfois d'horizons

brunifiés d'une quarantaine de centimètres d'épaisseur. Si les luvisols présents à la base de ces séquences présentent des traces d'occupations néolithiques (charbons, fragments de céramiques, traces de rubéfaction), leur fossilisation par des dépôts massifs de colluvions est toujours d'âge protohistorique (fig. 12).

[68] WUSCHER *et al.* 2012

[69] https://www.researchgate.net/publication/285588081_Des_limons_loessiques_des_hommes_et_de_l'erosion_dans_le_nord-ouest_de_l'Île-de-France_durant_l'Holocene_stratigraphie_datations_et_micro-morphologie_a_Guitrancourt_Yvelines

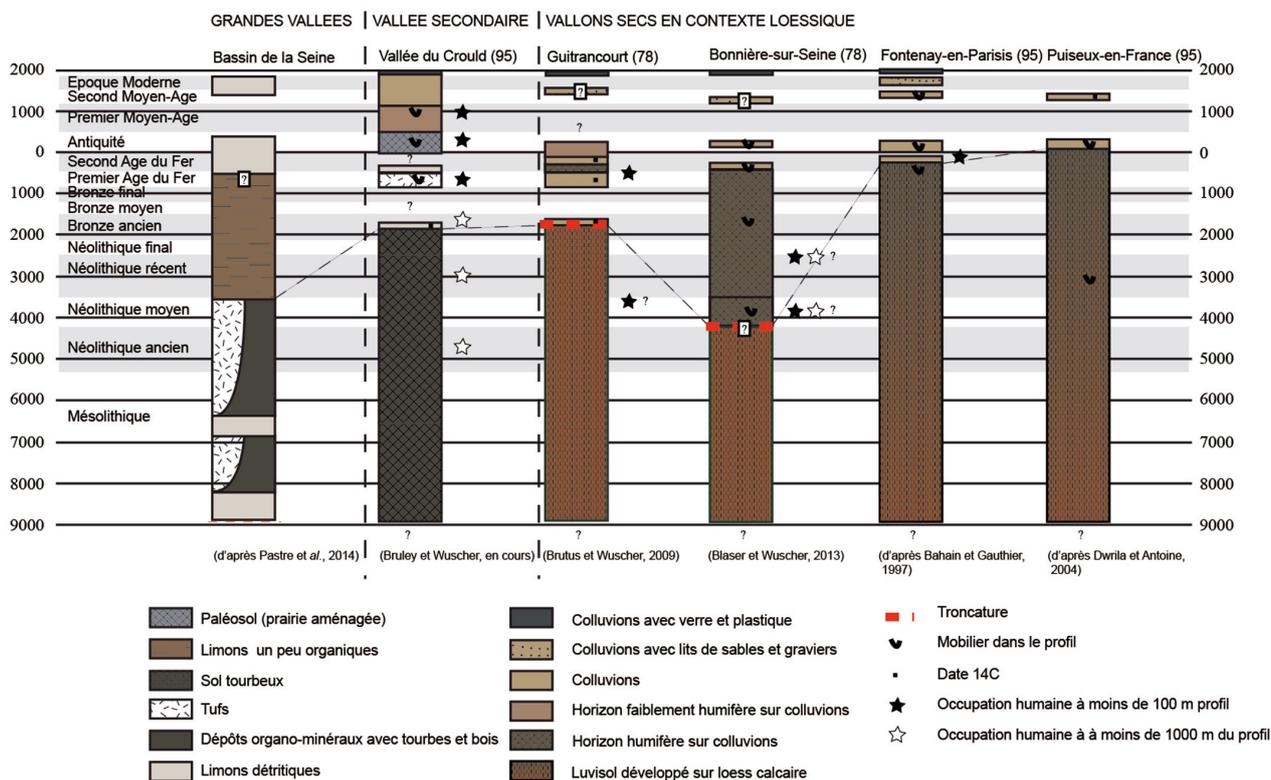


Figure 12

Proposition de corrélation des remplissages holocènes de vallons-secs en contexte loessique avec le profil sédimentaire synthétique du bassin de la Seine et avec le log synthétique d'une séquence de la vallée secondaire du Crould (95).

Si la Protohistoire semble marquer une rupture dans le fonctionnement des bassins versants [70], l'extension et l'ampleur des terrassements soumis aux travaux d'archéologie préventive, comme par exemple les travaux du contournement ouest de Strasbourg ou l'extension de la zone commerciale de Lampertheim au nord de Strasbourg, montrent que les remaniements contemporains sont absolument sans commune mesure avec les expressions sédimentaires protohistoriques et historiques. Leur quantification systématique apporterait des données locales complémentaires aux travaux en cours sur les faciès, les marqueurs géochimiques et les bilans sédimentaires de l'Anthropocène à partir du milieu du xx^e siècle [71].

CONCLUSION

La démarche présentée ici, qui associe géomorphologues et archéologues, a connu un essor majeur grâce au développement de l'archéologie préventive à partir du milieu des années 1980. Elle combine la réalisation de modèles de localisation et de conservation des sites, à partir de travaux de terrain et d'études documentaires, et les diagnostics archéologiques. Ancrée localement, adaptée au contexte

topographique et géologique, elle concerne tous les acteurs de l'archéologie préventive hexagonale. Les exemples du Paléolithique aux périodes historiques présentés ici montrent qu'elle constitue à ce jour une méthode particulièrement adaptée pour trouver les sites archéologiques menacés par les travaux d'aménagement du territoire. Ces exemples illustrent également la possibilité d'écrire une géohistoire à partir de matériaux dont la collecte est imposée par une nécessité patrimoniale : sauver les sites archéologiques menacés par les travaux d'aménagement du territoire. Au final, « les disciplines des sciences de la terre sont, à part entière, des outils d'investigation du patrimoine archéologique » [72].

Si la démarche a jusqu'à présent surtout été appliquée avec succès à la sauvegarde et à l'étude des sites de la Préhistoire ancienne, elle ne l'est pas encore de façon uniforme sur l'ensemble du territoire. Elle gagnerait ainsi à être mise en œuvre plus systématiquement et mieux prise en compte lors des prescriptions, pour trouver les sites encore peu documentés,

[70] Voir par exemple ALLÉE & LESPEZ 2006.

[71] Voir par exemple WATERS et al. 2018.

[72] KRIER 1994.

comme par exemple les sites néolithiques, protohistoriques ou historiques stratifiés en fonds de vallées, notamment dans les vallées montagnardes ou dans les zones littorales. Il conviendrait également de mieux prendre en compte l'évolution récente des milieux et surtout la mécanisation des campagnes pour guider les diagnostics, mais aussi pour interpréter les résultats. Par ailleurs, une meilleure intégration des recherches géomorphologiques et géoarchéologiques dans les travaux archéologiques est souhaitable. L'organisation de séminaires régionaux réguliers associant chercheurs et acteurs du préventif serait une des façons d'y arriver, en parallèle des rencontres nationales et internationales déjà existantes. Le développement des outils

géophysiques sur les fouilles archéologiques est également une piste prometteuse, si ces travaux intègrent les données pédologiques et sédimentaires collectées par les géoarchéologues [73]. Enfin, pour participer aux réflexions des communautés de chercheurs et pour développer des problématiques régionales, il ne faut pas oublier la nécessité de moyens humains suffisants et constants, pas toujours compatibles avec les tensions économiques d'une discipline minée par la mise en concurrence des différents opérateurs de l'archéologie préventive. ■

[73] Voir par exemple VELLA *et al.* 2013.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLEE, Philippe, BOUMEDIENE, Farid, CONTE, Patrice, DIOT, Marie-Françoise, LEHERICY, Muriel, PETIT, Florent & VALADA, Bernard, 2006**, « Des archives sédimentaires aux dynamiques holocènes, l'exemple de deux études géoarchéologiques en Limousin », dans Philippe Allée & Laurent Lespez (dir.), *L'érosion entre société, climat et paléoenvironnement, Table ronde en l'honneur du Professeur René Neboit-Guilhot, Clermont-Ferrand 25-26-27 mars 2004*, Clermont-Ferrand, p. 263-270.
- ALLEE, Philippe, DIOT, Marie-Françoise, REYNET, Jean-Michel & VALADAS, Bernard, 1997**, « Trois mille ans d'enregistrement sédimentaire dans les fonds de vallons du Limousin », *La dynamique des paysages protohistoriques, antiques, médiévaux et modernes*, Sophia Antipolis, p. 365-387.
- ALLEE, Philippe & LESPEZ, Laurent, 2006**, « De l'océanique au méditerranéen, la disparité des réponses morphosédimentaires holocènes, dans les massifs anciens européens », dans Philippe Allée & Laurent Lespez (dir.), *L'érosion entre société, climat et paléoenvironnement, Table ronde en l'honneur du Professeur René Neboit-Guilhot, Clermont-Ferrand 25-26-27 mars 2004*, Clermont-Ferrand, p. 203-214.
- ANTOINE, Philippe, BAHAIN, Jean-Jacques, AUGUSTE, Philippe, FAGNARD, Jean-Pierre, LIMONDIN-LOZOUET, Nicole & LOCHT, Jean-Luc, 2011**, « Quaternaire et préhistoire dans la vallée de la Somme : 150 ans d'histoire commune », dans Arnaud Hurel & Noël Coye (dir.), *Dans l'épaisseur du temps. Archéologues et géologues inventent la préhistoire*, Paris, p. 341-381.
- AUXIETTE, Ginette & DUBOULOZ, Jérôme, 2009**, « Héritages d'une expérience trentenaire d'archéologie préventive dans la vallée de l'Aisne », dans Jean-Paul Demoule & Christian Landes (dir.), *La fabrique de l'archéologie en France*, Paris, p. 147-162.
- BERTRAN, Pascal, SITZIA, Luca, BANKS, William E., BATEMAN, Mark D., DEMARS, Pierre-Yves, HERNANDEZ, Marion, LENOIR, Michel, MERCIER, Norbert & PRODEO, Frédéric, 2013**, « The Landes de Gascogne (southwest France): periglacial desert and cultural frontier during the Palaeolithic », *Journal of Archaeological Science*, 40/5, p. 2274-2285.
- BLONDEAU, Cécile, 2018**, *Oberhergheim (Haut-Rhin) : « Oberfeld », rue de Rouffach*, rapport de diagnostic, Sélestat.
- BLONDEAU, Cécile & WUSCHER, Patrice, 2017**, *Ruelisheim (Haut-Rhin) : lotissement « Les Jonquilles » : Une occupation Néolithique et Bronze ancien*, Sélestat.
- BORDERIE, Quentin, CHAMAUX, Gabriel, KREUTZER, Sebastian & AHMED-DELACROIX, Eric Nelson, 2019**, « Occupations humaines et chronostratigraphie du gisement pléistocène d'Illiers-Combray (Eure-et-Loir, France) : de nouveaux éléments pour le SIM 5b », *Bulletin de la Société Préhistorique Française* 116/1, p. 7-28.
- BORDERIE, Quentin, CHAMAUX, Gabriel, ROUSSAFFA, Hugo, DOUARD, Michel, FENCKE, Emilie, RODOT, Marie-Angélique, PERRICHON, Pierre & SELLES, Hervé, 2017**, « La couverture loessique d'Eure-et-Loir (France) : potentiel pédo-sédimentaire et organisation spatiale ; objectifs, méthodes et premiers résultats du programme QuOrEL », *Quaternaire* 28/3, p. 389-400.
- BRAVARD, Jean-Paul, BURNOUF, Joëlle & VEROT, Agnès, 1989**, « Géomorphologie et archéologie dans la région lyonnaise : questions et réponses d'un dialogue interdisciplinaire », *Bulletin de la Société préhistorique française* 86/10, p. 429-440.
- BRUXELLES, Laurent, 2010**, « Diagnostic archéologique et géomorphologie en Midi-Pyrénées : réflexions méthodologiques concernant la recherche de vestiges paléolithiques », dans Pascal Depaepe & Frédéric Séara (éd.), *Le diagnostic des sites paléolithiques et mésolithiques, actes du séminaire des 5 et 6 décembre 2006*, Paris, p. 88-95.

- BRUXELLES, Laurent, 2012**, « De la contribution à la synergie : une décennie de relations archéologues-géomorphologues à l'Inrap », *Archéopages* Hors série 3, p. 21-25.
- BRUXELLES, Laurent, BERTHET, Anne-Laure, CHALARD, Pierre, COLONGE, David, DELFOUR, Géraldine, JARRY, Marc, LELOUVIER, Laure-Amélie, ARNOUX, Thomas & ONEZIME, Olivier, 2003**, « Le paléolithique inférieur et moyen en Midi toulousain : nouvelles données et perspectives de l'archéologie préventive », *Paléo* 15, p. 7-28.
- BRUXELLES, Laurent & JARRY, Marc, 2011**, « Climatic conditions, settlement patterns and cultures in the Paleolithic: The example of the Garonne Valley (southwest France) », *Journal of Human Evolution* 61/5, p. 538-548.
- CASTANET, Cyril, 2008**, *La Loire en val d'Orléans : dynamiques fluviales et socio-environnementales durant les derniers 30 000 ans : de l'hydrosystème à l'anthroposystème*, thèse de doctorat, Paris.
- CHAUSSE, Christine, 2003**, *Les nappes alluviales de la basse vallée de l'Yonne, approche géométrique et chronostratigraphique et l'apport de l'étude de la Nappe de Soucy à la compréhension des occupations du Paléolithique inférieur de Soucy*, thèse de doctorat, Lille.
- CLOOTS, Anne-Rose, MAIRE, Gérard, SCHNEIDER, Charles, CARADO, Annick & TRICART, Jean, 1973**, *Carte géomorphologique détaillée de la France 1:50, 000. XXXVIII-16, Strasbourg*, Paris.
- COLLART, Jean-Luc, 2012**, « L'archéologie préventive en France : le cadre réglementaire et son application », *Development-led Archaeology in Northwest Europe, Proceedings of a Round Table at the University of Leicester 19th-21st November 2009*, Leicester, p. 56-99.
- COLONGE, David, ARNOUX, Thomas, BRUXELLES, Laurent, CHEVREUSE, Fabrice, D'AGGOSTINO, Antonio, JAMOIS, Marie-Hélène & ONEZIME, Olivier, 2004**, *Aérodrome de Brive - Souillac communes de Nespouls (Corrèze, Limousin) Cressensac (Lot, Midi-Pyrénées)*, Rapport final d'opérations de sondages de diagnostic et évaluations, Rapport de diagnostic, Pessac.
- CONFALONIERI, Joël & LE JEUNE, Yann, 2012**, « Le site mésolithique de la Haute-Ile à Neuilly-sur-Marne (Seine-Saint-Denis) : premiers résultats », dans Boris Valentin, Bénédicte Souffi, Ducrocq Thierry (éd.), *Paléolithique. Recherches sur les habitats de plein air entre Loire et Neckar Actes de la table ronde de Paris, 26 et 27 novembre 2010*, p. 51-67.
- CROUTSCH, Christophe, 2019**, *Eckwersheim « Lotissement auf die Niedermatten »*, Rapport de diagnostic, Sélestat.
- DAUGAS, Jean-Pierre & BONIN, Thierry (éd.), 2006**, *Le diagnostic archéologique en milieu rural, actes du séminaire de Glux-en-Glenne 25-27 octobre 2005*, Paris.
- DAVEAU, Isabelle, 2007**, *Port Ariane : Occupations et utilisation d'une zone humide lors des six derniers millénaires à Lattes (Hérault)*, Lattes.
- DEPAEPE, Pascal & SEARA, Frédéric (éd.), 2010**, *Le diagnostic des sites paléolithiques et mésolithiques, actes du séminaire des 5 et 6 décembre 2006*, Paris.
- DESCHODT, Laurent, 2010**, « L'exemple d'une campagne de sondages géologiques préalables au diagnostic archéologique », dans Pascal Depaepe & Frédéric Séara (éd.), *Le diagnostic des sites paléolithiques et mésolithiques, actes du séminaire des 5 et 6 décembre 2006*, Paris, p. 8-12.
- DESCHODT, Laurent, 2014**, *Chronostratigraphie et paléoenvironnements des fonds de vallée du bassin français de l'Escaut*, thèse de doctorat, Paris.
- DUBOULOZ, Jérôme, 2003**, « L'évaluation des méthodes de diagnostic : simulations sur des sites de l'Aisne », *Les Nouvelles de l'Archéologie* 91, p. 46-50.
- DUCCROQ, Thierry, 2010**, « La détection des sites mésolithiques dans le nord de la France », dans Pascal Depaepe & Frédéric Séara (éd.), *Le diagnostic des sites paléolithiques et mésolithiques, actes du séminaire des 5 et 6 décembre 2006*, Paris, p. 30-34.
- ELSASS, Philippe, HUGGENBERGER, Peter & WIRSING, Gunther, 2006**, *Structure hydrogéologique et caractéristiques hydrauliques, INTERREG III A : MoNit « Modélisation de la pollution des eaux souterraines par les nitrates dans la vallée du Rhin Supérieur »*, Karlsruhe.
- ERTLEN, Damien, GEBHARDT, Anne, SCHNEIDER, Nathalie, DURAND, Frédérique, THOMAS, Johann, MICHLER, Matthieu, SCHNEIKERT, François, BOËS, Eric & SCHWARTZ, Dominique, 2012**, « Anthropisation et érosion agraire dans un paysage loessique (Bas-Rhin, France) », dans Frédéric Bertinello & Frank Braemer (dir.), *Variabilités environnementales, mutations sociales. Nature, intensités, échelles et temporalités des changements, XXXIIe rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes*, Antibes, p. 85-92.
- FORRER, Robert, 1925**, *Les éléphants, hippopotames et l'homme de l'Alsace quaternaire: étude de géographie paléolithique régionale*, Colmar.
- GUILHOT, Jean-Olivier, 2018**, *Bilan sur la mise en place des commissions territoriales de la recherche archéologique (CTRA) et Rapports d'activité 2017 des CTRA*, Paris.
- HUREL, Arnaud & COYE, Noël, 2011**, *Dans l'épaisseur du temps. Archéologues et géologues inventent la préhistoire*, Paris.
- JUNG, Cécile, JORDA, Christophe, RASCALOU, Pierre & SENDRA, Benoît, 2017**, *Céreirède Maera (Lattes, Hérault)*, Rapport de diagnostic, Nîmes.
- KRIER, Vincent, 1994**, « Les disciplines des sciences de la terre et l'archéologie de sauvetage : leçons d'une expérience », *Les Nouvelles de l'Archéologie* 58, p. 43-44.
- KRIER, Vincent, 2004**, *La plaine alluviale de l'Oise : milieu et système fluvial ; stratigraphie des formations alluviales et archéologie*, Saint-Ouen-l'Aumône.
- LEBRET, Patrick & HALBOUT, Hervé, 1991**, *Le quaternaire dans le Val d'Oise*, Caen.
- LOCHT, Jean-Luc, SELLIER, Nathalie, COUTARD, Sylvie, ANTOINE, Pierre & FERAY, Philippe, 2010**, « La détection de sites du Paléolithique ancien et moyen dans le nord de la France : approche particulière », dans Pascal Depaepe & Frédéric Séara (éd.), *Le diagnostic des sites paléolithiques et mésolithiques, actes du séminaire des 5 et 6 décembre 2006*, Paris, p. 49-57.
- MALRAIN, François, 2008**, « Silence au fond des vallées », *Constructions de l'archéologie*, Paris, p. 119-120.

MARMET, Eric, BEST, Christine & TABBAGH, Alain, 2002, « Prospection systématique par sondages à la pelle mécanique : limites liées à la probabilité de découverte de sites archéologiques », *ArchéoSciences, revue d'Archéométrie* 26/1, p. 11-21.

MARSAC, Romain, ARD, Vincent, BOLO, Aurélien, DUSCHESNES, Sylvie, FABRE, Magali, FARGE, Antoine, FOREST, Vianney, GANDELIN, Muriel, GLEIZE, Yves, HAMON, Caroline, JORDA, Christophe, LAURENT, Amélie, LEA, Vanessa, MARTIN, Sophie, MENS, Emmanuel, VINOLAS, Frédéric & WATTEZ, Julia, 2019, *Ligne Grande Vitesse Contournement de Nîmes et Montpellier, Secteur 3 (Lattes, Hérault), La Céreirède-Rauze Basse. Un monument funéraire du Chasséen récent*, Rapport Final d'Opération (fouille préventive), Montpellier.

MOINE, Olivier, WUSCHER, Patrice, KRAUSS, Lydia, TAYLOR, Samuel, VILLA, Valentina & ZENS, Jörg, 2017, « Séries loessiques, préhistoire et variabilité environnementale millénaire des deux dernières périodes glaciaires à Achenheim », *Le Quaternaire du Rhin supérieur, France, Allemagne et Suisse. Livret-guide de l'excursion Afeq CNF-INQUA 17-19 mai 2017*, Sélestat, p. 33-39.

MORDANT, Daniel, 1994, « L'archéologie en gravières vue à travers l'exemple de la Bassée », *Les Nouvelles de l'Archéologie* 58, p. 36-40.

OTT Matthieu & TARROU Liliane, 2013, *Doublement de l'autoroute A9, contournement de Montpellier, secteur 2 (Lattes, Hérault)*, Rapport de diagnostic.

PASTRE Jean-François, 1994, « Les recherches géomorphologiques et paléo-environnementales liées à l'archéologie de sauvetage : quelques vues d'ensemble », *Les Nouvelles de l'Archéologie* 58, p. 41-42.

PASTRE, Jean-François, LEROYER, Chantal, LIMONDIN-LOZOUET, Nicole, ANTOINE, Pierre, CHAUSSE, Christine, GAUTHIER, Agnès, GRANAI, Salomé, LE JEUNE, Yann & WUSCHER, Patrice, 2014, « L'Holocène du Bassin parisien (France), apports de l'étude géoécologique et géoarchéologique des fonds de vallées », dans Nathalie Carcaud & Gilles Arnaud-Fassetta (dir.), *La géoarchéologie française au XXI^e siècle*, Paris.

PEZIN, Annie, 2014, *Amélie-les-Bains, Camp de las Basses, entre fleuve et versant, de l'âge du Bronze à l'Antiquité*, rapport de fouille préventive, Nîmes.

PEZIN, Annie & WUSCHER, Patrice, 2005, *Amélie-les-Bains (Pyrénées-Orientales), Camps de las Basses : occupations humaines de l'âge du Bronze à l'époque moderne, entre fleuve et versant, en moyenne vallée du Tech*, Rapport de diagnostic, Montpellier.

PIERREVELCIN, Gilles, BONNAIRE, Emmanuelle, HIGELIN, Mathias, LEPROVOST, Céline, PASCUTTO, Émilie, PUTELAT, Olivier, ROTH-ZEHNER, Muriel & WUSCHER, Patrice, 2016, *Ensisheim (68), Reguisheimer Feld/RD201 tranche 2 : Un nouvel habitat de La Tène finale à Ensisheim « Reguisheimer Feld »*, rapport de fouille préventive, Sélestat.

POMEROL, Charles, BRICON, Claude & GUERNET, Claude, 1969, *Carte géologique détaillée de la France, Étampes*, Orléans.

RASCALOU, Pierre & BEL, Valérie, 2013, *Ligne Grande Vitesse Contournement de Nîmes et Montpellier, Secteur 3 (Lattes, Hérault)*, Rapport de diagnostic, Nîmes.

RAUX, André, BEL, Valérie, JORDA, Christophe & SEJALON, Pierre, 2013, *Doublement de l'autoroute A9, contournement de Montpellier, secteur 3 (Lattes, Hérault)*, Rapport de diagnostic, Nîmes.

ROTH-ZEHNER, Muriel, BACHELLERIE, François & WUSCHER, Patrice, 2016, *Ensisheim (68) : « Reguisheimer Feld », ZAID de Ensisheim/Réguisheim [tranche 3]*, rapport de diagnostic, Sélestat.

ROTH-ZEHNER, Muriel, DELLOUL, Marion, GRISELIN, Sylvain, LEPROVOST, Céline, RAULT, Estelle & WUSCHER, Patrice, 2019, *Ensisheim, Haut-Rhin, ZAID de Ensisheim / Réguisheim : Tranche 4, Reguisheimer Feld*, rapport de diagnostic, Sélestat.

SCHNEIDER, Nathalie & ERTLEN, Damien, 2017, *Géoarchéologie, des Vosges au Kochersberg : les données de diagnostic et de fouilles de la Ligne à Grande Vitesse Est Européenne (LGVEE). Rapport annuel du projet « Empreintes de l'Homme dans l'Environnement, entre Vosges et Rhin »*, Strasbourg.

SCHNEIDER, Nathalie, ERTLEN, Damien, DURAND, Frédérique, NOCUS, Noémie, GEBHARDT, Anne, THOMAS, Yohann, MICHLER, Matthieu, SCHNEIKERT, François & BOËS, Éric, 2014, « Diagnostic LGV Est Européenne en Alsace (France). Suivi géoarchéologique et études paléoenvironnementales : les clés de lecture du paysage », dans Nathalie Carcaud & Gilles Arnaud-Fassetta (dir.), *La géoarchéologie française au XXI^e siècle*, Paris, p. 35-45.

SCHNEIKERT, François, 2017, *Contournement Ouest de Strasbourg, Tronçon 2. Achenheim, Breuschwickersheim, Ernolsheim-sur-Bruche, Ittenheim, Kolbsheim, Osthoffen (Bas-Rhin) : A355*, rapport de diagnostic, Sélestat.

SCHNEIKERT, François & WUSCHER, Patrice, 2016, *Pulversheim (68) : « Ochsenweidle », rue de Cernay / rue de Mulhouse*, rapport de diagnostic, Sélestat.

SOUFFI, Bénédicte, BLASER, Frédéric, VALENTIN, Boris, 2009, *Paléolithique et Mésolithique en régions Centre et Ile-de-France : modalités d'implantation et de conservation des sites*, rapport de projet d'activité scientifique (PAS), INRAP.

MEGNIEN, François, 1987, *Carte géologique de la France à 1:50 000, Corbeil-Essonnes*, Orléans.

VACCHI, Matteo, MARRINER, Nick, MORHANGE, Christophe, SPADA, Giorgio, FONTANA, Alessandro & ROVERE, Alessio, 2016, « Multiproxy assessment of Holocene relative sea-level changes in the western Mediterranean: Sea-level variability and improvements in the definition of the isostatic signal », *Earth-Science Reviews* 155, p. 172-197.

VELLA, Marc-Antoine, GHILARDI, Matthieu, DIOUF Ousmane, PARISOT, Jean-Claude, HERMITTE, Daniel, PROVANSAL, Mireille, FLEURY, Jules, DUSSOUILLEZ, Philippe, DELANGHE-SABATIER, Doriane, DEMOTTE, François, QUESNEL, Yoann, HARTMANN-VIRNICH, Andreas, DELPEY, Yhann, BERTHELOT, Michel, BICKET, Andrew, 2013, « Géoarchéologie du Rhône dans le secteur du pont Saint-Bénézet (Avignon, Provence, France) au cours de la seconde moitié du deuxième millénaire apr. J.-C. : étude croisée de géographie historique et des paléoenvironnements », *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 19/3, p. 287-310.

VOGT, Henri, 1992, *Le relief en Alsace : étude géomorphologique du rebord sud-occidental du Fossé rhénan*, Strasbourg.

WATERS, Colin N., FAIRCHILD, Ian J., MCCARTHY, Francine M. G., TURNEY, Chris S. M., ZALASIEWICZ, Jan & WILLIAMS, Mark, 2018, « How to date natural archives of the Anthropocene », *Geology Today* 34/5, p. 182-187.

WUSCHER, Patrice, BACHELLERIE, François, KOEHLER, Héroïse, DIEMER, Simon, GRISELIN, Sylvain, GOUDISSARD, Simon, FELIU, Clément, SCHNEIDER, Nathalie, PRACHT, Axel, FABRE, Magali, MOINE, Olivier, CLAUD, Emilie, SALOMON, Ferréol, RAMBEAU, Claire, SCHMITT, Laurent, SEVEQUE, Noémie, PREUSSER, Frank, ANTOINE, Pierre, RINTERKNECHT, Vincent, VILLA, Valentina, RIXHON, Gilles, BOËS, Eric, BASOGE, Florian & SCHWARTZ, Dominique, 2019, *Le Paléolithique et le Mésolithique de la Plaine d'Alsace et des collines sous-vosgiennes : reprise des données existantes, pistes pour détecter les sites et approches territoriales. Bilan de l'année 2018*, Strasbourg.

WUSCHER, Patrice, BLASER, Frédéric, BLASER, Romana, ROUPPERT, Vanessa, GRANCHON, Philippe, JOBIC, Françoise, BAYLE, Grégory, DELATTRE, Valérie, DU BOUËTIEZ DE KERORGUEN, Emmanuelle & LECONTE, Luc, 2013, *Le Thillay « les Grands Champs » (Ile-de-France, Val-d'Oise)*, Rapport de diagnostic, La Courneuve.

WUSCHER Patrice, BLASER Romana, CAMMAS Cécilia, DURAND Juliette, GLISONI Steve, SARON Emmanuelle & PASTRE Jean-François, 2012, « Des plateaux, des limons et des hommes : état des connaissances et questions sur les sols et l'érosion tardiglaciaires et holocènes en Ile-de-France », *Revue Archéologique d'Ile-de-France* 5, p. 5-28.

WUSCHER, Patrice, DIEMER, Simon, KOEHLER, Héroïse, BACHELLERIE, François, GRISELIN, Sylvain, GOUDISSARD, Simon, SCHNEIDER, Nathalie, SEVEQUE, Noémie, BASOGE, Florian, PREUSSER, Frank, MOINE, Olivier, BOËS, Eric, PRACHT, Axel, DETREY, Jean, LEFRANC, Philippe, ERTLEN, Damien & AFFOLTER, Jehan, 2018, *Le Paléolithique et le Mésolithique de la Plaine d'Alsace et des collines sous-vosgiennes : reprise des données existantes, pistes pour détecter les sites et approches territoriales. Bilan de l'année 2017*, rapport de Projet Collectif de Recherche, Strasbourg.

WUSCHER, Patrice & PEZIN, Annie, 2010, « Morphogenèse de la vallée du Tech à Amélie-les-Bains (Pyrénées-Orientales) durant l'Holocène et évolution des versants jusqu'à la fin de l'âge du Bronze », *Quaternaire* 21/4, p. 345-356.

LES VESTIGES ANTIQUES DE RENNAZ-NOVILLE (VAUD, SUISSE) ET LEUR CONTEXTE SÉDIMENTAIRE : NOUVELLES ÉVIDENCES DE L'ÉCROULEMENT DU *TAUREDUNUM*

Morgan MILLET¹, Michel GUÉLAT²

¹ Archeodunum SA, m.millet@archeodunum.ch

² Sediqa Géosciences sarl, michel.guelat@sediqa.ch

RÉSUMÉ

Des vestiges antiques ont été découverts à Rennaz-Noville, dans le sud-ouest de la Suisse, au débouché de la vallée du Rhône dans le lac Léman. Les coupes dégagées lors de la construction d'un canal ont révélé que le sommet de l'accumulation sédimentaire se compose d'un diamicton déformé et compartimenté reposant, selon une surface de cisaillement, sur des dépôts limniques. Inclus à la masse transportée, des paléosols renfermant des artefacts ont subi une déformation d'amplitude variable. Une centaine de structures archéologiques ont été mises au jour dans l'un d'entre eux, auxquelles s'ajoutent des maçonneries en position secondaire. Le mobilier collecté et les datations ¹⁴C convergent vers une occupation comprise entre le I^{er} et la fin du IV^e siècle ap. J.-C. Une occupation du Second âge du Fer, oblitérée par l'occupation antique, est également concernée par les mouvements de terrain. Tous les éléments de datation obtenus sont compatibles avec un glissement déclenché vers le milieu du VI^e siècle par l'écroulement dit du *Tauredunum*, en 563 ap. J.-C. Outre des éléments de chronologie inédits, les découvertes à Rennaz-Noville fournissent ainsi une nouvelle argumentation sur les effets de cette catastrophe en milieu terrestre.

MOTS-CLÉS

Plaine alluviale, Rhône, glissement, paléosols, époque gallo-romaine, La Tène, maçonneries, incinérations, sources historiques.

Ancient remains have been discovered in Rennaz-Noville, in southwestern Switzerland, where the Rhône Valley opens onto Lake Geneva. The stratigraphic sections documented during the construction of a canal revealed that the sedimentary sequence consists of a deformed and compartmentalized diamicton based, according to a thrust plane, on limnic deposits. Paleosols containing artifacts included in the transported mass have been deformed to varying degrees. About one hundred archaeological structures have been discovered in one of these with, in addition, masonry in a secondary position. The collected artifacts and ¹⁴C dates converge towards an occupation between the 1st and the end of the IVth century AD. Ground movements also affect a Late Iron Age occupation, largely obliterated by the gallo-roman settlement. These facts are compatible with a landslide triggered in the middle of the VIth century, relating to the so-called *Tauredunum* event in 563 AD. In addition to unpublished chronological elements, the discoveries at Rennaz-Noville thus provide new evidence on the effects of the disaster on the terrestrial environment.

KEYWORDS

Alluvial plain, Rhône, landslide, paleosols, Gallo-Roman period, La Tène, masonries, cremations, historical sources.

Article accepté après évaluation par deux experts selon le principe du double anonymat

La construction du canal du Haut-Lac, une infrastructure d'évacuation des eaux dans le Chablais vaudois (Suisse), a impliqué une intervention archéologique à l'est de Noville, près de Rennaz. Ce village se situe dans la plaine du Rhône, en rive droite, plus précisément à 1,7 km du lit actuel du fleuve et à 1,6 km au sud du lac Léman (**fig. 1**). Des sondages exploratoires sur l'emprise ont permis de reconnaître une section **[1]** recelant du mobilier et des structures archéologiques. D'une altitude moyenne de 376 m, cette zone allongée dans l'axe nord-sud se trouve donc au milieu du fond de vallée, large de 6 km. Elle mesure 200 m de long pour 20 m de large environ. À ce même endroit, le remplissage sédimentaire, jusqu'à la roche encaissante, atteint 790 m d'épaisseur environ **[2]** et se compose schématiquement de trois unités. Sous la surface se succèdent des formations fluviales qui recouvrent des sédiments lacustres, eux-mêmes sus-jacents à un till extrêmement compacté, en contact avec le fond rocheux **[3]**. Mais au voisinage du site et dans toute la partie centrale de la plaine apparaît en surface une unité supplémentaire, qui engendre les collines de Chessel-Noville **[4]**. Des travaux récents ont révélé que ces dépôts chaotiques de type diamicton **[5]** correspondent à la partie distale du matériel d'un écroulement **[6]**. Pour rappel, cette catastrophe se serait produite au sud-ouest de la plaine, sur le flanc de La Suche, un promontoire formé par les nappes préalpines. Elle pourrait bien coïncider avec l'écroulement dit du *Tauredunum*, qui a eu lieu en 563 ap. J.-C. selon des sources écrites et qui a déclenché un raz de marée dans le lac Léman **[7]**. Il s'agit de la *Chronique* de Marius, évêque d'Avenches, datée de 573 ap. J.-C., et de l'*Histoire des Francs* rédigée par Grégoire de Tours à partir de 583. Leurs auteurs y décrivent l'événement, survenu selon eux à la même date de 563, mais *via* deux scénarios divergents. Pour Marius d'Avenches, il s'agit de l'effondrement d'un pan de la montagne éponyme qui surplombe le Rhône. S'abattant sur le bourg en contrebas, il le détruit, de même que l'ensemble des villages environnants. En



Figure 1 : situation géographique du site de Rennaz-Noville, dans le sud-ouest de la Suisse. DAO M. Guélat.

résulte également un mouvement des eaux dans le lac sous forme d'une énorme vague qui balaye ses deux rives sur toute leur longueur et finit sa course au sein de la ville médiévale de Genève. Grégoire de Tours parle quant à lui plutôt d'un effondrement de la montagne qui anéantit le village de *Tauredunum*, installé vraisemblablement sur son flanc. La masse de terre et de gravats précipitée dans la plaine y bouche le cours du Rhône. Le fleuve inonde donc la vallée en amont avant de finalement surpasser la masse éboulée et de dévaler dans le lac, ce qui provoque le raz de marée. Les vestiges découverts

[1] Coordonnées : 46°22'55"N 6°54'17"E.

[2] ROSSELLI & OLIVIER 2003, p. 407.

[3] Données du forage gazier Noville 1 réalisé en 2009, à environ 1 km au nord-ouest du site : communication orale de M. Weidmann, géologue.

[4] BADOUX 1965.

[5] Diamicton : terme général utilisé pour décrire un sédiment terrigène ou marin à classement médiocre ou nul, à constituants de granulométrie très variée et de provenance très large (Harland *et al.* 1966, p. 225-256). Le mélange réalisé lors d'un glissement massif est une des origines possibles de ce sédiment hétérogène, semblable à un till (Van Vliet-Lanoë 2014, p. 361).

[6] SCHOENEICH *et al.* 2015, p. 162-165.

[7] KREMER *et al.* 2012, p. 756-757.

sur le chantier du canal du Haut-Lac et leur contexte sédimentaire apportent ainsi les éléments de datation qui manquaient encore, du moins pour la partie terrestre de cet événement.

MÉTHODES

Un des objectifs de l'intervention de l'été 2018 consistait à préciser la stratigraphie des formations superficielles et leur géométrie. À l'exception des datations au radiocarbone [8], aucune analyse n'a été entreprise jusqu'à présent sur les sédiments prélevés. Cet article se concentre ainsi sur la chronostratigraphie et les découvertes archéologiques. Les processus de déformation observés sur le terrain ne sont que sommairement abordés.

Trois coupes ont fait l'objet d'un relevé à l'échelle 1/20 au sein de l'emprise de fouille, ce qui représente 44 m linéaires au total (fig. 2). D'une hauteur moyenne avoisinant 2 m, elles ont été localement approfondies par des forages à la tarière manuelle.

RÉSULTATS

STRATIGRAPHIE

Sous la surface de glissement, à -2,8 m de profondeur, se trouvent des silts très bien classés, carbonatés, saturés en eau et de consistance molle, qui passent à des sables laminés vers -3,5 m [9]. Ces silts non déformés, de teinte gris bleuté, renferment par endroits de la matière organique finement dispersée ou sous forme de débris végétaux, en particulier vers le sommet, sur 15 à 20 cm d'épaisseur, où la teneur en carbonates tend d'ailleurs à s'annuler. Ce dépôt s'est mis en place en milieu anoxique, probablement limnique, et l'accumulation de débris organiques au sommet signalent un net ralentissement de la sédimentation, voire un atterrissement.

[8] Datations AMS réalisées par le laboratoire ICA (International Chemical Analysis Inc.), Sunrise, États-Unis.

[9] Selon le forage F2 réalisé par l'entreprise Maric SA. Guichet cartographique de l'État de Vaud.



Figure 2 : plan de situation des vestiges et des coupes de référence dans les sections fouillées du canal du Haut-Lac. DAO A. Pignolet.

Au-dessus du plan de glissement apparaissent souvent des graviers fluviatiles épais de 30 cm au maximum. Ils comprennent des éléments polygoniques, en général arrondis, et leur limite supérieure est déformée. Sur celle-ci vient se placer une formation hétérométrique d'une épaisseur assez constante, avoisinant les 2 m. Elle se compose surtout de graviers épars enrobés d'une abondante matrice de sables silteux ou limoneux gris foncé, très ferme et fortement carbonatée. De nature diverse, les éléments sont en général arrondis, avec des blocs et cailloux subanguleux, dispersés dans la masse [10] (fig. 3). Au sein de celle-ci, des plissements d'amplitude métrique sont signalés par des lits de galets redressés, et des discontinuités verticales apparaissent localement. Cette unité contient aussi des artefacts isolés, voire des tronçons entiers de murs maçonnés (cf. *infra* 3.3.2). Il s'agit d'un diamicton formé principalement d'alluvions fines et grossières, mélangées au matériel d'un éboulement et, localement, à la démolition de vestiges archéologiques. En plus des graviers fluviatiles sous-jacents, d'autres unités sont incluses au matériel glissé sous forme d'enclaves déformées de sables et de silts gris bien triés, à litage distinct, parfois associées à des lambeaux de paléosols. Ces derniers se composent de limons humifères brun violacé, exempts de carbonates, renfermant souvent des fragments de terre cuite ou de céramique. Une succession de couches analogue à celle de ces enclaves a d'ailleurs été observée dans des compartiments considérés comme peu déformés.

La partie supérieure de la stratigraphie se constitue de limons plus sableux, voire gravillonneux à la base, de couleur brun-gris clair et d'une épaisseur

allant de 10 cm à 1 m. Leur contact inférieur avec le diamicton est érosif et rectiligne, et leur teneur en carbonates décroît vers le haut. Sur ces limons d'inondation, non concernés par la déformation, se place la terre végétale.

LES COUPES DE RÉFÉRENCE

Orientée sud-nord dans la zone 2, la coupe n°2 mesure 21 m de longueur et 2,5 m de hauteur (fig. 4). L'approfondissement de deux profils à chacune de ses extrémités a révélé la présence du plan de cisaillement sur les silts bleutés riches en matière organique. Au-dessus de ce contact anormal, dans la partie méridionale, apparaissent tout d'abord les graviers fluviatiles puis le diamicton comprenant des enclaves de sédiments laminés, très déformés, en convolutions et diapirs. À 2,3 m du bord sud de la coupe, une discontinuité verticale traverse le diamicton mais s'interrompt vers le haut, à la limite avec les limons d'inondation. Il doit s'agir d'une faille décrochante, délimitant les compartiments de la masse glissée. Dans la partie nord, une succession de silts et sables laminés, au sommet de laquelle s'est développé un paléosol tronqué renfermant des artefacts, semble peu déformée sur 7 m de long. Cette séquence est interprétée comme le remplissage d'un paléochenal, dont l'extension totale est inconnue.

D'axe ouest-est dans la zone 4, la coupe n°3 se trouve à une quinzaine de mètres au nord de la

[10] Un rapide examen pétrographique révèle que ceux-ci sont des calcaires siliceux, probablement du Lias, et des grès brun-gris, probablement du flysch.



Figure 3

Bloc de calcaire siliceux dégagé à partir du matériel glissé. Il s'agit d'un des plus grands éléments observés sur le site (hauteur 0,8 m). Photo M. Millet.

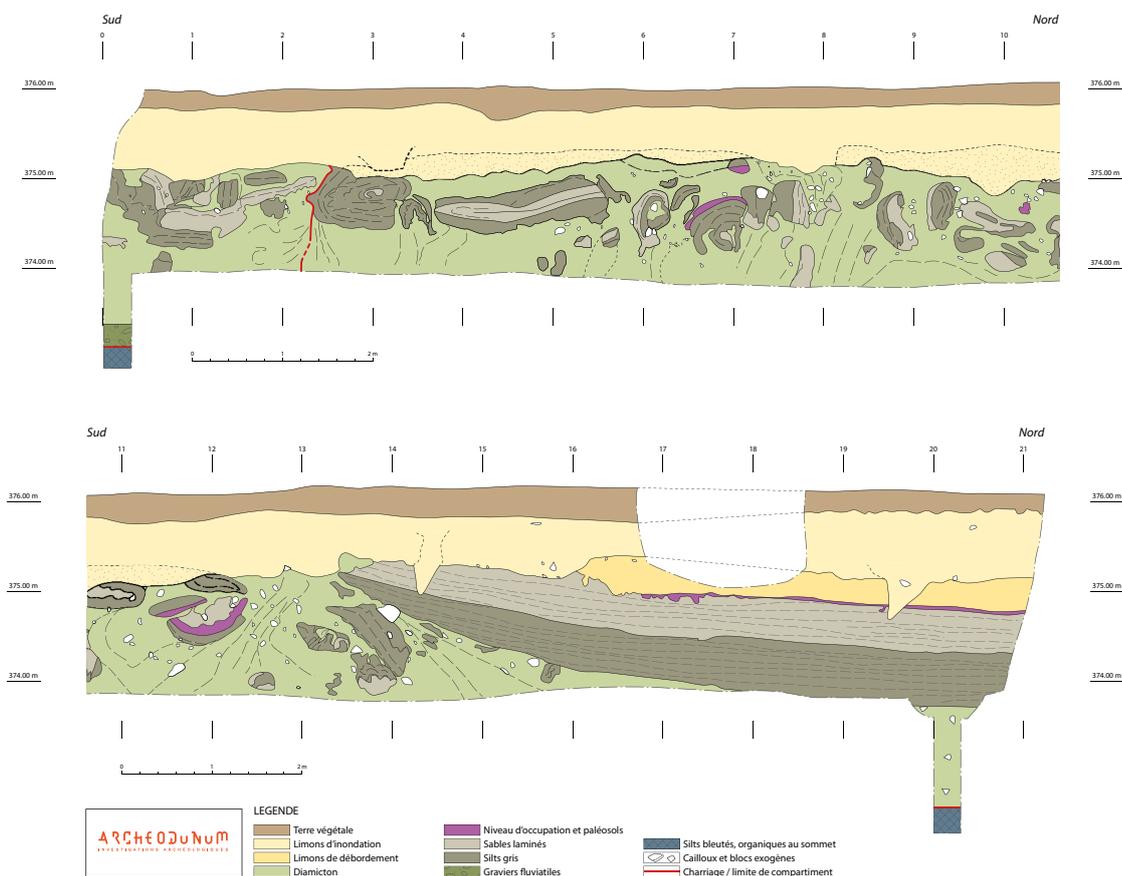


Figure 4 : relevé de la coupe n°2 en deux sections contiguës avec, dans la partie nord, le remplissage d'un paléochenal au sommet duquel s'est développé un paléosol, érodé. DAO A. Pignolet.

précédente. Sa longueur atteint 10 m et sa hauteur environ 2 m, après un décapage superficiel d'environ 1 m d'épaisseur, soit jusqu'au sommet du diamicton (**fig. 5**). Ce dernier renferme des fragments de tuile épars et on y trouve, comme au sein de la coupe n°2, les enclaves de silts et surtout de sables bien triés. Parmi les figures de déformation apparentes, on identifie des plis couchés souvent rompus, déversés vers l'ouest. Dans la partie orientale de la coupe, une de ces charnières inclut un lambeau de paléosol, alors que sa base s'appuie sur les graviers fluviaux, déformés en conformité. Plus bas, le plan de cisaillement accuse un léger pendage vers l'ouest. Il met en contact les graviers rhodaniens avec les silts bleutés, qui ne recèlent ici qu'une matière organique diffuse.

La coupe n°4 enfin se déploie d'est en ouest, dans la zone 3, à plus de 120 m au sud des deux précédentes (**fig. 5**). Recoupée par un sondage exploratoire dans sa partie médiane, elle a une longueur totale de 13 m et une hauteur maximale de 1,6 m. En profondeur, la surface de glissement n'a pas été atteinte et le diamicton apparaît sans équivoque sous les limons d'inondation. Il contient à nouveau des enclaves de silts laminés grisâtres, incluant

localement des lambeaux de paléosol(s). Les figures de déformation apparentes montrent bien des plis déversés, mais vers l'est cette fois. Plus abondant que dans les autres coupes, du mobilier archéologique tel que des fragments de tuile et de céramique, avec des petits blocs calcaires probablement équarris, s'y distingue en plus des habituels galets fluviaux et cailloux anguleux.

VESTIGES ARCHÉOLOGIQUES ET MOBILIER

L'intervention préventive réalisée a permis de reconnaître une centaine de structures potentielles (**fig. 2**), d'abord prudemment qualifiées d'anomalies eu égard au contexte sédimentaire perturbé. Il s'agit essentiellement de vestiges d'occupations en matériau périssable (trou de poteau), parfois plus pérennes (maçonneries). La présence d'un espace funéraire est aussi pressentie. Le croisement des données stratigraphiques, des datations au radiocarbone et des études de mobilier a mis en évidence deux périodes de fréquentation, l'une protohistorique et l'autre gallo-romaine. Au vu du contexte largement perturbé et des relations lacunaires entre les structures, l'élaboration d'un phasage plus précis n'a pas été possible.

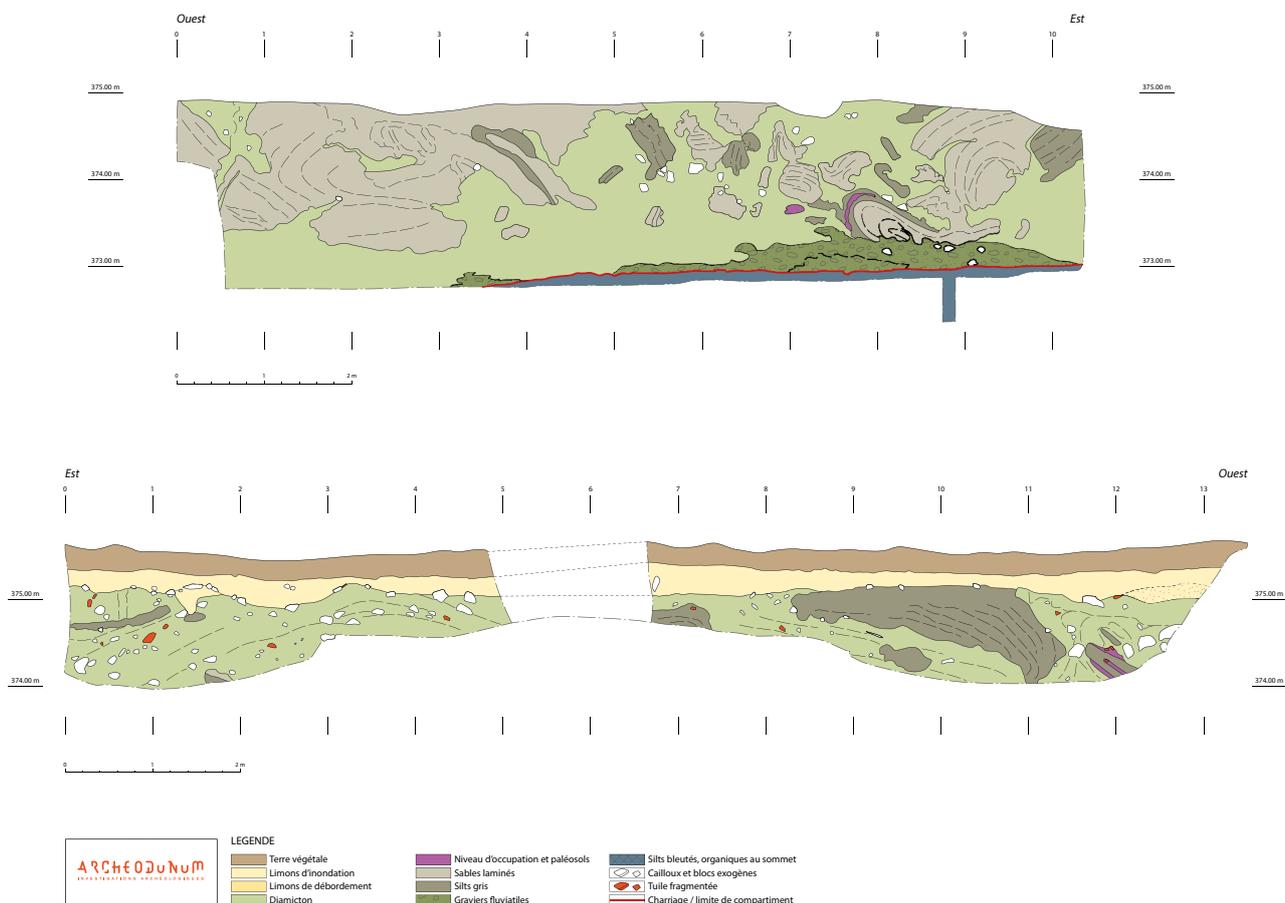


Figure 5 : relevés des coupes n°3 (en haut) et 4 (en bas). La première met au jour le plan de glissement à la base et montre, au-dessus, les déformations du diamicton. La seconde révèle que la masse glissée renferme de nombreux artefacts tels que des fragments de tuile ou de céramique, et des petits blocs calcaires probablement équarris. DAO A. Pignolet.

L'occupation protohistorique

La fréquentation du site à la protohistoire est attestée par l'unique présence d'un niveau de circulation composé de graviers de calcaire jaune très indurés. D'une épaisseur moyenne de 5 cm, il a été observé notamment à la faveur d'un compartiment sédimentaire non perturbé présent au nord-ouest de la zone 2 et relevé sur la coupe de référence n°2. Sa position stratigraphique permet d'assurer son antériorité aux niveaux gallo-romains, qui le recourent ponctuellement. De plus, la fouille de son tronçon préservé a permis la collecte de plusieurs fragments de céramiques attribuables à la période de La Tène (céramique à vernis noir). Ce niveau d'occupation se retrouve aussi de manière éparse sur toute l'emprise du chantier, à l'état de lambeaux dans le diamicton. Une datation radiocarbone sur un charbon prélevé dans le cailloutis du compartiment conservé donne un intervalle de 200-40 cal BC (ICA18C/1057).

On peut aussi noter la découverte, au sein de la masse transportée, de quelques tessons de céramique protohistorique, d'amphore Dressel 1, de

trois monnaies d'émission républicaine (un as, un quinaire et un denier de Marcus Vargunteius) et d'un bouton mouluré de passe-guide de type Hopstädten, daté généralement de La Tène finale. Ces éléments laissent donc présager d'une occupation laténienne du secteur, oblitérée par les implantations et les mouvements de terrains postérieurs.

Cette présence était déjà supposée sur la base de la découverte, à environ 1 km au nord du chantier, d'une effigie en chêne datée de la fin de La Tène sur la base de trois monnaies déposées dans le tronc : un quinaire gaulois et deux oboles [11].

L'occupation du Haut-Empire

La grande majorité des vestiges archéologiques rencontrés concerne la période gallo-romaine. Le matériel collecté (fig. 10) et les analyses ¹⁴C réalisées abondent dans le sens d'une occupation comprise semble-t-il entre le milieu du I^{er} et le courant du IV^e siècle de notre ère.

[11] PAUNIER 1998, p. 99.



Figure 6 : coupes de trous de poteaux non déformés. Photos M. Millet.

Il s'agit principalement de structures fossoyées telles que l'on peut en trouver sur les sites livrant des empreintes d'architecture en matériau périssable. Il est cependant difficile de les distinguer avec certitude. En effet, l'ensemble des vestiges étant implanté dans un contexte sédimentaire largement perturbé, cela se traduit par des morphologies et profils de structures majoritairement irréguliers. Néanmoins, plusieurs trous de poteaux ont été reconnus à la faveur de profils de creusement réguliers et de la présence de blocs de calages (**fig. 6**), mais aucun plan de bâtiment n'est avéré.

À l'inverse, on a pu observer de nombreuses anomalies, que l'on a d'abord interprétées comme des structures en creux, mais qui se sont révélées être des lambeaux de sols pris dans la déformation (**fig. 7**). Cette discrimination entre structures fossoyées et lambeaux de sols déformés s'est également faite grâce à l'observation fine de la séquence encaissante de chaque anomalie documentée, sur la base de l'analyse des coupes de références réalisées en amont.

En parallèle des empreintes d'installations périssables, plusieurs témoins de constructions maçonnées ont été repérés. Il s'agit d'élévations

Figure 7

Coupe de lambeaux de sols déformés. Photo M. Millet.

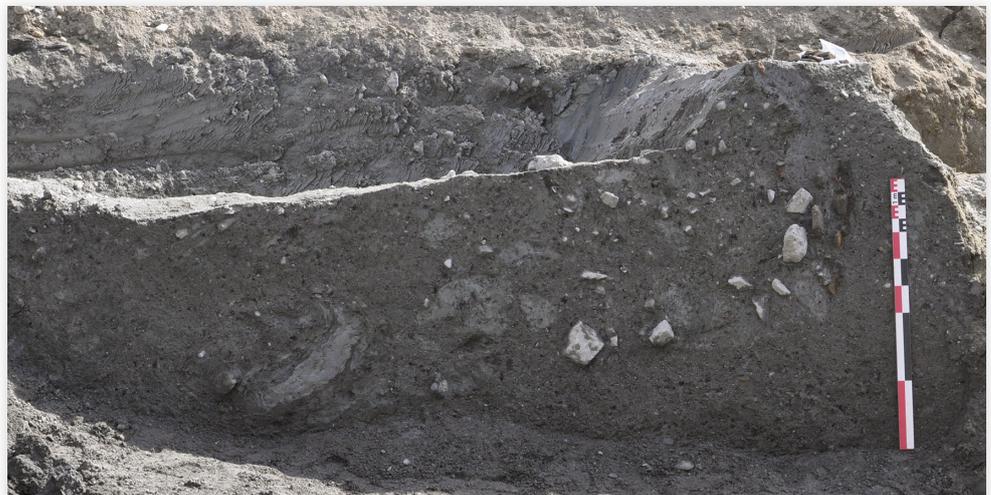




Figure 8
Vues en cours de fouille de l'incinération ST1.
Photos M. Millet.

partiellement préservées en pans et souvent disposées obliquement dans la matrice perturbée. Au nombre de sept, ces reliquats d'élévations ne présentent pas les mêmes caractéristiques et états de conservation. Trois d'entre eux se résument à des concentrations lâches de blocs, dont certains peuvent être liés au mortier de chaux. Malgré la présence de pierres de taille jointes dans un contexte de conservation pourtant défavorable, leur interprétation en tant que restes de démolition apparaît plus probable.

Les quatre autres représentants du gros-œuvre sont moins altérés et présentent une élévation de plusieurs assises (**fig. 9**). La maçonnerie la plus importante du site présente une longueur de 1,5 m pour une largeur de 0,65 m avec le ressaut

de fondation. Elle se compose de blocs et boulets grossièrement équarris. Sa fondation comprend trois assises conservées sur une hauteur de 0,36 m (calibre des blocs de 0,1 à 0,4 m), liées d'un mortier blanc jaunâtre très sableux et friable. L'élévation à proprement parler est conservée sur trois assises également. Ce mur est fait d'un appareil courant (panneresse) composé de blocs calibrés (0,15 à 0,2 m) agrégés à l'aide d'un mortier blanc plus compact que pour la fondation. D'orientation sud-est/nord-ouest, il se trouve déversé vers l'ouest. Au niveau du ressaut de fondation sur la largeur sud, on peut observer une plaque de mortier lissé installée sur une assise de réglage en tuiles. Elle se situe dans le prolongement de la première assise et pourrait



Figure 9 : maçonnerie du site de Noville. Photos M. Millet.

correspondre au reliquat d'un seuil ou d'un sol maçonné.

Les trois éléments de construction restant ont des mensurations comprises entre 0,8 et 0,5 m de longueur et entre 0,8 et 0,4 m de largeur, pour une élévation de deux à quatre assises.

Ces murs ne se trouvent donc pas à proprement parler *in situ*, mais leur état de conservation semble indiquer une provenance proche, avec selon toute vraisemblance la présence d'un établissement gallo-romain à proximité directe de la zone investiguée.

Enfin, plusieurs structures funéraires ont également été reconnues. Il s'agit de seize fosses pouvant être liées au rite de la crémation. La plupart ne sont que partiellement conservées, à l'exception d'une, préservée à la faveur d'une enclave sédimentaire non déformée (**fig. 8**). Ces structures possèdent un comblement charbonneux et contiennent du mobilier calciné (céramique, verre, clous en fer) et/ou des esquilles osseuses animales et humaines. Mais seulement quatre d'entre elles présentent une association entre mobilier calciné et restes humains. Leur état de conservation fragmentaire ne permet pas d'en apprendre plus sur leur nature exacte [12].

ÉLÉMENTS DE DATATION

Une série de cinq datations ¹⁴C a été effectuée sur des matières organiques prélevées en dessous du cisaillement, dans les silts bleutés (**fig. 11**). L'intervalle qu'elles définissent, plutôt cohérent avec la position altimétrique des échantillons, va de 2880 cal BC (ICA19W/0403), âge obtenu sur un tronc d'arbre découvert au sud de l'emprise de fouille, à 430 cal AD (ICA19W/0969), date provenant

d'un fragment de bois prélevé dans la zone 4. De plus, la pointe d'un pieu implanté dans ces mêmes dépôts limniques détermine la limite chronologique (TAQ) pour leur mise en place à 250-400 cal AD (ICA19W/0338). Cette borne supérieure est d'ailleurs confirmée par la date de 250-430 cal AD obtenue sur un macroreste (ICA18C/1058).

Au sein du compartiment peu déformé de la partie nord de la coupe n°2, le paléosol du haut de la séquence a livré par analyse ¹⁴C un âge de 200-40 cal BC (ICA18C/1057), en accord avec la typologie du mobilier. En particulier, le monnayage républicain et la céramique à vernis noir garantissent l'insertion de ce niveau anthropisé dans le Second âge du Fer (période de La Tène finale), qui correspond ainsi à la limite chronologique inférieure (TPQ) pour la mise en place de la masse glissée.

De plus, quatre dates proviennent de structures archéologiques déformées de la zone 3, décapées au sommet du diamicton (ICA18C/1052, /1054, /1055 et /1056). Elles définissent une fourchette chronologique d'environ 100-400 cal AD, confortée par la typologie du mobilier qui place cette occupation gallo-romaine entre la deuxième partie du I^{er} et la fin du IV^e siècle ap. J.-C. Ces éléments rajeunissent donc la limite chronologique inférieure de l'événement catastrophique de près d'un demi-millénaire. Enfin, du mobilier moderne (tessons de céramique vernissée, casseroles et serrures) a été découvert dans les limons d'inondation scellant le diamicton.

[12] Pour l'analyse détaillée, voir le rapport d'intervention : MILLET 2020



Figure 10 : sélection d'artefacts découverts lors de la fouille. Photo N. Jacquet.

Réf. laboratoire	Matière	Coordonnées	Age 14C BP conv.	Date calibrée 2 sigma
ICA18C/1052	Charbon de bois	Zone 1, ST17, trou de poteau, alt. 374.26 m	1830 +/- 30 BP	80-260 cal AD (95.0%) 300-320 cal AD (0.4%)
ICA18C/1054	Charbon de bois	Zone 2, ST44, trou de poteau, alt. 374.87 m	1810 +/- 30 BP	120-260 cal AD (88.6%) 280-330 cal AD (8.8%)
ICA18C/1055	Charbon de bois	Zone 4, ST91, trou de poteau, alt. 374.48 m	1770 +/- 30 BP	130-350 cal AD
ICA18C/1056	Charbon de bois	Zone 4, ST94, trou de poteau, alt. 374.23 m	1750 +/- 30 BP	220-390 cal AD
ICA18C/1057	Charbon de bois	Coupe 2 partie nord, paléosol, alt. 374.80 m	2090 +/- 30 BP	200- 40 cal BC
ICA18C/1058	Reste végétal	Coupe 2, silts organiques, alt. 372.70 m	1670 +/- 30 BP	250-300 cal AD (6.4%) 320-430 cal AD (89.0%)
ICA19W/0338	Bois	Zone 2, pointe de pieu dans silts bleutés, alt. 372.82 m	1710 +/- 30 BP	250-400 cal AD
ICA19W/0403	Bois	Tronc dans silts bleutés	4140 +/- 40 BP	2880-2580 cal BC
ICA19OS/0967	Sédiment	Coupe 2 partie sud, silts organiques, alt. 372.90 m	2020 +/- 30 BP	110 BC-80 cal AD
ICA19C/0968	Charbon de bois	Coupe 3 partie est, silts organiques, alt. 372.95 m	2030 +/- 30 BP	180 BC-70 cal AD
ICA19W/0969	Bois	Zone 4, silts bleutés, près de coupe 3, alt. 372.65m	1680 +/- 30 BP	250-300 cal AD (10,2 %) 320-430 cal AD (85,2 %)

Figure 11

Datations ¹⁴C réalisées pour le site de Rennaz-Noville à partir d'échantillons dont les caractéristiques sont précisées.

DISCUSSION

INTERPRÉTATION DES FIGURES SÉDIMENTAIRES

Selon les figures de déformation observées dans le diamicton, la contrainte à l'origine du cisaillement se serait exercée principalement d'ouest en est, en accord avec les données de la littérature [13]. En effet, la coupe n°2 d'axe sud-nord recoupe les charnières des plis alors que la coupe n°4, orientée est-ouest, révèle que ces derniers sont en général

couchés vers l'est. Dans la coupe n°3 d'axe ouest-est, il semble que la masse déplacée ait subi une déformation secondaire comme le montre la limite replissée entre les graviers fluviatiles et le diamicton. Ce « rétrocharriage » expliquerait l'apparent déversement des plis vers l'ouest dans la zone 4, au nord du périmètre exploré. Quant au découpage en compartiments plus ou moins déformés, il pourrait

[13] SCHOENEICH *et al.* 2015, p. 163.

indiquer que le transport s'est effectué grâce à un fond fluidifié lors de l'écroulement. Les sédiments alluviaux ou limniques détrempés sont en effet susceptibles de se liquéfier sous l'effet de la surpression et peuvent ainsi jouer le rôle de lubrifiant sous la masse écroulée [14].

DISPERSION DES VESTIGES ARCHÉOLOGIQUES

Suite à la perte de portance du sous-sol, des édifices résistants peuvent s'enfoncer et se renverser. La découverte sur le site de plusieurs tronçons de maçonneries basculés d'époque gallo-romaine est rapportée à ce type de phénomène, au cours duquel un ou plusieurs bâtiments, peut-être déjà en ruine, ont été complètement démolis. Ces sections de murs, avec leurs fondations encore solitaires parfois, ont été mises au jour jusqu'à une profondeur proche de 2 m sous la surface actuelle, au sein du diamicton. On ne s'étonnera donc pas de la grande dispersion spatiale du mobilier archéologique. Il en va de même pour les structures fossoyées (trous de poteau, incinérations), le paléosol protohistorique et le niveau d'occupation du Haut-Empire inclus sous forme de lambeaux à la masse transportée, dans la zone 2 tout spécialement.

SIGNIFICATION DES ÉLÉMENTS DE DATATION

Les dates obtenues à partir d'échantillons de sédiment et de charbon de bois situés juste sous le plan de glissement indiquent que les silts organiques se sont accumulés jusqu'au début de notre ère au plus tard. Mais les fragments végétaux qu'ils contiennent sont en général plus récents. En particulier, l'âge d'un pieu probablement cisailé sous la masse de débris concorde avec celui d'un macroreste, matière considérée comme très fiable pour les datations. Ces deux dates définissent ainsi un intervalle allant du milieu du III^e au début du V^e siècle. Au-dessus des silts organiques se trouvent soit des graviers fluviaux non datés, soit le diamicton. Ce dernier inclut des sédiments plus anciens que le déplacement, sous forme d'enclaves perturbées ou, au contraire, d'îlots apparemment peu déformés, à l'instar de la séquence au sommet de laquelle se trouve un niveau de la Tène finale, en coupe n°2. La borne supérieure de l'intervalle que définissent les datations des structures gallo-romaines et la typologie du mobilier associé s'insère vers la fin du IV^e siècle après J.-C. Il s'agit là d'une limite chronologique inférieure pour la mise en place du diamicton. Les dépôts de plaine

alluviale recouvrant la masse glissée n'ont pas été datés. Le rare mobilier qu'on y a découvert tend à indiquer que ces limons se sont déposés dès le Moyen Âge au plus tôt, et surtout durant la période moderne.

INSERTION CHRONOLOGIQUE DE LA CATASTROPHE

Les résultats des datations ¹⁴C et de la chronotypologie sont donc concordants et permettent d'affirmer que l'avalanche rocheuse reconnue à Noville a eu lieu après un intervalle compris entre le milieu du III^e et le début du V^e siècle. Selon les sources écrites, celle du *Tauredunum* a eu lieu au moins un à trois siècles plus tard. Pourtant, plusieurs arguments parlent en faveur d'un seul et même événement. En effet, il est statistiquement très peu probable que deux catastrophes naturelles d'une telle ampleur, soit d'un volume estimé entre 20 et 30 millions de mètres cubes [15], aient pu avoir lieu au même endroit, dans un laps de temps séculaire. De plus, si un écroulement précède de peu celui de l'an 563, son matériel aurait été oblitéré par ce dernier, reconnu comme majeur, et ne serait de fait plus observable. Dans le même ordre d'idées, la conservation d'un compartiment non perturbé, comprenant un niveau de l'âge du Fer, paraît impossible après deux écroulements aussi importants. Enfin et surtout, l'analyse de carottes forées dans le fond du lac Léman montrent qu'il n'y a pas eu de transport en masse dans ce milieu durant les deux à trois siècles ayant précédé la catastrophe du *Tauredunum* [16].

CONCLUSIONS

L'étude menée sur le chantier du Canal du Haut-Lac fournit de nouveaux acquis concernant la « formation de Chessel-Noville » et l'occupation humaine dans la vallée du Rhône, à proximité de son ouverture sur le lac Léman. La chronologie de la mise en place de ce dépôt d'écroulement est maintenant précisée grâce à des éléments de datation provenant de datations ¹⁴C et de la chronotypologie, qui montrent une remarquable cohérence. Deux occupations humaines distinctes ont été identifiées sur

[14] PARRIAUX 2006, p. 92 ; PEDRAZZINI *et al.* 2013, p. 65.

[15] SCHOENEICH *et al.* 2015, p. 171.

[16] KREMER *et al.* 2015, p. 1323.

le site. La première, plutôt discrète, se rapporte au Second âge du Fer et la suivante, nettement plus étendue, à la période gallo-romaine. La déformation des niveaux et structures archéologiques, de même que l'enfoncement spectaculaire de maçonneries parfois basculées, résultent d'une liquéfaction de leur soubassement. La contrainte s'est exercée d'ouest en est, comme le montrent les structures

sédimentaires de la masse glissée qui inclut des blocs détachés du versant en rive gauche du Rhône. Ceux-ci ont donc traversé la plaine alluviale, sur une distance de 3,5 km. En définitive, l'ensemble de ces résultats géoarchéologiques sont compatibles avec une mise en place du matériel glissé lors de la catastrophe du *Tauredunum*, qui a eu lieu, nous l'avons vu, vers le milieu du VI^e siècle. ■

REMERCIEMENTS

De sincères remerciements s'adressent à Sébastien Freudiger (Archeodunum SA) et Nicole Pousaz (archéologue cantonale de l'État de Vaud) pour avoir facilité les travaux entrepris. Merci aussi à Robert Fellner pour la révision du résumé en anglais. Merci enfin aux relecteurs anonymes pour leurs suggestions.

BIBLIOGRAPHIE

- BADOUX, Héli, 1965**, *Feuille 47 Montreux (CN1264). Atlas géologique de la Suisse 1 :25'000*, Bern.
- HARLAND, Walter Brian, HEROD, Kay N. & KRINSLEY, David Henry, 1966**, « The definition and identification of tills and tillites », *Earth-Science Reviews* 2, p. 225-256.
- KREMER, Katrina, SIMPSON, Guy & GIRARD CLOS, Stéphanie, 2012**, « Giant Lake Geneva Tsunami in AD 563 », *Nature Geoscience* 5/11, p. 756-757.
- KREMER, Katrina, HILBE, Michael, SIMPSON, Guy, DECROUY, Laurent, WILDI, Walter & GIRARD CLOS, Stéphanie, 2015**, « Reconstructing 4000 years of mass movement and tsunami history in a deep peri-Alpine lake (Lake Geneva, France-Switzerland) », *Sedimentology* 62, p. 1305-1327.
- PARRIAUX, Aurèle, 2006**, *Géologie. Bases pour l'ingénieur*, Lausanne.
- MILLET, Morgan, 2020**, "Noville - Canal du Haut-Lac", Rapport final d'opération archéologique, Gollion.
- PAUNIER, Daniel, 1998**, « Le Léman, de l'époque gallo-romaine au Moyen Âge », *Archives des sciences et compte rendu des séances de la Société* 51, p. 91-102.
- PEDRAZZINI, Andrea, JABOYEDOFF, Michel, LOYE, Alexandre & DERRON, Marc-Henry, 2013**, « From deep seated slope deformation to rock avalanche: Destabilization and transportation models of the Sierre landslide (Switzerland) », *Tectonophysics* 605, p. 149-168.
- ROSSELLI, Alberto & OLIVIER, Raymond, 2003**, « Modélisation gravimétrique 2.5D et cartes des isohypses au 1 :100'000 du substratum rocheux de la Vallée du Rhône entre Villeneuve et Brigue (Suisse) », *Ecologiae Geologicae Helvetiae* 96/3, p. 399-423.
- SCHOENEICH, Philippe, WEIDMANN, Marc & BLOMJOUS, Carole, 2015**, « L'énigme du *Tauredunum* enfin résolue? », dans Emmanuel Reynard *et al.* (éd.), *Le Rhône, entre nature et société*, Sion, p. 153-174.
- VAN VLIET-LANOË, Brigitte, 2014**, *Les environnements froids. Glaciaire et périglaciaire*, Paris.

DYNAMIQUE GÉOMORPHOLOGIQUE HOLOCÈNE ET OCCUPATION HUMAINE DANS LE BASSIN-VERSANT DE L'EURE (BASSIN DE PARIS, FRANCE) : POTENTIELS D'UNE APPROCHE GÉOARCHÉOLOGIQUE MULTISCALE ET DIACHRONIQUE

Théophile PIAU ^{1, 2, *}, François BÉTARD ¹, Fabienne DUGAST ²,
Gilles ARNAUD-FASSETTA ¹, Vincent VIEL ¹

¹ Université de Paris, UMR 8586 PRODIG

² UMR 8167 Orient & Méditerranée, CNRS

* theophilepiau@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Localisé dans la partie occidentale du Bassin parisien, le bassin-versant de l'Eure présente une occupation humaine plurimillénaire. À l'interface entre plusieurs groupes culturels dès le Néolithique (groupes du Gord, de l'Artenac et de Bretagne), la vallée de l'Eure est un espace archéologique clef qui offre un cadre de recherche privilégié pour mettre en œuvre une approche géoarchéologique multiscale et diachronique combinant : (1) cartographie géomorphologique, comme outil permettant d'appréhender les biais taphonomiques dans la préservation des gisements archéologiques, (2) prospections géophysiques (tomographie de résistivité électrique) pour une reconstitution 2D de l'architecture du remblaiement alluvial, (3) acquisition et traitement des données stratigraphiques par carottage et analyses sédimentologiques. L'apport des archives sédimentaires fluviales est également mis en avant afin de reconstituer la trajectoire hydro-sédimentaire de l'Eure durant l'Holocène.

MOTS-CLÉS

Géoarchéologie,
paléoenvironnement,
Holocène,
vallée de l'Eure,
Bassin de Paris.

Located in the western part of the Paris Basin, the Eure catchment is marked by a several thousand years old human occupation. At the interface between several cultural groups since the Neolithic period (Gord, Artenac and Brittany), the Eure valley is a key archeological area for performing geoarchaeological investigations. The aim of this multiscale approach is to combine (i) geomorphological mapping in order to underline the geomorphological dynamics impacts on the taphonomy of settlement and archeological remains in the middle Eure valley; (ii) geophysical surveys (Electrical Resistance Tomography) to obtain a 2D view of the sediment structures of palaeochannels; and (iii) percussion drilling of sedimentary cores and sedimentological analyses. In addition, the sedimentary records of the Eure valley are a crucial indicator to reconstruct the hydro-sedimentary dynamics of the Eure catchment and the relationships between societies and their environment during the Late Holocene.

KEYWORDS

Geoarchaeology,
paleoenvironment,
Holocene,
Eure Valley,
Paris Basin

Article accepté après évaluation par deux experts selon le principe du double anonymat

À l'heure où la notion « d'Anthropocène » occupe le devant de la scène scientifique tout en étant sujette à de nombreuses controverses [1], l'étude des interactions entre les sociétés anciennes (du Néolithique au Moyen Âge), les écosystèmes et les oscillations climatiques à l'Holocène s'avère fondamentale afin de mieux comprendre les réponses des environnements contemporains face aux changements globaux et proposer des perspectives de gestion adaptées [2]. L'intérêt des systèmes géomorphologiques réside dans le fait qu'ils enregistrent avec une résolution temporelle parfois très fine (temps d'une crue) des archives sédimentaires et paléocologiques (pollens, mollusques) qui permettent de retracer l'histoire des paysages [3]. Cependant, démêler la part respective des forçages naturels et de l'action anthropique dans les métamorphoses de ce *continuum*, des plateaux et vallons élémentaires aux plaines alluviales, est complexe et nécessite d'adopter une démarche pluridisciplinaire (archéologie, géomorphologie, géosciences), multiscalaire (de l'échelle régionale du bassin-versant à l'échelle locale du site archéologique) et diachronique (du temps long géologique au temps court de l'événement historique et hydrologique). Les recherches géoarchéologiques et paléoenvironnementales *multi-proxies* (indicateurs géomorphologiques et bio-indicateurs) conduites le long de transects représentatifs (intra- et hors sites archéologiques) sur la Seine et ses principaux affluents (Marne, Oise, Yonne) ont permis de proposer un premier modèle de la trajectoire hydro-sédimentaire des organismes fluviaux du Bassin parisien face aux perturbations bio-climato-anthropiques des dix derniers millénaires [4]. Les synthèses récentes soulignent la variabilité spatio-temporelle des réponses environnementales face aux forçages anthropo-climatiques, reflet de l'hétérogénéité de l'espace, des « effets de site » et de facteurs morphologiques d'échelle plus locale (cadre morfo-structural, système de pentes) [5].

Localisé dans la partie occidentale du Bassin parisien, le bassin-versant de l'Eure offre un cadre de recherche privilégié pour appréhender les mécanismes d'interaction sociétés-milieus au cours de l'Holocène à différentes échelles spatiales (régionale à locale) et temporelles (millénaire à annuelle). Trait d'union entre la Seine au nord et la Loire au

sud (**fig. 1A et B**), la vallée de l'Eure se développe à l'interface entre plusieurs groupes culturels dès le Néolithique (groupes du Gord, de l'Artenanc et de Bretagne). Elle est marquée, durant la période antique, par l'émergence des Aulerques Éburovices au nord, des Carnutes au sud et des Durocasses à l'ouest, puis par les différents héritages politiques à l'époque mérovingienne et les conflits entre le duché de Normandie et le royaume de France au cours du Moyen Âge (**fig. 2A et B**). Elle apparaît de ce fait comme un espace archéologique clef pour appréhender les dynamiques du réseau de peuplement humain et la formation des cultures matérielles aux influences multiples sur la longue durée. Paradoxalement, elle s'inscrit dans une portion de territoire où la documentation archéologique et géomorphologique est hétérogène et peu exploitée.

L'article se propose d'établir un premier bilan d'une recherche exploratoire engagée en 2019 dans le cadre d'un mémoire de Master 2 puis d'une thèse de doctorat (2019-2022, directeur : François Bétard) au sein de l'Université de Paris (ED 624) et de l'UMR 8586 PRODIG. Adossée au programme collectif de recherche « Vallée de l'Eure : une rivière, des territoires » (coordination : Fabienne Dugast, financement principal : DRAC Normandie) et menée conjointement aux prospections archéologiques, l'analyse géomorphologique a eu pour ambition d'évaluer les potentialités paléoenvironnementales des archives sédimentaires de l'Eure moyenne dans une perspective géoarchéologique. Le choix de ce terrain d'étude s'est imposé pour plusieurs raisons. À la différence de la confluence Eure-Seine au nord du bassin-versant (boucle de Vaudreuil. **fig. 1B**) ou de l'agglomération chartraine au sud, la moyenne vallée de l'Eure est une portion de territoire qui demeure mal connue. En effet, ce secteur se singularise par un maigre corpus de données archéologiques qui pose la question de la conservation et/ou de la visibilité des gisements dans le paysage et

[1] MAGNY 2019.

[2] BRAVARD & MAGNY 2002.

[3] BROWN 1997 ; LESPEZ 2012 ; BERGER ET AL. 2018.

[4] PASTRE ET AL. 1997, 2006.

[5] LESPEZ 2012 ; GONET 2018 ; BEAUCHAMP 2019.

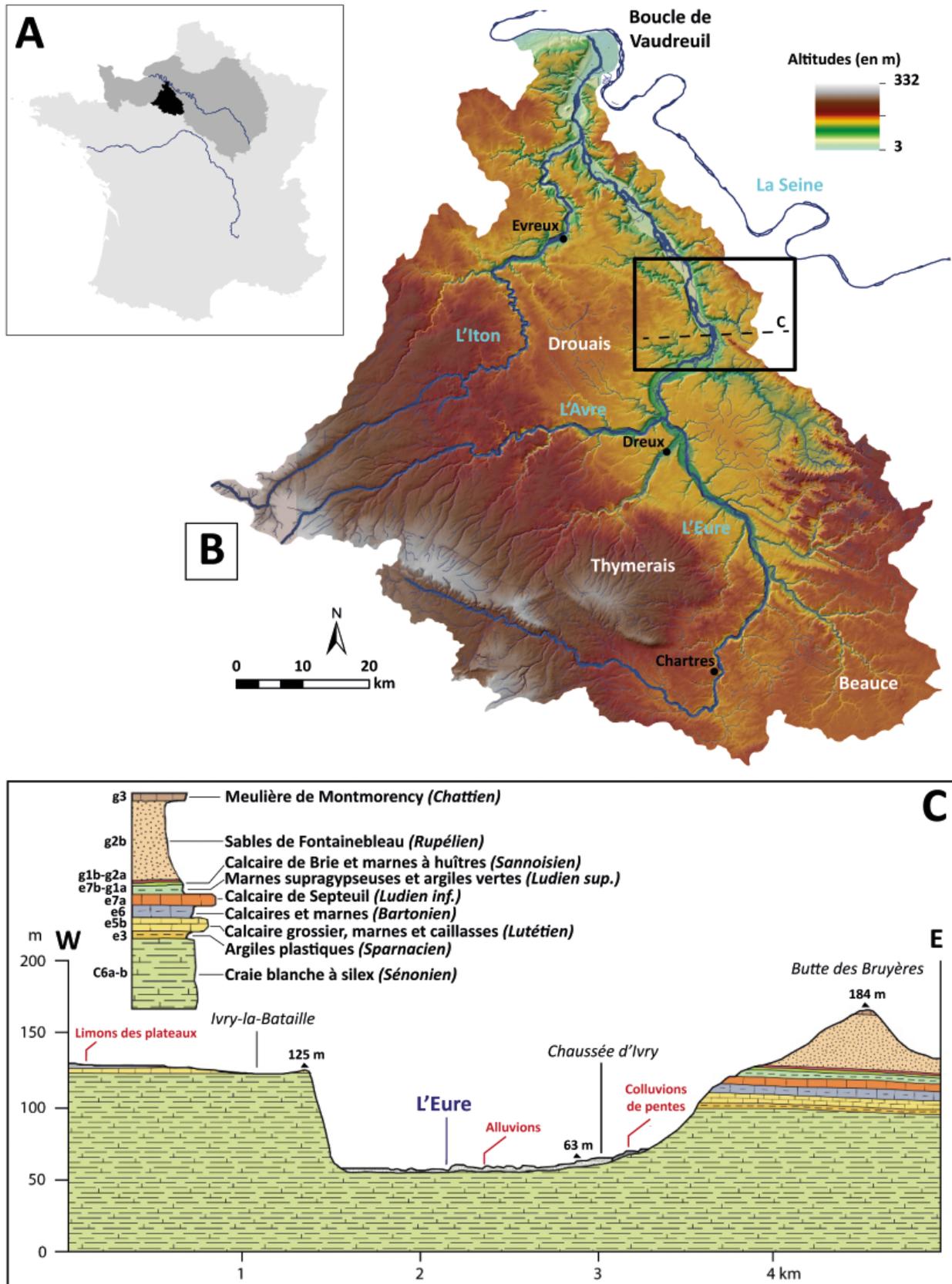


Figure 1

Carte de localisation de la zone d'étude (A) et délimitation du bassin-versant de l'Eure (B). Le rectangle noir localise la fenêtre d'étude retenue pour ce travail exploratoire. C. Coupe géologique W-E à travers la vallée de l'Eure à la Chaussée-d'Ivry : une vue d'ensemble de la stratigraphie du bassin-versant. DAO : T. Piau (d'après BÉTARD ET AL. 2020). Fonds orographique : BD Alti 25 m de l'IGN, Fonds hydrographique : BD Carthage de l'IGN, Système de coordonnées : Lambert 93 Conformal Conic.

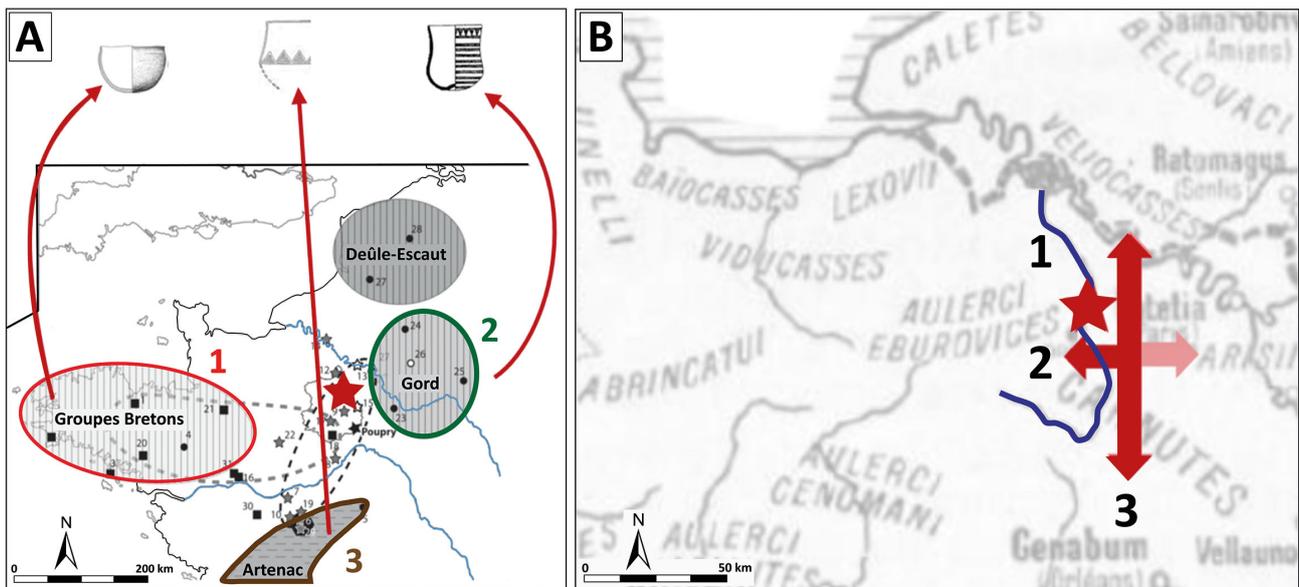


Figure 2

Groupes culturels du Bassin parisien. Sur les deux cartes, la moyenne vallée du bassin-versant de l'Eure est symbolisée par l'étoile rouge. Noter sa position d'interface durant le Néolithique (A) entre les groupes de Bretagne à l'ouest (1), de Gord au nord-est (2) et de l'Artenac au sud (3) puis, durant l'Antiquité (B) entre la cité des Aulerques-Eburovices au nord (1), des Carnutes au sud (3) et des Durocasses à l'ouest. DAO : T. Piau (d'après DUGAST 2019).

des processus géomorphologiques à l'origine de leur fossilisation (alluvionnement, colluvionnement) ou de leur démantèlement (érosion), en lien avec la taphonomie des sites. Le cadre morpho-structural du bassin-versant de l'Eure est par ailleurs sensiblement différent entre la rive gauche, où la surface des plateaux est sous-tendue par les couches sédimentaires du Secondaire, et la rive droite, où ils sont principalement soulignés par les dépôts variés du Tertiaire (**fig. 1C**) [6]. Ainsi, les sous-bassins de rive droite de l'Eure pourraient avoir subi des évolutions asynchrones et/ou des réponses morpho-sédimentaires différentes des sous-bassins à lithologie crayeuse de rive gauche. Cette configuration géologique amène donc à s'interroger sur le rôle respectif de chacun des forçages (anthropiques et climatiques) et des effets des emboîtements d'échelle sur la propagation des signaux sédimentaires, des vallons élémentaires au fond de vallée de l'Eure, en lien avec l'organisation spatiale du peuplement humain. L'article synthétise les résultats préliminaires de cette recherche qui s'est articulée autour d'un double objectif : (1) à une échelle régionale, quel est l'impact des processus géomorphologiques dans la préservation des gisements archéologiques ? (2) à une échelle locale, quelles

sont les potentialités paléoenvironnementales des séquences sédimentaires préservées dans le fond de vallée de l'Eure à proximité des sites archéologiques identifiés ?

LA MOYENNE VALLÉE DE L'EURE, CADRE DE RECHERCHE PERTINENT POUR UNE APPROCHE GÉOARCHÉOLOGIQUE ET PALÉOENVIRONNEMENTALE

La fenêtre d'étude est située dans la section médiane du bassin-versant de l'Eure, entre les communes de Marcilly-sur-Eure au sud-ouest et Gadencourt au nord-ouest, sur un tronçon d'une trentaine de kilomètres. Le fond de vallée, d'une largeur de 1,5 km, à fond plat et aux versants dissymétriques, s'encaisse de 70 m à partir de la surface de référence représentée par des plateaux culminant entre 170 et 130 m. L'Eure a entaillé, en rive gauche, les assises crayeuses du Sénonien (Ivry-la-Bataille) et a épargné sur son versant de rive droite une grande partie des dépôts tertiaires qui s'échelonnent de l'Éocène au Mio-Pliocène (Chaussée-d'Ivry. **Fig. 1C**). La surface des plateaux est nappée de manteaux d'altérites (formations résiduelles à silex), de biefs à silex (en rive gauche) et de limons éoliens. Le long de la vallée, plusieurs niveaux de terrasses, étagées et partiellement masquées par

[6] BÉTARD ET AL. 2020.

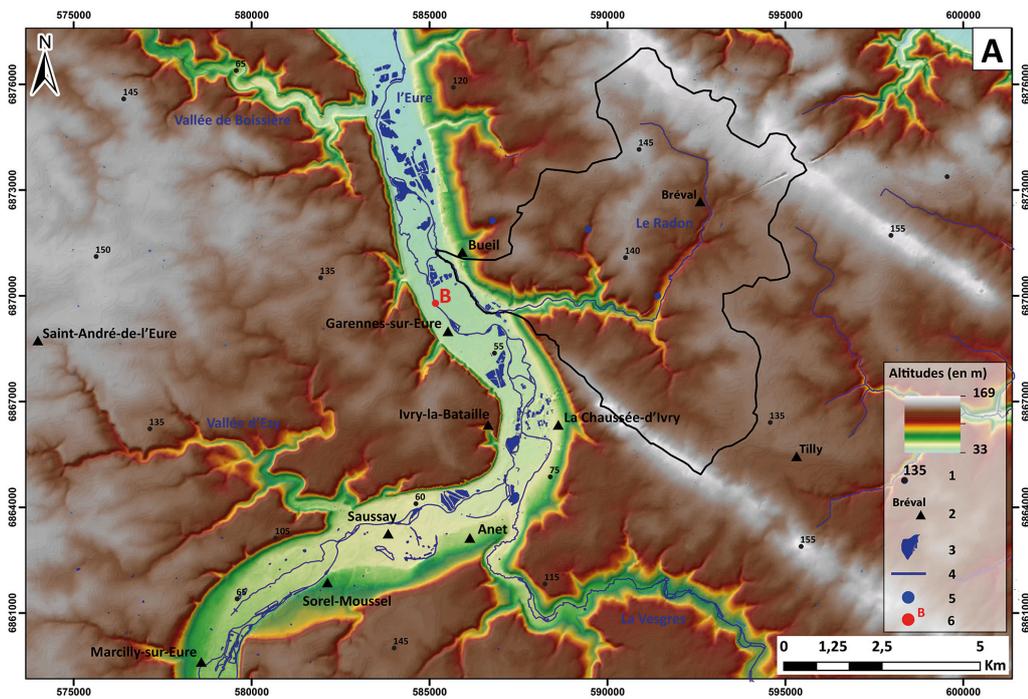


Figure 3.
A. Contexte topographique et hydrographique de la fenêtre d'étude, centrée sur la moyenne vallée de l'Eure.
 Légende :
 1. point coté,
 2. commune,
 3. ballastière,
 4. cours d'eau,
 5. exurgence karstique,
 6. localisation de la photographie B.



B. L'Eure à Garennes-sur-Eure, ici un tronçon largement aménagé et rectifié.
 DAO et Photo : T. Piau. Fonds orographique : BD Alti 25 m de l'IGN, Fonds hydrographique : BD Carthage de l'IGN, Système de coordonnées : Lambert 93 Conformal Conic.

d'importants dépôts colluviaux, sont individualisés entre Anet et Bueil. Le fond de vallée est tapissé d'alluvions fluviales holocènes surmontant la grave grossière weichsélienne. L'Eure coule depuis Nogent-le-Roi selon une orientation SSE/NNW avant de s'infléchir de près de 90° au niveau de Sorel-Moussel, puis de reprendre son orientation originelle à partir d'Ivry-la-Bataille [7]. Ce tracé en baïonnette serait lié à l'intersection entre l'Anomalie Magnétique du Bassin de Paris et l'accident linéaire « Avre-Eure-Seine-Oise » [8]. Sur le tronçon étudié, le cours de l'Eure est artificialisé par divers aménagements et activités anthropiques modernes (berges partiellement maçonnées, ballastières) et se caractérise par un chenal unique méandrique (fig. 3 A et B). En rive droite, ses deux principaux affluents sont la Vesgres et le Radon, tandis qu'en rive gauche, deux vallées sèches d'orientation NW-SE (vallée d'Ezy et de la Boissières) viennent se raccorder au fond de

vallée. Ces dernières ont la particularité d'avoir un cours supérieur relativement rectiligne qui, dans sa partie aval, évolue en une série de méandres peu encaissés dans la craie [9]. La nature plus ou moins perméable des couches géologiques affleurantes permet d'expliquer les différences de drainage entre la rive gauche, où le chevelu hydrographique est quasi inexistant sur les couches crayeuses, et la rive droite, où il est beaucoup plus développé du fait de

[7] D'après les données de la Banque Hydro, le module de l'Eure, près de l'exutoire à Louviers, est de 26,2 m³/s pour une puissance spécifique moyenne de 2 W/m², un trait typique des rivières de basse énergie et à lente capacité de réajustement morphodynamique dans BROOKES 1988.

[8] OBERT ET AL. 1992 ; 1997 ; LACOMBE & OBERT 2000.

[9] DEWOLF 1974.

Catégorie de données	Nature de la donnée	Source de la donnée
Topographiques	MNT BD ALTI® 25 m MNT RGE ALTI® 5 m MNT RGE ALTI® 1 m	IGN / Géoportail
Géologiques et géomorphologiques	Cartes à 1/50 000 BSS (logs géologiques)	BRGM / Infoterre CNRS / RCP 77
Historiques et archéologiques	Inventaire des sites archéologiques Cartes anciennes et archives historiques	DRAC-SRA INRAP Archives départementales (Eure, Eure-et-Loir, Yvelines)

Figure 4
Synthèse des données utilisées pour la réalisation de la cartographie géomorphologique de la moyenne vallée de l'Eure. DAO. T. Piau.

la présence des niveaux imperméables du Tertiaire (**fig. 1C**). Plusieurs exurgences sont d'ailleurs identifiées au contact entre le calcaire lutétien et les argiles/marnes imperméables dans le sous-bassin du Radon (**fig. 3A**).

Sur le plan archéologique, l'espace apparaît occupé de manière très contrastée, avec des zones remarquables non pas liées à l'occupation effective mais à une documentation archéologique fragmentaire. L'intensité de la recherche dans le fond de vallée et les plateaux adjacents reste très inégale. Une forte concentration de gisements archéologiques est observée dans les environs immédiats des grands centres urbains (Chartres et Dreux) et à la confluence Eure-Seine (boucle de Vaudreuil) touchés par de nombreuses opérations archéologiques préventives. *A contrario*, dans la moyenne vallée de l'Eure, le corpus de données archéologiques restreint ne permet pas d'analyser la complexité du réseau de peuplement et ses dynamiques et amène à s'interroger sur l'impact des processus géomorphologiques sur les conditions d'évolution et de conservation des vestiges archéologiques au cours du temps.

MÉTHODOLOGIE : LE CHOIX D'UNE APPROCHE GÉOARCHÉOLOGIQUE MULTISCALE ET DIACHRONIQUE

Entre mars et avril 2019, les missions de terrain ont été consacrées à la réalisation d'une cartographie géomorphologique afin de proposer un zonage des potentialités paléoenvironnementales et géoarchéologiques d'un tronçon de la moyenne vallée du bassin versant de l'Eure. Ce volet s'est articulé autour de quatre principaux objectifs : (1) identifier

les secteurs favorables à l'archivage de données sédimentaires à haute résolution temporelle et les processus géomorphologiques à l'origine de leur mise en place ; (2) évaluer la représentativité spatiale des séquences sédimentaires préservées dans le système géomorphologique ; (3) proposer une comparaison entre la répartition des gisements archéologiques et les formations superficielles quaternaires (argile à silex ; lœss ; colluvions ; alluvions) et (4) guider les prospections thématiques en cours et à venir. Principalement appuyée sur l'examen de la documentation disponible (**fig. 4**), l'analyse géomorphologique a été ponctuellement complétée par l'observation d'affleurements, de coupes naturelles (Guainville) et de sondages à la tarière pédologique dans le fond de vallée (site de Bellevue). La confrontation de ces données complémentaires, après leur géoréférencement et vectorisation dans un SIG (ArcMap 10.4), a contribué à spatialiser les formes et formations quaternaires (nappes et terrasses alluviales, glacis colluviaux et dépôts de pente, modelés et dépôts éoliens). Une zone atelier à fort potentiel géoarchéologique et paléoenvironnemental a par la suite été sélectionnée dans le fond de vallée de l'Eure, autour d'un sanctuaire d'époque romaine reconnu par photographie aérienne au lieu-dit Bellevue (Garenes-sur-Eure). L'analyse d'un modèle numérique de terrain à haute résolution (RGE Alti 1 m) a permis d'identifier les traces probables de paléochenaux à proximité immédiate du complexe culturel (**fig. 5**) [10]. Cet axe de recherche d'échelle plus locale avait l'ambition d'appréhender l'architecture

[10] BÉTARD ET AL. 2020.

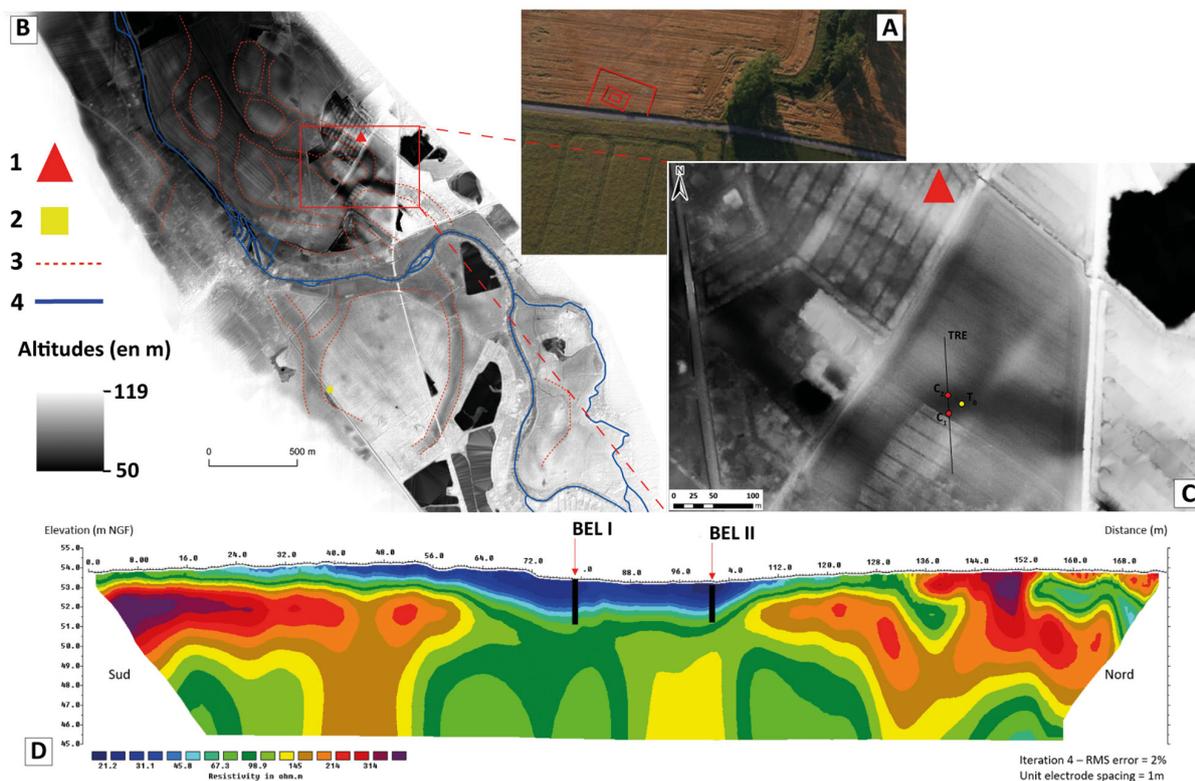


Figure 5

A. Sanctuaire antique de Bellevue repéré en prospection aérienne en 2011 par l'association Archéo27. **B.** Extrait du modèle numérique de terrain RGE Alti 1m de l'IGN et interprétation géomorphologique et paléohydrographique préliminaire à proximité du sanctuaire gallo-romain de Bellevue (triangle rouge) sur la commune de Garennes-sur-Eure. Légende : 1. *Fanum*, 2. Voie antique, 3. Paléochenaux, 4. Chenaux actuels de l'Eure, **C.** Tracé du profil de résistivité électrique (TRE) perpendiculaire à l'axe d'un paléochenal de l'Eure et localisation des deux carottages. **D.** Sur le profil de résistivité électrique, les mesures de résistivité apparente forte en rouge renvoient à des faciès grossiers (grave à silex roulés). *A contrario*, les mesures de résistivité apparente faible (en bleu et vert) renvoient à des faciès sédimentaires plus fins (argiles et limons). DAO : T. Piau (d'après PIAU 2019). Fonds orographique : RGE Alti 1 m de l'IGN, Fonds hydrographique : BD Carthage de l'IGN, Fonds Archéologique : BD Archéo du PCR ValEuRT, Système de coordonnées : Lambert 93 Conformal Conic.

du remblaiement sédimentaire de la plaine alluviale de l'Eure afin de restituer le paléoenvironnement fluvial au moment de l'implantation du site antique. En complément de l'interprétation paléohydrographique, une campagne de prospection géophysique (tomographie de résistivité électrique) a été réalisée en mai 2019 à l'aide d'un système multi-électrodes Abem Terrameter LS, en collaboration avec Clément Virmoux, (UMR 8591 LGP). Afin de reconstituer la géométrie 2D des structures sédimentaires, le profil de Tomographie de Résistivité Électrique (TRE) a été positionné perpendiculairement à l'axe d'écoulement du paléochenal. Pour conserver une résolution suffisante, l'espacement entre chaque électrode a été de 1 m pour une profondeur d'investigation d'environ 11 m (dispositif de « Schlumberger »). Début juin 2019, deux carottages (carottier à percussion cobra MK1) ont été implantés dans le

remblaiement du paléochenal afin de préciser l'architecture et l'âge des unités sédimentaires préalablement individualisées sur le profil TRE. Des analyses sédimentologiques en laboratoire (granulométrie, paramètres texturaux et image CM) sont venues étayer les observations texturales et structurales des unités, contribuer à caractériser les moments et les milieux de sédimentation fluviale associés, et finalement préciser les conditions paléohydrologiques. Une datation radiocarbone (^{14}C Accelerated Mass Spectrometry) a été exécutée au laboratoire BetaAnalytic sur un échantillon de sédiment organique prélevé sur la carotte BEL II. La date obtenue a été calibrée à 2 sigma avec le logiciel OxCal 4.3 (IntelCal13) [11].

[11] REIMER ET AL. 2013.

RÉSULTATS ET PREMIÈRES INTERPRÉTATIONS

CARACTÉRISTIQUES GÉOMORPHOLOGIQUES DE LA MOYENNE VALLÉE DE L'EURE

Des surfaces substructurales dominées par quelques buttes-témoins et entaillées par des vallées dissymétriques

Au sein de la moyenne vallée de l'Eure, les principaux reliefs structuraux sont les surfaces substructurales éocènes des plateaux (calcaire « grossier » d'âge lutétien, calcaire de Septeuil d'âge ludien), parfois étagées (avec des contrastes de lithologie en rive droite), où se détachent quelques buttes-témoins oligocènes armées de meulière (Butte des Bruyères) et dans lesquelles s'inscrit le réseau hydrographique actuel. Même si la tectonique (synclinal de l'Eure, faille de la Seine) et les formes structurales commandent les grandes lignes du relief, ce dernier est largement modelé et remanié par les dynamiques fluviales, éoliennes et périglaciaires quaternaires (**fig. 6 et 7A**).

Les modelés de versant et de vallée sont liés à la lithologie, à l'occupation des sols mais aussi et surtout à l'action des écoulements superficiels (du ruissellement diffus du sommet des interfluves à l'écoulement concentré des vallons et des vallées principales). C'est le cas des versants raidis par sapement fluvial en rive gauche de l'Eure, à proximité de Bueil. Il est cependant délicat de distinguer les versants réguliers liés au sapement fluvial de ceux « réglés », c'est-à-dire façonnés par les dynamiques périglaciaires puisqu'ils présentent le même profil d'équilibre de l'ordre de 20 à 25°. Généralement, ces deux processus se combinent dans l'espace et dans le temps. Les processus périglaciaires sont à l'origine d'un remaniement plus ou moins profond et étendu des formations superficielles. La cryoturbation, les fentes de gel et coins de glace affectent la partie supérieure de la nappe alluviale de Guainville (**fig. 7B**). Les processus périglaciaires ont également contribué à façonner les profils des vallons (à fond plat, en berceau et en V). La majorité des dissymétries des vallées et vallons rencontrés en rive gauche de l'Eure sur substrat crayeux est d'origine climatique. Les vallées sèches d'Ezy et de Boissière présentent une nette dissymétrie : les versants « froids » face à l'est sont en pente douce et recouverts de limons colluvionnés (versant d'accumulation par déflation, solifluxion et gélifluxion), alors que les versants « chauds », face à l'ouest,

sont taillés dans la craie et sont plus courts et raides (versant d'érosion). Enfin, la troncature des sols loessiques (sol brun lessivé) est accentuée par les pratiques agro-pastorales qui se développent dès le Néolithique [12]. Cette dernière est d'autant plus importante en rebord de plateau que la couverture loessique est peu épaisse. Le substrat calcaire est d'ailleurs affleurant dans ce secteur.

Des formes et formations quaternaires favorables à la conservation des archives paléoenvironnementales

Nappes et terrasses alluviales

Les dépôts alluviaux d'âge quaternaire sont composés des alluvions de l'Eure et de ses affluents : en rive droite, La Vesgres à l'extrémité sud et le Radon plus au nord ; en rive gauche, les vallées sèches d'Ezy au sud et de Boissières à l'extrémité nord de la carte (**fig. 6**). Les formations les plus anciennes sont disposées en terrasses étagées et occupent principalement le versant est de la vallée de l'Eure en rive droite. Elles forment des replats d'extension et de puissance variable et sont masquées localement par des dépôts colluviaux dans la moitié nord de la fenêtre d'étude, entre Bueil et Breuilpont. Une nappe alluviale (notée Fyd sur la carte géologique) d'une puissance de 4 m est individualisée en pied de versant à Guainville, à une altitude relative d'environ +10 m. Par analogie avec d'autres séquences alluviales décrites par Y. Dewolf [13] dans la vallée de l'Eure à la même altitude (Bueil, Chaudon), cette séquence est probablement d'âge saalien [14]. Elle est composée d'une alternance de sables fins à grossiers orangés plus ou moins limoneux ou argileux contenant des intercalations de lits subhorizontaux à galets de silex anguleux à sub-émoussés. Sur le terrain, des dépôts tufacés ont été identifiés dans le comblement d'un paléochenal dans la partie médiane de l'affleurement. La partie sommitale de la coupe est constituée d'un niveau à cailloutis de silex emballés dans une matrice argilo-sableuse ferruginisée (paléosol éemien ?) affectée par des figures de cryoturbation et des fentes de gel à rapporter au Weichsélien. Ce paléosol est recouvert de limons éoliens mêlés à des colluvions weichséliennes en provenance du versant (**fig. 7B**). Une campagne de

[12] WUSCHER ET AL. 2012.

[13] DEWOLF 1970.

[14] GUILLEMIN 2017.

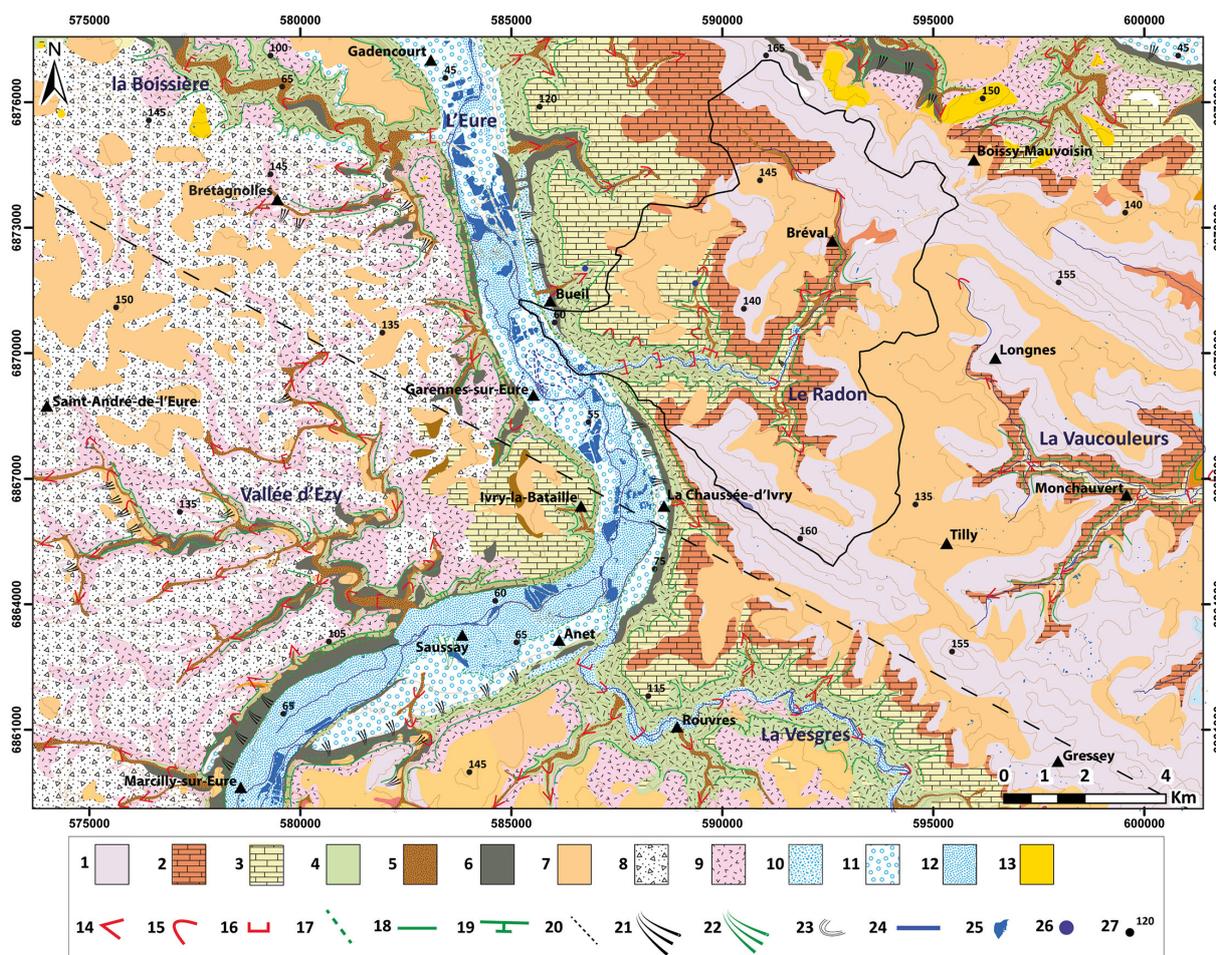


Figure 6

Carte géomorphologique de la moyenne vallée de l'Eure. Légende : 1. bancs meulériés encadrant une épaisse couche sableuse (g2, g1), Stampien-Sannoisien, 2. intercalations calcaires dans marnes et sables (e7, e6), Ludien-Bartonien, 3. calcaire grossier sur argiles et sables (e5, e3), Lutétien-Yprésien, 4. craie à silex (c6-c5), Campanien, 5. colluvions de fond de vallon et vallée, 6. colluvions de versant, 7. lœss, 8. bief à silex, 9. argile à silex, 10. alluvions de moyenne terrasse (Fx), 11. alluvions de basse terrasse (Fy), 12. alluvions récentes (Fz), 13. sables de Lozère, 14. vallon en V, 15. vallon en berceau, 16. vallon à fond plat, 17. rupture de pente concave, 18. rupture de pente convexe, 19. versant régulier lié au sapement fluvial, 20. axe synclinal, 21. glacis colluvial et colluvio-alluvial, 22. glacis alluvial, 23. courbes de niveau, équidistance 10 m, 24. chenal d'écoulement permanent, 25. étang ou ballastière inondée, 26. source, 27. cotes en mètres. DAO : T. Piau. Fonds orographique : BD Alti 25 m de l'IGN, Fonds hydrographique : BD Carthage de l'IGN, Fonds géologique : BD Charm-50 BRGM, Système de coordonnées : Lambert 93 Conformal Conic.

datation OSL (*Optically Stimulated Luminescence*) est envisagée en 2020 afin d'établir le cadre chronostratigraphique de cette séquence de référence. Plus en amont, entre les communes de Sorel-le-Moussel et d'Anet, une succession de trois nappes alluviales étagées est individualisée sur environ 500 m de large pour 5 km de long à des altitudes relatives comprises entre +5, +15 et +25 m [15]. Les alluvions holocènes tapissent le fond de vallée de l'Eure sur une épaisseur pouvant atteindre 10 m en pied de versant à la Chaussée-d'Ivry, d'après les logs de la Banque du Sous-Sol. Essentiellement limoneuses au sommet, elles présentent localement des niveaux plus argileux, sableux et parfois tour-

beux. Les alluvions holocènes reposent sur la grave grossière weichsélienne mise en place à la fin du Pléniglaciaire supérieur et remaniée au cours du Tardiglaciaire. Cette grave à silex est affleurante, voire subaffleurante dans le fond de vallée sur certaines parcelles agricoles où elle s'apparente à un niveau de basse terrasse. Plusieurs paléformes fluviales (paléochenaux et montilles sableuses) ont été décelées dans la topographie actuelle, en particulier à proximité du sanctuaire antique de Bellevue

[15] FENCKE ET AL. 2016.

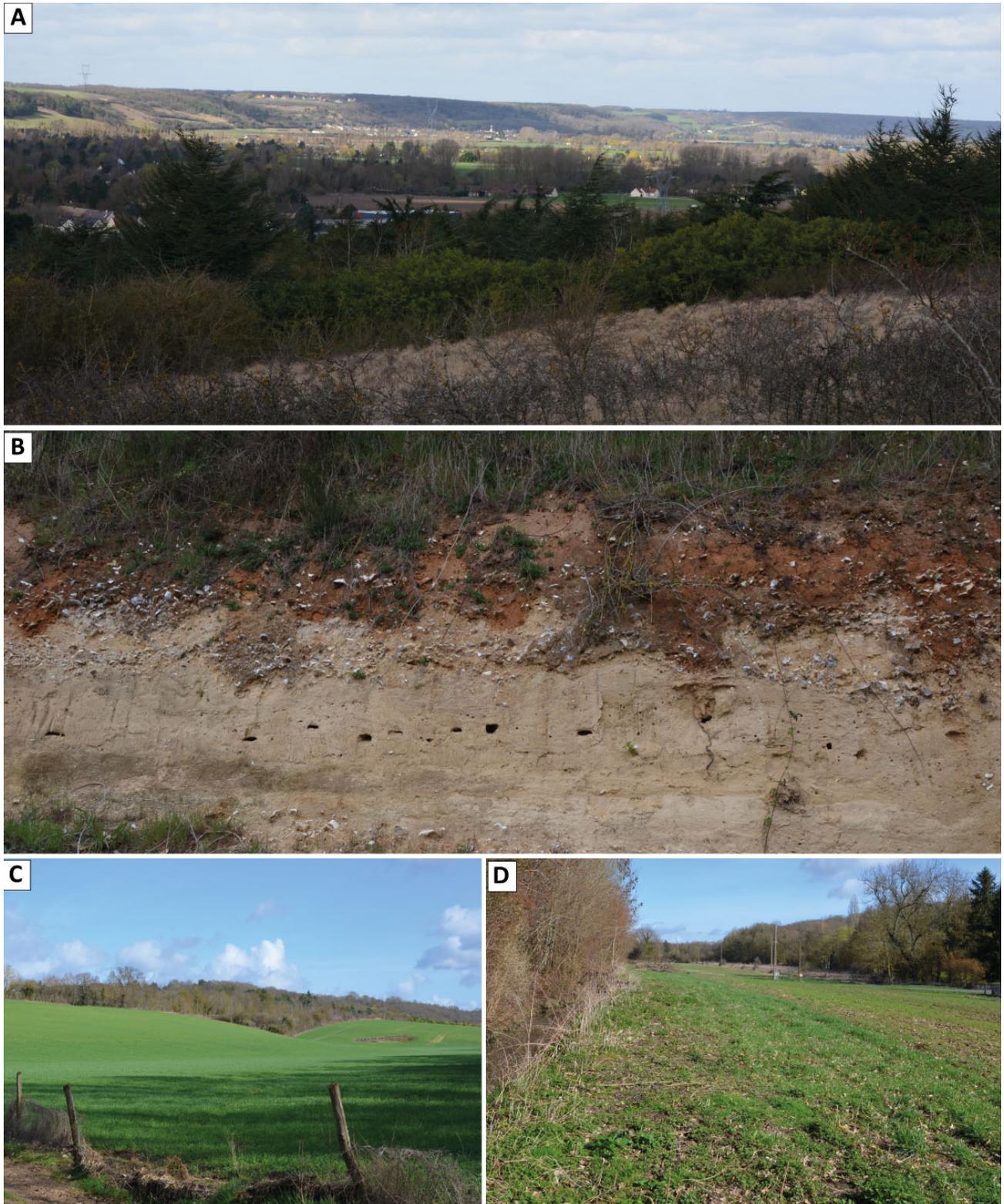


Figure 7

A. Vue en direction du nord-est de la vallée de l'Eure depuis le plateau en rive droite en aval de la Chaussée-d'Ivry. De part et d'autre de la vallée de l'Eure, la surface de ce plateau correspond *pro parte* à une surface substructurale éocène. Ce panorama permet d'observer, au second plan, le versant crayeux de la rive gauche de l'Eure réglé par le sapement fluvial et les processus périglaciaires quaternaires. **B.** Terrasse alluviale de Guainville. Noter, dans la partie sommitale de l'affleurement, les nombreuses marques de cryoturbation, fentes de gel et coins de glace remaniant le niveau sous-jacent ferruginisé. **C.** Basse vallée du Radon. Noter le faible remblaiement alluvial du fond de vallée, le versant se raccordant directement au fond de vallée. **D.** Glacis colluvial identifié dans la moyenne vallée du Radon. Noter également le fossé de drainage agricole à l'extrémité gauche de la photographie, interrompant le glacis colluvial. Photos : T. Piau et F. Bétard, 2019.

sur la commune de Garennes-sur-Eure. Concernant les petits affluents de l'Eure en rive droite, ils se distinguent de leurs voisins développés dans la craie. Les vallées du Radon et de la Vesgres se caractérisent par un profil transversal régulier et ne présentent qu'un drain unique à l'opposé des vallées crayeuses en rive gauche, qui s'organisent en un ensemble de petits drains multiples dans leur partie amont [16]. L'une et l'autre sont *a priori* marquées par l'absence d'un étagement des formes alluviales (fig. 7C). Aujourd'hui, le Radon est incisé d'un mètre environ dans les alluvions limoneuses de sa plaine alluviale et n'emprunte plus, sur certains tronçons (basse vallée), les points bas du fond de vallée. Cette migration de la rivière hors de son talweg semble être liée à son artificialisation croissante depuis la période médiévale (moulins à eau et biefs associés). La confluence du Radon avec l'Eure est totalement artificielle et, d'après les planches du cadastre napoléonien de la commune de Garennes-sur-Eure, antérieure à 1830.

Glacis colluviaux et dépôts de pente

En rive gauche de l'Eure, dans les fonds de vallée drainés par des ruisseaux à écoulement temporaire et les vallons secs, les remblaiements colluviaux semblent peu épais (< 2 m [17]) en raison de leur forte pente (> 10 %). Il est plus difficile d'établir la puissance du remblaiement en tête de vallon en l'absence de sondages. Les formations de bas de versant sont quasi systématiques au sein de la fenêtre d'étude. Elles concernent les versants crayeux abrupts de la vallée de l'Eure et, dans une moindre mesure, ceux de ses affluents où les pentes sont plus faibles (sous-bassin du Radon). Ces colluvions remobilisent les formations superficielles des plateaux et des versants (limons éoliens, argiles et biefs à silex) et se raccordent au fond de vallée sous forme de glacis. D'âge weichsélien à holocène, elles se sont mises en place par le biais de processus gravitaires (cryoclastie), de ruissellements concentrés et diffus sur les versants [18]. Enfin, les formations de « biefs à silex », c'est-à-dire des argiles à silex remaniées par les processus périglaciaires, occupent deux positions topographiques en rive gauche : les biefs de plateau et les biefs de versant (fig. 6).

Modelés et dépôts éoliens

La surface des plateaux adjacents à la vallée de l'Eure et les versants « sous le vent » (orientés au nord et à l'est) sont nappés d'une couverture limoneuse, irrégulière et discontinue, d'épaisseur

métrique, déposée par les processus éoliens durant les épisodes froids et arides du Pléistocène [19]. Les séquences lœssiques sont plus épaisses au centre des plateaux, à proximité de la Vesgres (entre 0,80 et 1 m) et peuvent atteindre jusqu'à 2,50 m à Bû plus au sud [20]. En l'absence de prospection approfondie sur les plateaux et les versants, aucune différenciation n'a été faite entre les sables limoneux, les limons non-calcaires et les limons calcaires. La carte géomorphologique produite dans le cadre de ce travail reprend l'extension des limons de plateau (puissance supérieure ou égale à 3 m) des cartes géologiques au 1/50 000^e (BdCharm-50).

IMPACTS DES PROCESSUS GÉOMORPHOLOGIQUES QUATERNAIRES DANS LA PRÉSERVATION DES GISEMENTS ARCHÉOLOGIQUES : PREMIERS ÉLÉMENTS DE RÉPONSE

La spatialisation des formes d'érosion et des formations d'accumulation permet d'apporter des éléments de réponse sur le rôle d'un éventuel biais taphonomique dans la distribution actuelle des gisements archéologiques (fig. 8). Les gisements identifiés dans le fond de vallée sont prioritairement implantés sur des terrasses alluviales surplombant de quelques mètres la plaine d'inondation de l'Eure. C'est le cas des enclos protohistoriques repérés en prospection aérienne dans la portion sud-est de la zone d'étude, entre Saussay et Anet. Ce replat est propice à l'implantation humaine car (1) suffisamment près de la ressource en eau pour pouvoir en bénéficier, (2) topographiquement isolé en cas d'épisodes de crue (5 m de dénivelé environ), (3) à la confluence entre les vallées de la Vesgres et de l'Eure. À l'échelle de l'Holocène, les terrasses alluviales anciennes sont fossilisées sous d'épais dépôts colluviaux du fait d'un important colluvionnement au pied des versants crayeux (glacis colluviaux entre Bueil et Breuilpont). En rive concave, l'absence de nappe alluviale bien développée et la présence de versants abrupts, réglés par les processus périglaciaires et le sapement fluvial, ont pu entraîner un démantèlement des gisements

[16] DEWOLF 1974.

[17] *Ibid.*

[18] BORDERIE & CHAMAUX 2016.

[19] WUSCHER *ET AL.* 2012 ; BORDERIE 2014 ; BORDERIE & CHAMAUX 2016.

[20] DEWOLF 1974.

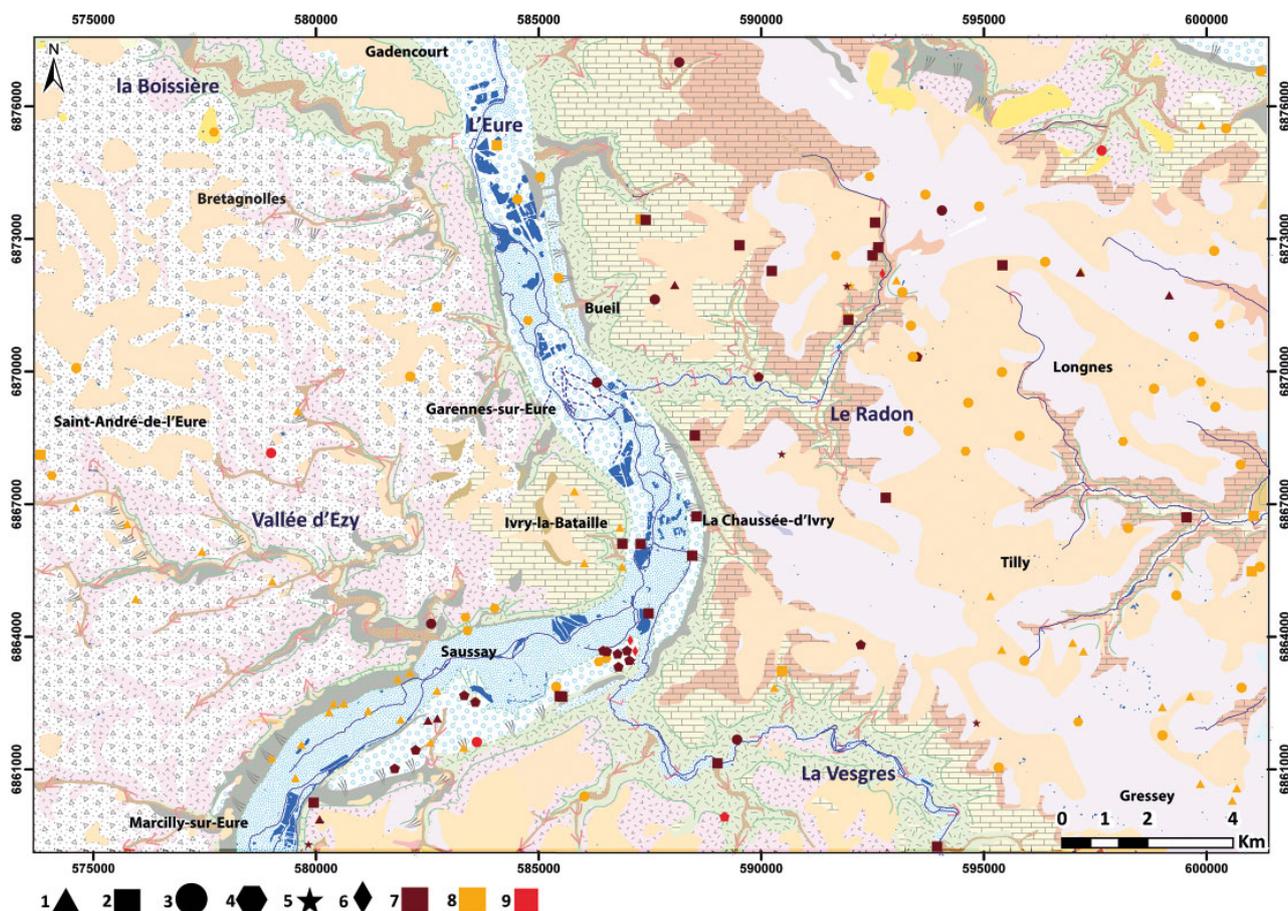


Figure 8

Comparaison entre la localisation des gisements archéologiques et celle des formations superficielles quaternaires. Légende : 1. Indéterminé, 2. Moyen Âge, 3. Antiquité, 4. Protohistoire, 5. Néolithique, 6. Paléolithique, 7. Gisement certain, 8. Gisement probable, 9. Gisement douteux. DAO : T. Piau. Fonds orographique : RGE Alti 1 m de l'IGN, Fonds hydrographique : BD Carthage de l'IGN, Fonds Archéologique : BD Archéo du PCR ValEuRT, Système de coordonnées : Lambert 93 Conformal Conic.

préhistoriques par migration latérale des chenaux de l'Eure. Les enceintes/enclos circulaires non datés (Protohistoire ?) repérés en rive gauche, entre Marcilly-sur-Eure et Saussay, laissent supposer une relative stabilité de ce secteur durant l'Holocène récent, le cours de l'Eure s'étant déporté d'environ 1 km en rive droite à une période encore indéterminée. La préservation des paléoflumes fluviaux en rive gauche offre la possibilité de reconstituer et de dater les différentes phases de mobilité latérale de l'Eure au cours de la dernière période post-glaciaire dans une perspective géoarchéologique. Cette portion de la vallée est encore peu urbanisée et la prédominance des champs cultivés favorise la découverte de gisements par prospection aérienne et pédestre. Dans la plaine d'inondation de l'Eure, les vestiges connus sont rattachés à l'Antiquité et au Moyen Âge. Les carrières d'extraction de granulats (ballastières entre Bueil et Breuilpont) et

les potentielles phases d'alluvionnement au cours de l'Holocène récent ont pu détruire en partie, ou masquer localement, les indices d'occupation les plus fugaces des périodes pré- et protohistoriques (structures fossoyées, restes lithiques).

En ce qui concerne les gisements repérés en contexte de plateau, ceux de rive droite sont pour la plupart mis au jour dans des secteurs où l'épaisseur de la couverture lœssique est supérieure à 1 m au centre des plateaux (Bréval, Tilly, Longnes). En rebord de plateau et sur les hauts de versant où le substrat calcaire est affleurant, ils sont peu nombreux et postérieurs à l'Antiquité (Bueil, Chaussée-d'Ivry). Dans cette position topographique, les processus d'érosion et de décapage intense (ruissellement et ravinement) ont probablement participé au démantèlement des vestiges pré- et protohistoriques. En rive gauche, le corpus archéologique est très pauvre sur les plateaux crayeux nappés

de manteaux d'altérites (argiles à silex) et de biefs à silex. Les gisements sont localisés à proximité des vallées sèches d'Ezy et de Boissière en tête de vallon, dans des secteurs en pente faible. Cette lacune pourrait être liée à une insuffisance des recherches (biais scientifique) et/ou à une érosion du manteau d'altérites et des limons éoliens (biais taphonomique). Enfin, les sites implantés sur les versants sont plus rares. Ils sont repérés dans des têtes de vallon à faible pente (sous-bassin du Radon et vallées d'Ezy et de Boissière). Sur les versants, qui sont des zones de transport sédimentaire dominant caractérisés par des sols d'érosion jeunes (sols bruns lessivés tronqués), les processus de remaniement sont importants (solifluxion en contexte périglaciaire et érosion agricole durant l'Holocène) et la troncature des enregistrements archéologiques est fréquente [21]. En termes de potentiel archéologique, les versants orientés nord-ouest et nord-est avec des séquences lœssiques weichséliennes bien développées mais discontinues sont souvent propices à la découverte de vestiges paléolithiques (vallées sèches d'Ezy et de Boissière en rive gauche). Les glacis d'érosion des buttes stampiennes (argiles à meulière et sables stampiens) en rive droite de l'Eure sont des contextes favorables à la mise au jour de gisements préhistoriques bien préservés du fait d'un important colluvionnement le long des versants à l'origine de dépôts de pente stratifiés. L'association buttes stampiennes/occupations paléolithiques a d'ailleurs été mise en évidence à plusieurs reprises sur les plateaux de Brie à Sénart en Seine-et-Marne [22]. En contexte de plateaux lœssiques, la préservation des gisements archéologiques est souvent médiocre, surtout en rebord de plateau où la couverture limoneuse est peu épaisse. Néanmoins, la mise en culture rend les vestiges archéologiques plus facilement identifiables en prospection de surface en raison des importants remaniements liés aux labours. Cette configuration géomorphologique permet d'expliquer la forte concentration de gisements sur les plateaux en rive droite de l'Eure. Enfin, plusieurs questions émergent quant aux modalités de gestion de la ressource en eau, en particulier sur les plateaux de rive gauche où la forte perméabilité de la craie réduit la densité de drainage. L'approvisionnement en fer pendant la Protohistoire et l'Antiquité et l'explo-

tation ponctuelle des gisements ferreux dans les zones de Sables de Lozère et les bancs de meulière restent à étudier.

Ce premier état des lieux permet de confirmer, en plus de la variable « intensité de la prospection », le rôle majeur des processus géomorphologiques (ruissellement diffus et concentré, processus gravitaires) dans la préservation actuelle des gisements archéologiques. L'alluvionnement et le colluvionnement ont probablement participé à l'enfouissement et à la conservation des gisements (terrasses alluviales quaternaires entre Saussay et Anet, glacis colluviaux des buttes stampiennes). *A contrario*, en rive concave, en contexte de plateau lœssique ou sur les versants les plus pentus, les remaniements liés à la dynamique fluviale, au ruissellement diffus et aux pratiques agro-pastorales ont pu impacter l'intégrité des gisements et/ou les rendre plus facilement visibles en prospection de surface. La carte archéologique actuelle de la fenêtre d'étude ne reflète donc pas l'occupation réelle de l'espace par les sociétés anciennes, intégrant ainsi un certain nombre de biais taphonomiques individualisés à l'échelle régionale. À plus long terme, une analyse fine des formations superficielles (nature, géométrie, chronologie) devrait permettre de préciser les conditions d'évolution et de préservation des gisements archéologiques à une échelle plus locale.

RECONSTITUTION PRÉLIMINAIRE DE L'ENVIRONNEMENT GÉOMORPHOLOGIQUE D'UN SANCTUAIRE D'ÉPOQUE ROMAINE DANS LA PLAINE D'INONDATION DE L'EURE

En 2011, des prospections aériennes (association Archéo27) ont mis en évidence les traces d'un sanctuaire d'époque romaine dans la plaine d'inondation de l'Eure (rive droite) sur la commune de Garennes-sur-Eure au lieu-dit « Bellevue ». L'édifice, entouré d'un portique, adopte un plan rectangulaire, proche du carré, avec une galerie périphérique de même plan, caractéristique du type *fanum* (fig. 5A). La cartographie régionale des formations superficielles (cf. 4.1) couplée à l'analyse d'un modèle numérique de terrain à haute résolution (RGE alti 1 m) a permis d'identifier à proximité immédiate de ce sanctuaire plusieurs paléoformes fluviales. Des prospections sur le terrain (pédestre et géophysique) ont confirmé l'existence d'une zone de paléochenal, bien marquée dans la topographie actuelle, d'environ 50 m de large et incisée de 2 m dans la grave grossière à silex roulés d'âge weichsélien. Le remblaiement diachrone de cette entité offre la possibilité de do-

[21] BORDERIE & CHAMAUX 2016.

[22] BLASER ET AL. 2010 ; CHAUSSÉ ET AL. 2015.

cumenter et dater les jalons de l'histoire paléoenvironnementale de l'Eure dans sa moyenne vallée en lien avec l'occupation humaine (fig. 5B, C et D). Ce site à fort potentiel géoarchéologique a été retenu comme zone atelier afin d'analyser, de façon croisée et à une échelle locale, les données archéologiques, historiques et géomorphologiques dans un objectif commun d'interpréter l'environnement du site archéologique (contexte topographique d'implantation) et d'éclairer les interrelations entre le sanctuaire antique de Bellevue et la plaine d'inondation de l'Eure (risques passés, exploitation et gestion de la ressource en eau).

L'étude des faciès sédimentaires dérivés des carottes exploratoires BEL I et BEL II permettent de proposer un premier séquençage du remblaiement alluvial. Le cadre chrono-stratigraphique reste toutefois à étayer. Un granoclassement normal décroissant est observé de la base du remblaiement de chenal (graviers et sables limoneux) à son sommet (limons sableux). Cette configuration révèle une perte graduelle de compétence. La base du remblaiement alluvial (unité I) est composée de sables graveleux interprétés comme le sommet de la charge de fond d'un chenal énergétique. Succèdent ensuite des sables limoneux gris à intercalation de sables grossiers (unité II) qui traduisent des variations dans les conditions hydrodynamiques du chenal. L'unité III (sables limoneux gris à traits d'hydromorphie) indique le passage d'un chenal

de type énergétique à moribond. Ce dernier paraît se déconnecter progressivement du drain principal qui s'éloigne à une distance modérée (défluviation ou changement de style fluvial ?). L'unité IV est composée de limons sableux gris carbonatés riches en malacofaunes et micro-charbons de bois datés entre 2146 et 2010 av. J.-C. sur la carotte BEL II [23]. Le chenal, en cours d'atterrissement, n'est probablement plus en eau permanente durant cette période. Enfin, des dépôts d'inondation limono-sableux assez grossiers (entre 40 et 50 cm d'épaisseur, unité V) viennent napper le sommet du remblaiement alluvial. Ces dépôts de plaine d'inondation provoquent une uniformisation de la topographie du fond de vallée (Fig. 9). L'analyse morpho-sédimentaire et paléohydrologique préliminaire du chenal de Bellevue permet finalement d'identifier trois grandes phases : (1) mise en place d'un chenal énergétique sans doute vers le milieu de l'Holocène ; (2) déconnexion du chenal de l'axe fluvial principal et remblaiement progressif à partir de l'âge du Bronze (2146-2010 av. J.-C.) par des limons sableux carbonatés probablement issus de la

[23] Le sédiment organique de l'unité IV du carottage BEL 2 a fait l'objet d'un prélèvement pour une datation AMS (BetaAnalytic). Un second échantillon avait également été prélevé sur l'unité IV de BEL I pour datation radiocarbone mais ce dernier n'a fourni aucun résultat.

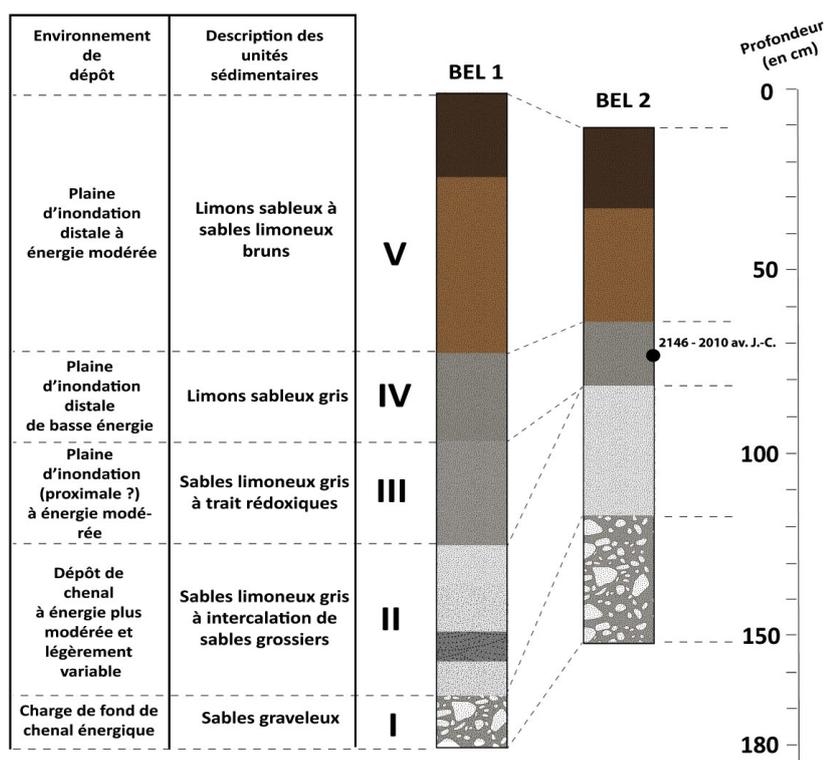


Figure 9
Interprétation en termes de milieux de sédimentation des unités sédimentaires décrites à partir des carottes BEL I et BEL II réalisées dans le remblaiement du paléochenal de Bellevue. DAO : T. Piau (d'après PIAU 2019).

dégradation des sols du bassin-versant de l'Eure ; (3) atterrissement et abandon total du chenal de l'Antiquité jusqu'à nos jours. Ces premiers résultats indiquent que si le chenal a bien été remblayé avant l'implantation du sanctuaire, le site antique est resté potentiellement soumis aux inondations de l'Eure lors de crues épisodiques.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

La prospection géomorphologique s'est avérée fondamentale pour mettre en lumière la diversité des archives sédimentaires de l'Eure moyenne et le rôle des biais taphonomiques (érosion/sédimentation) dans la préservation des gisements archéologiques au sein de chaque compartiment du géosystème (plateau, versant, fonds de vallée et vallon). Elle a contribué à faire émerger deux zones ateliers possédant un fort potentiel paléoenvironnemental et géoarchéologique. Sur le site de Bellevue, l'étude géoarchéologique souligne le potentiel élevé des archives sédimentaires fluviatiles pour caractériser la trajectoire socio-environnementale de l'Eure moyenne au cours de l'Holocène et mettre en lumière les variables de contrôle dans cette évolution. L'année 2020 sera consacrée à la poursuite des campagnes de prospections géophysiques (TRE et géoradar) et de carottages autour du complexe culturel où d'autres paléochenaux ont été individualisés. En complément des analyses sédimentologiques et des datations géochronologiques (OSL sur sables quartzueux, AMS et ^{14}C sur sédiments organiques et micro-charbons de bois), une étude des malacofaunes est envisagée afin de mieux caractériser les unités morpho-écologiques contemporaines de chaque milieu de sédimentation. Par ailleurs, le sous-bassin du Radon, affluent de l'Eure en rive droite, offre une documentation archéologique diachronique (enclos protohistoriques, sanctuaires d'époque romaine, nécropoles et habitats mérovingiens, commanderie médiévale) et un cadre morpho-sédimentaire favorable à la mise en œuvre d'une approche par budget sédimentaire. Une reconnaissance préliminaire de terrain a permis de cibler les secteurs clés pour analyser les profils pédologiques mis en place sur les dépôts lœssiques et reconstituer la géométrie des dépôts alluviaux

dans le fond de vallée le long de transects représentatifs. L'objectif sera d'appréhender la temporalité des dynamiques érosives et de quantifier la redistribution des sédiments à différentes échelles spatio-temporelles. À plus longue échéance, d'autres prélèvements sédimentaires sont envisagés dans un sous-bassin à lithologie crayeuse de rive gauche de l'Eure : la vallée sèche d'Ezy.

Enfin, ce travail de recherche s'inscrit au cœur d'enjeux socio-culturels de premier ordre. La sauvegarde du patrimoine culturel de la vallée de l'Eure, notamment archéologique, menacé de disparaître du paysage (érosion, ouverture de carrières pour l'exploitation des granulats, urbanisation croissante) et de la mémoire collective apparaît comme un enjeu de conservation majeure. L'inventaire du patrimoine archéologique, dernier témoignage des interrelations Homme-milieu à l'échelle du Quaternaire, pourra contribuer à définir les futures stratégies de conservation et de valorisation de cet héritage culturel en tenant compte de l'impact des processus géomorphologiques passés et actuels. Parmi les sites à forte valeur géoscientifique et culturelle, on notera le gisement de Saint-Prest (haute terrasse de l'Eure à restes de mammifères et vestiges acheuléens) et la coupe de Chaudon (séquence de lœss-paléosols et vestiges préhistoriques du Paléolithique moyen [24]) qui font figure de référence pour la géologie du Quaternaire et la préhistoire de la vallée de l'Eure. D'autres sites plus confidentiels et/ou en cours d'étude (coupe de Guainville) méritent aussi une attention particulière et une réflexion collective en ce qui concerne leur sauvegarde. Mené en étroite collaboration avec les acteurs locaux (élus, gestionnaires, associations, habitants) et les collectivités (région, départements et leurs services dédiés : DRAC, services archéologiques), le programme de recherche ValEuRT veut agir comme un vecteur de diffusion des connaissances géoarchéologiques auprès de la population comme des acteurs locaux et, à travers les propositions de valorisation didactique des sites, contribuer à la mise en valeur socio-économique du territoire étudié (renouveler les circuits culturels et touristiques). ■

[24] BORDERIE 2014.

BIBLIOGRAPHIE

- BEAUCHAMP, Axel, 2019**, *Impacts des aménagements hydrauliques sur les systèmes fluviaux bas-normands depuis 2000 ans. Approches géomorphologique et géoarchéologique*, Thèse de doctorat, Université de Caen Normandie.
- BERGER, Jean-François, CAROZZA, Jean-Michel, CASTANET, Cyril, CUBIZOLLE, Hervé, DENDIEVEL, André-Marie, DESCHODT, Laurent, FRANC, Odile, GHILARDI, Matthieu, LESPEZ, Laurent, SALVADOR, Pierre-Gil, SIVAN, Olivier, VANNIÈRE, Boris, ARGANT, Jacqueline, BOULEN, Muriel, BROCHIER, Jacques-Léopold, CAROZZA, Laurent, GERMAIN-VALLÉE, Cécile & LEMER, Laurence, 2018**, « Climat et environnements : les étapes de la première anthropisation de l'espace (6 000-2 000 BCE) en France » dans Jean Guilaine & Dominique Garcia (éd.) : *La protohistoire en France*, Paris (collection Histoire et Archéologie).
- BÉTARD, François, VIEL, Vincent, ARNAUD-FASSETTA, Gilles & PIAU, Théophile, 2020**, « Géomorphologie et paléoenvironnements de la Vallée de l'Eure. Éléments contextuels et perspectives géoarchéologiques » dans Fabienne Dugast & Ingrid Renault (éd.), *Gestion et formation des territoires de la Préhistoire à nos jours. Approches et perspectives exploratoires*, Montagnac (collection Archéologie du paysage).
- BLASER, Frédéric, BLASER, Romana, WUSCHER, Patrice & BRUANT, Jean, 2010**, « Une occupation du Paléolithique moyen sur la butte des « Hauts-Fresnais » à Ballainvilliers (Essonne) », *Revue Archéologique d'Ile-de-France* 3, p. 5-22.
- BORDERIE, Quentin, 2014**, *QuOrEL. Inventaire documentaire des formations quaternaires d'origine éolienne en Eure-et-Loir*, Rapport de programme de prospection thématique, Décembre 2014, Conseil général d'Eure-et-Loir, Chartres.
- BORDERIE, Quentin & CHAMAUX, Gabriel, 2016**, *QuOrEL, formations limoneuses quaternaires d'origine éolienne en Eure-et-Loir : rapport 2015-2016*, Conseil général d'Eure-et-Loir, Chartres.
- BRAVARD, Jean-Paul & MAGNY, Michel (éd.), 2002**, *Les fleuves ont une histoire. Paléoenvironnement des rivières et des lacs français depuis 15 000 ans*, Paris.
- BROOKES, Andrew, 1988**, *Channelized rivers. Perspectives for environmental management*. Wiley, Chichester.
- BROWN, Anthony Gavin, 1997**, *Alluvial geoarchaeology. Floodplain archaeology and environmental change*, Cambridge.
- CHAUSSÉ, Christine, BLASER, Frédéric, DEBENHAM, Nick, ROQUE, Céline & VARTANIAN, Emmanuel, 2015**, « Pléistocène supérieur et paléolithique dans le domaine des sables stampiens (rupéliens) du sud du bassin de Paris : les données du site de Melun-Montaigu (Seine-et-Marne, France) », *Quaternaire* 26/3, p. 245-255.
- DEWOLF, Yvette, 1970**, « Premières observations sur deux coupes de la vallée de l'Eure ». *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire* 7/2-3, p. 191-198.
- DEWOLF, Yvette, 1974**, *Carte géomorphologique détaillée de la France au 1/50 000 : feuille XX-14, Saint-André-de-l'Eure*, Carte et notice explicative, CNRS, RCP 77, Paris.
- DUGAST, Fabienne, 2019**, « Projet Vallée de l'Eure : une rivière, des territoires », *Journée de restitutions des projets exploratoires OPUS 2017-2018*, 6 juin 2019, Paris.
- FENCKE, Emilie, 2016** avec coll. CHAMAUX, Gabriel, BORDERIE, Quentin, DOUARD, Michel, NOËL, Jean-Yves, PERRICHON, Pierre, SELLES, Hervé & SOREL, Yoann, « Anet-Saussay (Centre - Eure-et-Loir), Liaison routière RD928-RD116. Des occupations de la Protohistoire ancienne à l'époque contemporaine : rapport de diagnostic d'archéologie préventive », Chartres, Conseil départemental d'Eure-et-Loir.
- GILIGNY, François (éd.), 2005**, *Louviers « La Villette » (Eure) : un site du Néolithique moyen en zone humide*, Rennes (Documents archéologiques de l'Ouest).
- GONET, Adrien, 2017**, *Du plateau au fond de vallée : Apport de l'étude de trois sites archéologiques à la compréhension des dynamiques géomorphologiques holocènes en Normandie*, Thèse de doctorat, Université de Rouen Normandie.
- GUILLEMIN, Claudine, 2017**, « Les alluvions anciennes de l'Eure à Guainville », Inventaire du Patrimoine Géologique de la Région Centre, Fiche argumentaire de présélection des sites, DREAL Centre.
- LACOMBE, Olivier & OBERT, Daniel, 2000**, « Héritage structural et déformation de couverture : plissement et déformations tertiaire dans l'Ouest du bassin de Paris », *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 300, p. 793-798.
- LEBLÉ, Geoffrey, 2016**, « Une séquence sédimentaire plurimillénaire de l'Eure à Val de Reuil (27) », *ArchéoThéma* 38, p. 69.
- LESPEZ, Laurent, 2012**, *Le temps de l'environnement et des paysages des systèmes fluviaux au cours de l'Holocène. Normandie, Grèce, Mali*, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, 1, Université de Caen Basse-Normandie.
- MAGNY, Michel, 2019**. *Aux racines de l'Anthropocène. Une crise écologique reflet d'une crise de l'homme*, Lormont.
- MOREAU, Clément, 2011**. *Val de Reuil, « Le Chemin aux Errants »*, Rapport final d'opération de diagnostic archéologique, Archeodunum.
- OBERT, Daniel, DEFFONTAINES, Benoît & GELY, Jean-Pierre, 1992**, « Adaptation du réseau hydrographique aux structures et à l'évolution néotectonique. Application au Bassin Parisien », *Bulletin d'Information des géologues du Bassin de Paris* 29/4, p. 85-95.

OBERT, Daniel, DEFFONTAINES, Benoît, GELY, Jean-Pierre, JOLY, Michel, LACOMBE, Olivier, LORENZ, Jacqueline & POMEROL, Charles, 1997, « Tectonique plicative de couverture dans le Lutétien supérieur de la vallée de l'Eure : Indice d'un accident profond », *Bulletin d'Information des géologues du Bassin de Paris* 34/2, p. 13-18.

PASTRE, Jean-François, FONTUGNE, Michel, KUZUCUOĞLU, Catherine, LEROYER, Chantal, LIMONDIN-LOZOUET, Nicole & TALON, Marc, 1997, « L'évolution Tardi- et Postglaciaire des lits fluviaux au nord-est de Paris (France). Relation avec les données paléoenvironnementales et l'impact anthropique sur les versants », *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 4, p. 291-312.

PASTRE, Jean-François, ORTH, Paul, LE JEUNE, Yann & Bensaadoue, Sonia, 2006, « L'homme et l'érosion dans le Bassin Parisien (France). La réponse morpho-sédimentaire des fonds de vallée au cours de la seconde partie de l'Holocène » dans Philippe Allée & Laurent Lespez (éd.), *L'érosion entre société, climat et paléoenvironnements. Actes de la table-ronde en l'honneur de René Neboit-Guilhot*, Clermont-Ferrand (collection Nature et Société 3), p. 237-247.

PIAU, Théophile, 2019, *Dynamique géomorphologique holocène et occupation humaine dans le bassin-versant de l'Eure : apport d'une approche géoarchéologique multiscalaire*, mémoire de Master 2, Université de Paris, Paris.

REIMER, Paula J., BARD, Edouard, BAYLISS, Alex, BECK, Warren J., BLACKWELL, Paul G., BRONK RAMSEY, Christopher, BUCK, Caitlin E., CHENG, Hai, EDWARD, Lawrence R., FRIEDRICH, Michael, GROOTES, Pieter M., GUILDERSON, Thomas P., HAFLIDASON, Hafliði, HAJDAS, Irka, HATTÉ, Christine, HEATON, Timothy J., HOFFMAN, Dirk, HOGG, Alan G., HUGHEN, Konrad A., KAISER, Felix K., KROMER, Bernd, MANNING, Sturt W., NIU, Mu, REIMER, Ron W., RICHARDS, David A., SCOTT, Marian E., SOUTHON, John R., STAFF, Richard A., TURNEY, Christian S. M., & VAN DER PLICHT, Johannes, 2013, « IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0-50,000 Years cal BP », *Radiocarbon* 55/4, p. 1869-1887

WUSCHER, Patrice, BLASER, Romana, CAMMAS, Cécilia, DURAND, Juliette, GLISONI, Steve, SARON, Emmanuelle & PASTRE, Jean-François, 2012, « Des plateaux, des limons et des hommes : état des connaissances et questions sur les sols et l'érosion tardiglaciaires et holocènes en Île-de-France », *Revue Archéologique d'Île-de-France* 5, p. 5-28.

LES GÉOSCIENCES AU SERVICE DE L'ARCHÉOLOGIE AGRAIRE. UNE ÉTUDE DE CAS SUR LES RIDEAUX DE CULTURE DE GOLDBACH (68)

Dominique SCHWARTZ ^{1,*}, Vincent ROBIN ², Pierre ADAM ³, Philippe SCHAEFFER ³,
Anne GEBHARDT ^{1,4}, Pierre-Alexis HERRAULT ¹, Benjamin KELLER ¹, Daniele DAPIAGGI ^{1,5},
Claire STEVENEL ^{1,5}, Maxime THISS ^{1,5}, Martine TRAUTMANN ⁶, Damien ERTLEN ¹

¹ Laboratoire Image, Ville, Environnement ; UMR 7362 UNISTRA/CNRS

² Laboratoire interdisciplinaire des environnements continentaux (LIEC), Université de Lorraine

³ Laboratoire de Biogéochimie Moléculaire, UMR 7177 UNISTRA/CNRS

⁴ INRAP Grand Est

⁵ Étudiants du master Géographie Environnementale, UNISTRA

⁶ UMS 830, EOST, CNRS

*dominique.schwartz@live-cnrs.unistra.fr

RÉSUMÉ

Les rideaux de culture sont des talus qui se forment involontairement à l'amont d'une haie, par accumulation de colluvions érodées dans les champs. Ils peuvent constituer des parcellaires de très grande extension spatiale, caractérisés par des parcelles étroites, allongées perpendiculairement à la pente. L'histoire de ces parcellaires et leur datation sont encore très mal connues. Les résultats présentés ici concernent un parcellaire de plusieurs centaines d'hectares localisé à Goldbach-Altenbach, dans les Vosges haut-rhinoises. Les résultats obtenus sur deux coupes transversales à des rideaux de culture montrent que le parcellaire

a été mis en place vers 900 AD, puis que la zone a été brièvement abandonnée pendant la Guerre de Trente Ans. La datation vers 900 AD suggère que ce parcellaire a été mis en place sous l'autorité de l'abbaye de Murbach. L'ensemble de la zone a en effet été donné à cette abbaye vers 800 AD.

Lynchets correspond to talus slopes that are formed unintentionally at the top of hedgerows by the accumulation of colluvial deposits originating from eroded fields. They may represent highly extended parcellar surfaces, characterized by narrow plots, extending perpendicularly to the slope. The history of these plots and their dating are still largely unknown. Our results deal with a land patch of several hundreds of hectares located at Goldbach-Altenbach, in the Vosges (Haut-Rhin). It could be determined on two cross-sections cutting the lynchets transversally that the parcellar plot was formed ca. 900 AD, after which the place was briefly abandoned during the Thirty Years War. The dating at ca. 900 AD suggests that this parcellar area was installed under the authority of the Murbach Abbey. The whole sector was indeed donated to the Abbey ca. 800 AD.

MOTS-CLÉS

Archéologie agraire, pédoarchéologie, rideau de culture, massif Vosgien, pédoanthracologie, datation 14C.

KEYWORDS

Land archaeology, pedoarchaeology, lynchets, Vosges Massif, pedoanthracology, 14C dating.

Article accepté après évaluation par deux experts selon le principe du double anonymat

INTRODUCTION : LES RIDEAUX DE CULTURE, UNE FORME DE PAYSAGE CARACTÉRISTIQUE

Le terme de « rideau de culture » désigne des talus grossièrement perpendiculaires à la pente, souvent régulièrement espacés sur les versants de nombreuses régions de l'Europe médiane, telles que le nord de la France, la Normandie, la Belgique, l'Allemagne, la Tchéquie et bien d'autres. Dans les vallées vosgiennes (**fig. 1**), ils forment de vastes zones délimitant des parcelles qualifiées de *parcelles à haies en bandes isohypses* [1]. Actuellement, ils y sont indifféremment présents sous des prairies ou des forêts. On observe une continuité parfaite entre forêt et pré : ce sont donc des formes héritées sans liens avec l'occupation du sol actuelle.

Leur origine est discutée. Certains auteurs estiment qu'ils sont d'origine géologique, soulignant des failles ou des phénomènes de dissolution [2]. Pour d'autres, ils sont des terrasses agricoles [3]. Pour la plupart, ils sont la conséquence de l'érosion par le ruissellement [4], par le travail du sol [5], ou par les deux [6]. Ils se forment par accumulation de la terre érodée, les colluvions, à l'amont d'une haie. Dans la suite du texte, on désignera cette forme par le mot de « rideau ».

Il est parfois difficile de distinguer les rideaux des terrasses agricoles, lorsque celles-ci ne s'accompagnent pas de murets de pierres sèches. Ces deux formes agraires diffèrent toutefois considérablement par leur origine et leur structure interne (**fig. 2**). Les terrasses sont des constructions volontaires, réalisées pour réduire la pente afin de faciliter la culture et/ou diminuer l'érosion. Les rideaux sont la conséquence involontaire de l'accumulation de terre érodée. Ces différences de genèse se traduisent dans leur organisation stratigraphique. Dans les terrasses, les conséquences de l'excavation se matérialisent par une interruption sub-verticale des horizons pédologiques, de l'altérite, voire de la roche. Les déblais sont

[1] SCHWARTZ *ET AL.* 2019.

[2] LASNE 1890 ; GOSSELET 1906 ; EVRARD 1951 ; BRACK & DELAY 1997.

[3] FÉNELON 1956 ; 1963 ; VAN WESTREEMEN 2008 ; RAISTRICK & CHAPMAN 1929 ; WOOD 1961 ; YVARD 1977.

[4] BOLLINE 1971.

[5] AUFRÈRE 1929 ; DESBORDES & VALADAS 1979 ; NYSSSEN *ET AL.* 2010, PATRO *ET AL.* 2008, GOVERS *ET AL.* 1994 ; POESEN *ET AL.* 1994 ; DE ALBA *ET AL.* 2004 ; VAN OOST *ET AL.* 2005.

[6] NYSSSEN *ET AL.* 2000.

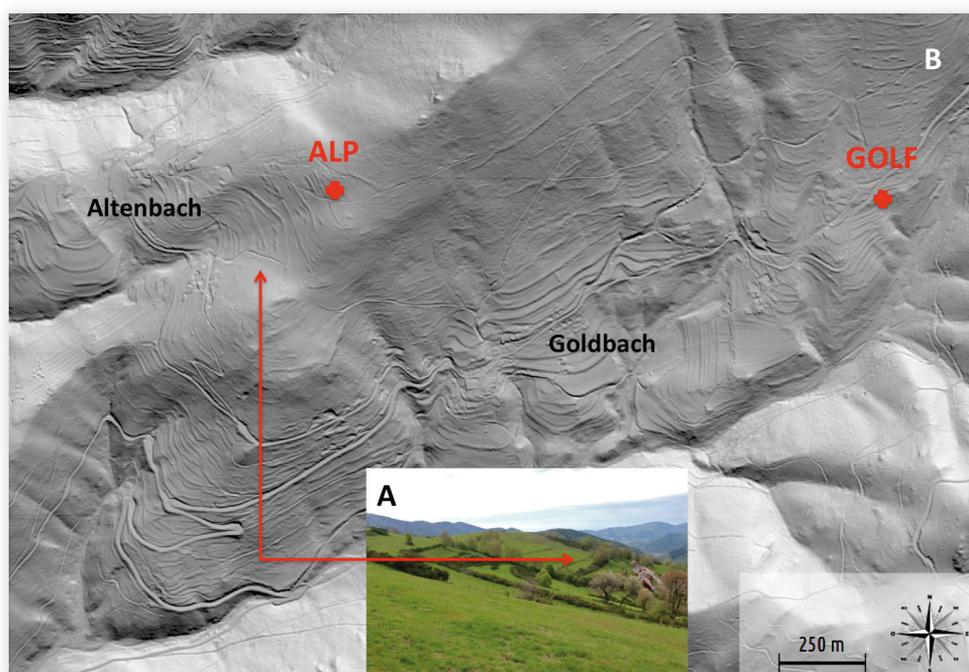


Figure 1

Les rideaux de culture de Goldbach-Altenbach.

A : exemple, vue au sol (photo D. Schwartz) ;

B : image LIDAR avec localisation des sites ALP et GOLF.

Source LIDAR : CD68, www.infogeo68.fr.

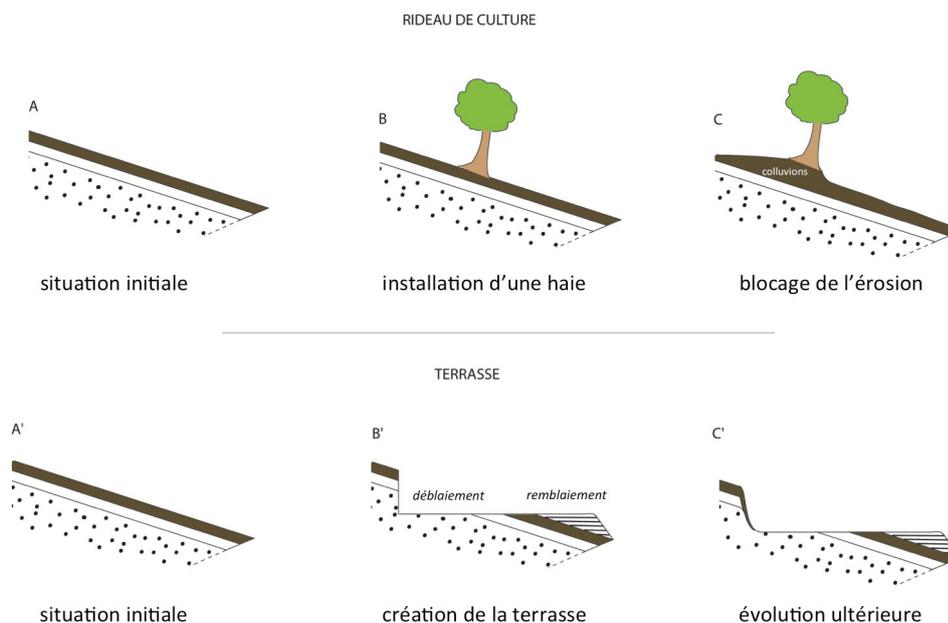


Figure 2
Modes de formation des rideaux de culture et terrasses (repris de Schwartz *et al.*, 2019).

mélangés et, parfois, le paléosol est conservé sous la terre accumulée en remblai dans la partie basse. Dans les rideaux, les horizons inférieurs du sol ne sont pas perturbés. Le talus est constitué d'un horizon A hypertrophié formé par les colluvions mobilisées dans les champs de l'amont. C'est donc sur une coupe qu'il sera possible de conclure de façon formelle sur l'appartenance d'un talus à un système agraire de terrasses ou de rideaux de culture. Notons que certains auteurs ont décrit des formes intermédiaires entre terrasses et accumulation involontaire, par affouillement de la base du rideau [7].

L'essentiel des travaux modernes sur les rideaux porte sur l'érosion [8] ou le stockage du carbone [9]. Si leur ancienneté est souvent reconnue [10], les aspects historiques et chronologiques sont peu abordés, et de façon imprécise. La coïncidence entre sites archéologiques et présence de rideaux a conduit certains auteurs à les considérer comme celtiques en Grande-Bretagne [11] ou au Danemark [12]. En appliquant des taux d'érosion calculés dans d'autres régions, Nyssen *et al.* [13] estiment que certains rideaux belges datent

de l'Antiquité et que d'autres sont médiévaux. Ces derniers notent la présence de charbons de bois, qu'ils interprètent comme résultant de l'émondage moderne, fréquent, des haies. Ils n'ont pas cherché à les utiliser comme marqueurs chronologiques ou paléoenvironnementaux. Schwartz *et al.* [14] observent des rideaux très nettement figurés sur de nombreuses enluminures et une sculpture en bas-relief du XV^e s. : ils sont donc nécessairement plus anciens.

Très peu de rideaux ont été datés. Deux âges sur charbon de bois de 1168 +/-83 cal AD [15] et 650 +/-95 AD [16] ont été donnés pour le début de leur formation en Limousin. A Habsheim, près de Mulhouse, Froehlicher *et al.* [17] ont daté par OSL d'environ 2700 et 1000 BP deux rideaux sur loess. Ces dates semblent être les seules données disponibles en France. Il est donc difficile d'utiliser les rideaux pour mieux comprendre les modes d'utilisation ancienne et le contexte socio-historique et économique passé des territoires. Dans le massif Vosgien, les rideaux n'ont fait l'objet d'aucune recherche, jusqu'aux travaux présentés ici.

[7] MEYNIER 1959 ; NYSSSEN *ET AL.* 2010.

[8] DESBORDES & VALLADAS 1979 ; NYSSSEN *ET AL.* 2000 ; 2010, 2014 ; PATRO *ET AL.* 2008 ; STOLZ 2011 ; ZADOROVA *ET AL.* 2018 ; DABNEY 2006 ; CHARTIN *ET AL.* 2011 ; DERCON *ET AL.* 2007 ; GOVERS *ET AL.* 1994 ; POESEN *ET AL.* 1994 ; DE ALBA *ET AL.* 2004 ; VAN OOST *ET AL.* 2005 ; FROEHLICHER 2016 ; FROEHLICHER *ET AL.* 2016.

[9] WALTER *ET AL.* 2003 ; ZADOROVA *ET AL.* 2018 ; FOLLAIN *ET AL.* 2007 ; FROEHLICHER 2016.

[10] AUFRÈRE 1929 ; FÉNELON 1956 ; PATRO *ET AL.* 2008 ; MOLDENHAUER *ET AL.* 2010 ; STOLZ 2011 ; NYSSSEN *ET AL.* 2014 ; ZADOROVA *ET AL.* 2018.

[11] FAVIS-MORTLOCK *ET AL.* 1997.

[12] NIELSEN *ET AL.* 2017.

[13] NYSSSEN *ET AL.* 2014.

[14] SCHWARTZ *ET AL.* 2018.

[15] DESBORDES & VALLADAS 1979.

[16] BERNARD-ALLÉE & VALLADAS 1992.

[17] FROEHLICHER *ET AL.* 2016.

LE SITE D'ÉTUDE

La zone d'étude est située à Goldbach-Altenbach, dans la vallée de la Thur, au S.E. des Vosges. D'après les historiens, les villages de Goldbach et Altenbach résultent de l'installation, par l'abbaye de Murbach, d'un prieuré en 1135 (Stoffel, 1868). Comme dans de nombreuses vallées vosgiennes, les rideaux sont très abondants. Ils occupent plusieurs centaines d'hectares sur des versants entiers (**fig. 1**). Ils forment des banquettes d'environ 1 m de haut pour une largeur de 10 à 20 m selon la valeur de la pente. Nous avons ouvert deux tranchées sur des terrains mis à notre disposition par la municipalité de Goldbach-Altenbach. Chaque tranchée fait 10 m de long et coupe perpendiculairement un rideau. La première tranchée (ALP : 47°52'41,70"N ; 7°05'53,04"E ; 847 m) est située sur un pâturage d'Altenbach. La deuxième (GOLF : 47°52'42,16" N ; 7°07'12,95"E ; 755 m) est située au N.E. de Goldbach, sous forêt (**fig. 1**). Dans les deux cas, la tranchée a été creusée jusque dans l'arène granitique.

Les sols sont des sols bruns acides et bruns ocreux, classés comme alocrisols dans le Référentiel Pédologique (INRA, 2008). Ils sont développés sur des arènes ou des formations de pente périglaciaires granitiques. Leur granulométrie est dominée par les sables grossiers. L'horizon A est riche en matière organique, conséquence du climat frais d'altitude, du pH très acide et, par suite, de la faible activité biologique.

L'histoire de la zone est relativement mal connue. La première citation connue de Goldbach, Altenbach et de Geishouse, village voisin, date de 1135. Ils résulteraient de l'installation à cette date d'un petit prieuré à Goldbach [18]. Depuis cette date, le secteur est occupé de façon continue, sauf sans doute vers 1632, pendant la guerre de Trente Ans. Jusque dans les années 1960, la surface agricole se partage entre champs et prairies. À partir de cette date, les zones cultivées ont régressé pour disparaître complètement au profit de prés de fauche, de pâturages et de zones où les landes et forêts ont reconquis l'espace.

UNE APPROCHE GÉOARCHÉOLOGIQUE MULTIDISCIPLINAIRE

Notre travail est fondé sur l'analyse des archives naturelles préservées dans les sols, complétée par l'étude de cartes et photographies anciennes.

Les approches utilisées sont celles, multidisciplinaires, de la géoarchéologie et de l'archéopédologie.

Les analyses ont été concentrées sur la partie la plus épaisse des rideaux, à savoir la rupture de pente du talus où les colluvions atteignent un mètre d'épaisseur. En effet, les sols sont des milieux constamment brassés tant par la faune du sol (lombrics, taupes, rongeurs...) que par les travaux agricoles (labours). Lorsqu'ils sont peu épais, ce qui est le cas à l'amont et à l'aval des rideaux, ces actions perturbent considérablement la lecture des enregistrements du passé, mêlés à la manière des palimpsestes. Là où le sol est le plus épais, soit la rupture de pente du rideau, ces perturbations sont minimales.

L'organisation des sols a été décrite sur les deux tranchées. Le pH, la granulométrie et la teneur en matière organique du sol (MOS) ont été mesurés en laboratoire (LAS, UMS 830). Des lames minces ont été analysées afin d'étudier l'organisation des rideaux à l'échelle microscopique. L'organisation du sol à cette échelle permet en effet de mettre en évidence de nombreux témoignages de l'évolution environnementale non perceptibles à l'œil ou par des analyses de laboratoire [19]. La matière organique des colluvions a fait l'objet d'une analyse en spectroscopie proche infrarouge qualitative, selon le protocole décrit par Ertlen *et al.* [20] pour en identifier la source végétale en termes d'écosystème. À cet effet, le signal IR transmis est comparé à celui de profils de référence, sous végétation témoin connue de type prairie/pâturage ou forêts dûment identifiés. Les charbons de bois présents ont été échantillonnés et identifiés. Six ont été datés au ¹⁴C AMS au laboratoire de Poznan (Pologne). La fraction lipidique du sol, soit environ 5 % de la MOS a été extraite et analysée par chromatographie gazeuse couplée à la spectrométrie de masse pour identification de molécules ou groupes de molécules ayant une signification paléoécologique. Ces méthodes sont détaillées dans un article en cours de rédaction [21].

Enfin, l'occupation du sol a été identifiée sur des documents couvrant une période de 260 ans : Plan de finage de l'Intendance d'Alsace (1760-1762), carte d'état-major à 1/50000 (1840), carte allemande à 1/25000 (1884), photos aériennes (1956, 1997, 2012). Ces documents sont disponibles sur le site du Conseil Départemental du Haut-Rhin (www.infogo68.fr).

[18] STOFFEL 1875.

[19] Voir par exemple : DEÁK *ET AL.* 2017.

[20] ERTLEN *ET AL.* 2010.

[21] SCHWARTZ *ET AL.* en préparation pour *The Holocene*.

DES RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES ET PROBANTS

La précision des données collectées est variable, mais, réunis, les résultats permettent de reconstituer l'histoire agraire du secteur et de dater avec une bonne précision les parcelles à rideaux de culture de Goldbach-Altenbach.

CARACTÉRISATION DES SOLS

Les tranchées montrent des sols développés sur une formation de pente périglaciaire très riche en éléments grossiers. Les horizons de sols profonds, altérite et horizon cambique S sont en continuité parfaite, preuve que les talus sont bien des rideaux créés par l'accumulation de colluvions à l'amont d'un obstacle, une haie selon toute vraisemblance (fig. 3). Le seul facteur de variation est l'épaisseur de l'horizon organominéral de surface d'origine colluviale, qui atteint un maximum de 80 à 90 cm à la rupture de pente.

MICROMORPHOLOGIE

À la base du sol, des revêtements argileux, limpides et parfois lités sont attribués à des illuviations typiques de la formation d'un horizon BT de luvisol holocène mis en place sous couvert forestier. La présence dans toute la séquence, de revêtements secondaires, de type « silteux poussiéreux », relate une mise à nu

de la surface du sol (labour, dessouchage ou chantier agricole [22]). L'observation micromorphologique met également en évidence des niveaux plus riches en phytolithes (dépôt intercellulaire résiduel d'opale biologique). Plus abondants dans les herbacées/graminées, les phytolithes suggèrent un milieu plutôt ouvert, de type prairial. Leur aspect émoussé et leur configuration isolée attestent d'un travail mécanique du sol [23].

SPECTROSCOPIE PROCHE INFRA-ROUGE QUALITATIVE (FIG. 4)

Dans les horizons de surface, le signal spectral est caractéristique de la végétation actuelle, forêt sur GOLF, prairie sur ALP ; en profondeur, où les matières organiques de sols ont en moyenne l'âge le plus élevé, le signal tend vers le pôle forestier sur les deux sites. Dans la tranche intermédiaire, le signal est très comparable sur les deux sites. Il est situé entre les pôles forestier et prairial, suite à un mélange de matières organiques hétérochrones. Ce type de diagramme est typique de milieux ayant connu un changement de végétation : à une végétation ancienne et forestière a succédé une végétation plus récente, ouverte et graminéenne (prairie ou culture de céréale).

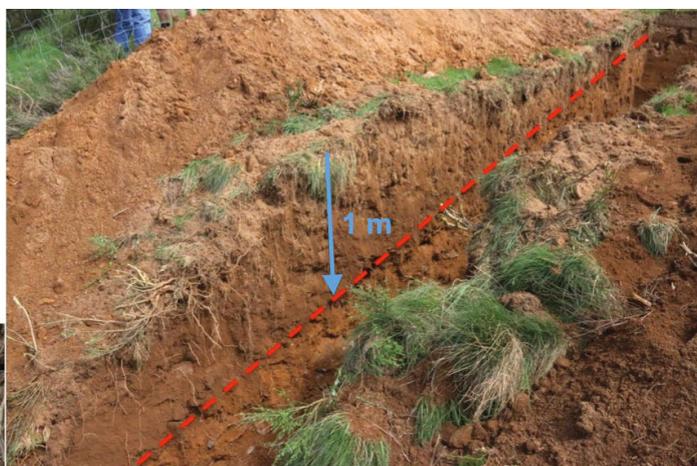
[22] DEÁK ET AL. 2017.

[23] VRYDAGHS ET AL. 2017.

Figure 3

Vue des tranchées ALP et GOLF. La limite des colluvions est soulignée par un tireté rouge. Photo : Y. Manniez.

ALP



--- Limite des colluvions

GOLF



Creusement des tranchées



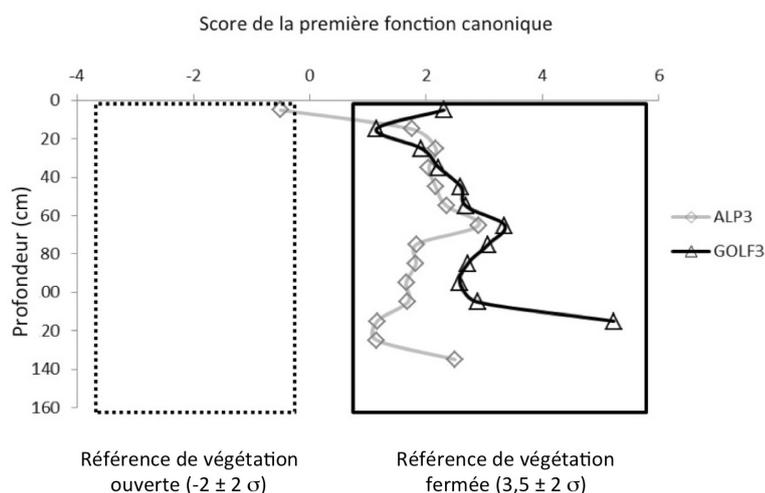


Figure 4
Spectroscopie proche infrarouge : score de la première fonction canonique des profils ALP3 et GOLF3.

BIOMARQUEURS MOLÉCULAIRES

L'extraction des biomarqueurs lipidiques n'a pas donné de résultats probants. Toutefois, des molécules spécifiques de graminées ont été identifiées, suggérant une influence prairiale ou de cultures de céréales.

PÉDOANTHROLOGIE

Les charbons de bois sont abondants mais dispersés, ce qui est classique en milieu bioturbé [24]. Huit taxons ont été identifiés. Les deux espèces dominantes des forêts matures, hêtre (*Fagus silvatica*) et sapin (*Abies alba*), sont abondantes. Elles sont associées à des espèces pionnières ou héliophiles : un érable (*Acer* sp.), sans doute le sycomore, le genévrier *Juniperus communis*, le noisetier *Corylus avellana*, un bouleau (*Betula* sp.), un saule (*Salix* sp.),... Cet assemblage suggère que les charbons correspondent à deux phases différentes de défrichement.

DATATIONS ¹⁴C

Les six datations ¹⁴C sur charbons correspondent à 2 époques différentes (fig. 5).

- Trois dates sur sapin et hêtre s'échelonnent (en prenant les écarts-types) entre 760 et 1150 AD. Deux dates se superposent pratiquement, la troisième est

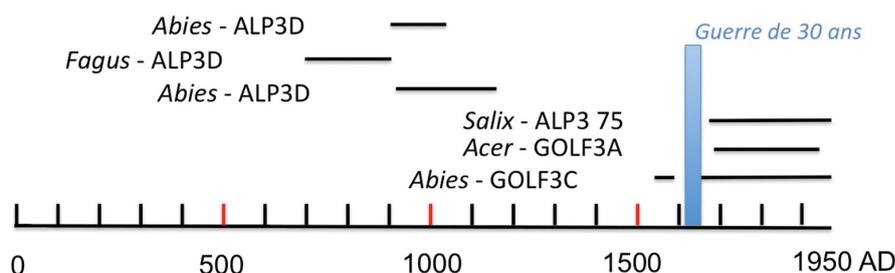
légèrement plus ancienne. Même si on ne peut écarter l'hypothèse de deux feux rapprochés, il est probable qu'elles correspondent à un seul événement, situé vers 900 AD compte-tenu que les trois âges ¹⁴C ont une plage chronologique commune à cette date.

- La seconde phase de défrichement est principalement caractérisée par des charbons d'essences héliophiles. Sur la période considérée, le ¹⁴C est peu efficient : l'épisode de feu est compris entre 1630 AD et 1950 AD, sans précision.

ANALYSE SPATIALE

Globalement, sur le secteur, l'analyse des cartes et photographies montre qu'aucun défrichement n'a eu lieu entre 1760 et nos jours. À l'inverse, une reconquête forestière est perceptible depuis le XIX^e s. dans de nombreux endroits. La large extension des terres labourées sur Goldbach est signalée sur les plans de finage de 1760. Elle est également enregistrée dans une photographie d'Adolphe Braun, datée d'entre 1853 et 1877. D'après les photos aériennes, les champs ont

[24] CARCAILLET & TALON 1996 ; SCHWARTZ ET AL. 2005



Âges calibrés ; représentation de l'intervalle d'âge à 95 % de probabilités
Abies = sapin ; Fagus = hêtre ; Salix = saule ; Acer = érable

Figure 5
Datations ¹⁴C : intervalles de variation des âges à la probabilité de 95 %.

représenté une partie notable de la surface agricole utile de Goldbach et Altenbach jusque vers 1960-1970, pour ne disparaître totalement que vers 2007. Les secteurs qui nous intéressent plus précisément, ALP et GOLF, sont indiqués en terres cultivables sur les plans terriers de 1760 et sur la carte d'État-Major de 1840. Sur GOLF, la forêt apparaît entre 1840 et 1880. Sur ALP, les terres labourables sont converties en prés entre 1880 et 1956.

RECONSTRUCTION DE LA DYNAMIQUE PAYSAGÈRE DE GOLDBACH-ALTENBACH

L'ensemble de ces éléments permet de reconstruire l'évolution de l'occupation des sols et des paysages de Goldbach-Altenbach depuis le Haut Moyen Âge.

Le premier élément est donné par les caractéristiques spectrales de la base des colluvions, qui marquent le début de l'érosion agraire. Elles présentent indubitablement une signature forestière en spectroscopie proche-infrarouge et en micromorphologie. Le point de départ est un paysage forestier, défriché pour être cultivé. L'âge du défrichement est donné par la première série de dates ^{14}C : aux alentours de 900 AD. Un point demeure en suspens : s'agissait-il d'un événement unique ou d'une succession de phases espacées de quelques dizaines d'années ? Les intervalles de confiance ^{14}C ne permettent pas de trancher. Cependant, la cohérence d'ensemble du parcellaire et l'existence d'une zone d'intersection des intervalles de confiance, plaident pour un événement unique, sans doute étalé sur quelques années. Quoiqu'il en soit, c'est clairement au tournant de l'an 900 qu'a eu lieu ce défrichement. À cette époque, la Haute-Vallée de la Thur appartenait à l'abbaye de Murbach, la plus puissante abbaye d'Alsace, à qui elle avait été léguée vers l'an 800 [25]. Le défrichement se serait ainsi effectué sous son autorité. L'organisation parfaitement cohérente des rideaux plaide pour un défrichement en un temps court et la création de parcelles en bandes isohypses, sans doute délimitées par des haies. L'extension du parcellaire, plus d'un millier d'hectares sur le territoire de Goldbach, Altenbach et Geishouse, suggère une force de travail d'au moins une centaine de personnes si l'on retient une taille de 10 ha environ pour l'unité d'exploitation de base – chiffre nécessairement vague, mais réaliste [26]. Cela correspondrait au bas mot à la présence de 450 personnes sur le secteur, si on retient la valeur (basse) de 4,5 comme taille de l'unité de base familiale moyenne. La création de ces villages pourrait ainsi être bien plus ancienne que 1135, date de l'établissement à Goldbach d'un prieuré [27]. Celui-ci serait ainsi une conséquence de

la présence de communautés paysannes, et non pas à leur origine, ce qui change le regard que l'on peut porter sur la fondation de ces villages.

Par ailleurs, le spectre proche-infrarouge, les phytolithes et les biomarqueurs moléculaires révèlent, de façon indépendante, la présence de végétations dominées par les graminées. Il n'est pas possible d'être plus précis en l'absence de marqueurs spécifiques, comme par exemple la milliagine, caractéristique du millet *Panicum miliaceum* et repérée dans des sols de la plaine alsacienne [28]. On ne peut donc déterminer s'il s'agit d'une végétation prairiale ou de céréaliculture. Plusieurs arguments plaident toutefois pour la seconde hypothèse. Des rideaux d'une telle importance et régularité ne se forment pas sous prairie, couvert peu propice à l'érosion dans les conditions bioclimatiques vosgiennes : la végétation est dense et le ruissellement très faible. De plus, la forme des parcelles, très allongées et étroites, analogues par leurs dimensions à celles des openfields en lames de parquet qui caractérisent l'Europe centrale [29] n'est pas propice à l'élevage en général et à la conduite des troupeaux en particulier. Il est probable que ces signatures soient donc celles de cultures céréalières, sans doute du seigle, de l'avoine ou de l'orge au vu de l'altitude.

L'occupation du sol par des cultures s'est poursuivie jusque dans les années 1960. Les photos aériennes montrent une forte proportion de champs en 1956, alors qu'en 2007, les cultures sont complètement remplacées par des accrus forestiers, des prés de fauche et des pâturages. La domination des champs s'est toutefois brièvement interrompue post 1650 AD. En effet, l'analyse pédoanthracologique et les datations ^{14}C mettent en évidence un épisode d'incendie postérieurement à cette date. Les âges ^{14}C sont peu précis sur cette période, donnant simplement l'intervalle 1650-Actuel. On peut toutefois l'être davantage. En effet, les cartes et photos montrent qu'aucun défrichement n'a eu lieu dans le secteur entre 1760 et nos jours : il s'inscrit nécessairement entre 1650 et 1760. Les charbons de cet épisode sont des charbons d'essences héliophiles ou pionnières (noisetier, genévrier, érable,...). Il est hautement probable qu'ils marquent un bref retour forestier consécutif à l'abandon de la

[25] GUTH 1994.

[26] Voir par exemple la discussion sur les manses et tenures, in FOURQUIN 1975.

[27] STOFFEL 1875.

[28] COUREL ET AL. 2017

[29] LEBEAU 1969

zone par ses habitants pendant la Guerre de Trente Ans. Cette guerre a été particulièrement meurtrière en Alsace entre 1632 et 1634, avec une chute de la population de plus de 70 % en moyenne. Dans la Vallée de la Thur, il ne restait plus que 750 habitants vers 1634-1650 [30]. Thann, ville qui commande l'entrée de la vallée est passée de 3000 habitants en 1618 à 300 en 1634 [31]. Saint-Amarin ne comptait plus que 13 bourgeois et 44 enfants en 1650 [32]. Cette impressionnante déprise démographique correspond à un développement forestier sur les espaces agricoles abandonnés, interrompu par le retour de la population entre 1650 et 1750. Le faciès de forêt pionnière, révélé par les charbons est cohérent avec l'hypothèse d'un enrichissement spontané post 1634, puis d'un défrichement par de nouvelles populations, originaires de Suisse ou d'Europe Centrale, et attirées par des incitations financières proposées par diverses autorités pour repeupler la région vers 1700 ± 50.

UNE MISE EN VALEUR DES TERRES PAR LES ABBAYES MÉDIÉVALES ?

L'âge des rideaux interroge sur le fait que ces parcelles soient ou non édifiées par des communautés religieuses. Deux points doivent être discutés en préalable.

Le premier concerne l'homogénéité des âges ^{14}C , clairement répartis sur 2 périodes très courtes. Ceci pourrait être dû au faible nombre d'échantillons datés. Mais nous avons maximisé la dispersion des âges en datant 5 espèces différentes. Par comparaison, un échantillon

équivalent (7 charbons) du Rossberg, à 7 km de distance, a donné des âges entre 7000 et 1300 BP [33]. La grande dispersion des âges des charbons des chaumes vosgiennes a été confirmée sur un grand nombre de sites, soit 40 dates [34]. L'homogénéité relevée ici n'en est que plus remarquable. Faut-il en conclure que notre site n'a jamais été défriché par le feu avant 900 AD ? Il est difficile de conclure sur une seule étude. Mais la question de l'utilisation de ces espaces, coincés entre des Hautes-Chaumes très défrichées dès l'âge du Bronze [35] et des fonds de vallées occupés, au moins temporairement, depuis la Préhistoire, reste posée.

Le deuxième point est paysager : à quoi ressemblaient les parcelles à l'époque où les rideaux étaient fonctionnels ? Peu d'équivalents actuels permettent d'en juger. Nous avons proposé une reconstitution des parcelles, fondée sur le fait que chaque rideau correspondait à l'emplacement d'une haie [36]. Les équivalents les plus proches sont des parcelles bien conservés, parfois encore fonctionnels, que l'on peut observer en Tchéquie (fig. 6). Beaucoup sont encore cultivés en céréales. Ces ensembles donnent sans doute une bonne image de l'aspect des vallées

- [30] ROSENBLATT 1994
- [31] DROUOT 1961.
- [32] FRITZ 1985.
- [33] SCHWARTZ ET AL. 2005.
- [34] GOEPP 2006.
- [35] GOEPP 2006.
- [36] SCHWARTZ ET AL. 2019.

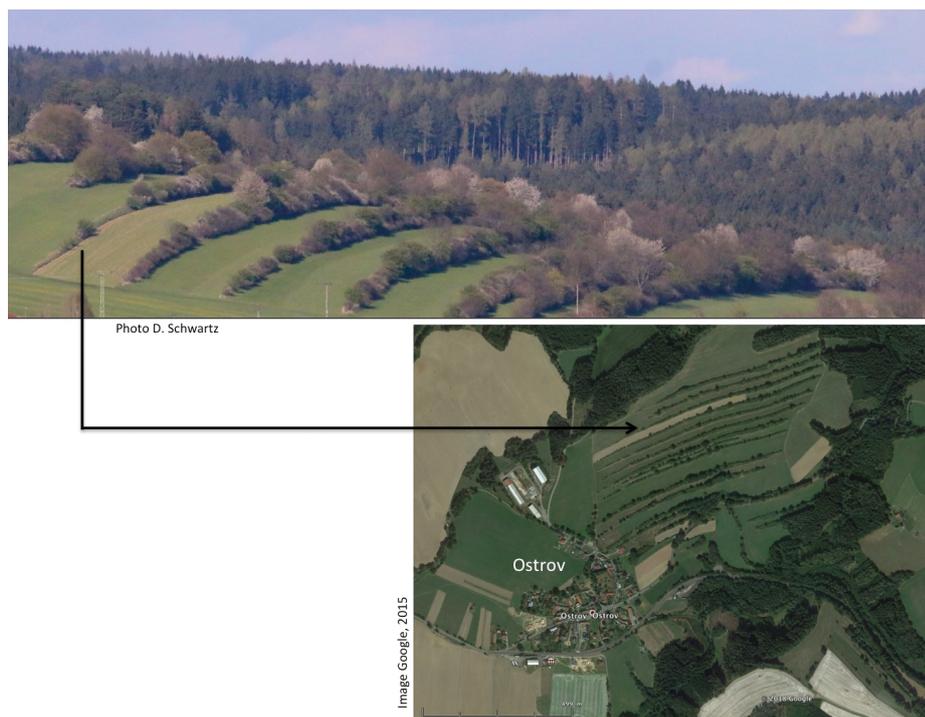


Figure 6
Exemple de parcelle à haies en bandes isohypses en Tchéquie (Ostrov, près de Ledec nad Sázavou).

vosgiennes à l'époque de l'apogée des parcellaires à rideaux. Ceci peut surprendre, car de tels paysages sont actuellement quasi inconnus dans les Vosges. À l'aune de l'extension spatiale des rideaux de culture dans les vallées vosgiennes, ils devaient être courants au Moyen Âge médian.

Ceci posé, le point central dans notre discussion est celui la fourchette chronologique de l'établissement de ce type de parcellaire. Il serait prétentieux de dater du Haut Moyen Âge l'ensemble des parcellaires à rideaux sur la base de cette seule étude. Néanmoins, force est de constater que l'âge de 900 AD, retenu ici, est du même ordre de grandeur que ceux obtenus pour un rideau de Habsheim, soit environ 900-1000 AD [37]. Il se place également pratiquement au milieu des deux dates données pour le Limousin, à savoir 1168 ± 83 cal AD [38] et 650 ± 95 AD [39]. Ainsi, la période entre les VII^e et XII^e s. semble être celle qui a vu l'émergence de ce type de parcellaire. À cette époque, le pouvoir le plus affirmé aux échelles locales et régionales est celui des grandes abbayes, et non celui des seigneurs féodaux. Ainsi, l'ensemble de la Haute-Vallée de la Thur appartenait à l'abbaye de Murbach, l'une des plus puissantes du Saint Empire Romain Germanique, dès la fin du VIII^e s.

Il est donc légitime d'envisager que ces abbayes ont été à l'origine de la mise en valeur des territoires occupés par les parcellaires matérialisés par des rideaux de culture. Nous avons cherché, dans un premier temps, à vérifier s'il y avait une relation entre l'occurrence de

zones densément occupées par des rideaux et la localisation des abbayes altimédiévales. Une carte a ainsi été réalisée dans le cadre d'un mémoire de master [40] sur l'ensemble du Haut-Rhin. Elle montre que les zones denses de rideaux de culture sont situées dans la partie amont des vallées, au cœur de territoires où sont implantées de grandes abbayes : Masevaux, Saint-Amarin (émanation de Murbach), Murbach, Munster, Lièpvre et Pairis (fig. 7a). À l'inverse, les châteaux, quasiment tous datés du XII^e au XV^e s., sont répartis aux entrées des vallées et sur les collines sous-vosgiennes (fig. 7b). À l'exception de Pairis, ces abbayes ont toutes été fondées aux VII^e et VIII^e s. Pour sa part, l'histoire de Pairis et des territoires environnants est peu connue avant le XIII^e s. La majorité de ces territoires appartenait à des abbayes vosgiennes, comme Saint-Dié, également fondées aux VII^e-VIII^e s., mais il n'est pas impossible que sur le site même de Pairis, une abbaye plus ancienne ait existé [41]. On notera également que Murbach constitue une exception : peu de rideaux sont détectés aux alentours immédiats de l'abbaye. Mais celle-ci ayant reçu en donation la Haute-Vallée

[37] FROELICHER 2006.

[38] DESBORDES & VALLADAS 1979.

[39] BERNARD-ALLÉE & VALLADAS 1992.

[40] DAPIAGGI 2017.

[41] Georges Bischoff, communication orale.

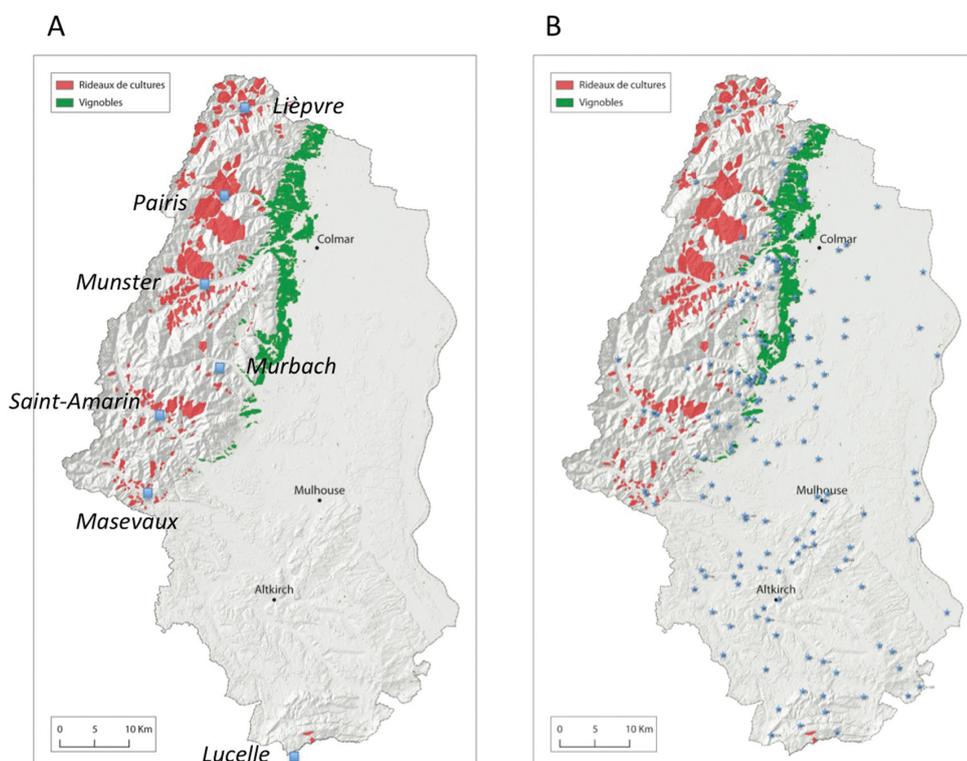


Figure 7

Extension des rideaux de culture dans les Vosges haut-rhinoises (en rouge), en comparaison de l'implantation de quelques grandes abbayes (A) et des châteaux antérieurs au XVI^e s. (B). En vert, le vignoble, dans lequel il est impossible de cartographier d'éventuels rideaux en raison de la présence des terrasses viticoles. Repris de D. Dapiaggi (2017), complété par D. Schwartz pour la cartographie des châteaux.

de la Thur, il est possible qu'elle l'ait privilégiée pour la production agricole, réservant la vallée de Guebwiller à d'autres usages. Quoi qu'il en soit, l'apparente coïncidence entre localisation des abbayes et répartition des parcelles à rideaux ouvre des perspectives intéressantes sur le plan historique.

CONCLUSION

À l'heure actuelle, il est encore difficile de proposer un schéma général de l'origine et de l'évolution des parcelles à rideaux de culture : ce type de paysage agricole commence à peine à sortir de l'oubli. Toutefois, les résultats obtenus à Goldbach-Altenbach sont prometteurs. Ils ont permis, dans un premier temps de

caractériser un parcellaire de grande ampleur, plusieurs centaines d'hectares, indubitablement mis en place par l'abbaye de Murbach vers 900 AD. La coïncidence entre la localisation des grandes abbayes médiévales et celle des parcelles à rideaux est également une piste prometteuse. Cette convergence n'a été mise en évidence pour l'heure que dans le Haut-Rhin. Nous tenterons à l'avenir d'étendre nos résultats à l'ensemble du massif Vosgien, en nous appuyant également sur les rares sources écrites susceptibles d'apporter une pierre à l'édifice. Des collaborations seront également établies avec des chercheurs tchèques, ce pays présentant de grandes similitudes paysagères avec les Vosges avec l'avantage que les paysages à rideaux y sont mieux préservés et pour certains d'entre eux encore fonctionnels. ■

REMERCIEMENTS

Les résultats présentés ont été obtenus dans le cadre du programme Install'haies, financé par le département INEE du CNRS (PEPS Paysages, 2016-2017). Nos remerciements s'adressent à la municipalité de Goldbach-Altenbach qui a mis à notre disposition des terrains communaux : Madame Bembeneck, maire de la commune, Monsieur Franck, premier adjoint et Madame Reilly, secrétaire de mairie.

BIBLIOGRAPHIE

- AUFRÈRE, L., 1929**, « Les rideaux, étude topographique », *Annales de Géographie* 38°, 15/11/29, p. 529-560.
- BAIZE, D., & GIRARD, M.-C., 2009**, *Référentiel pédologique 2008*, Versailles, 405 p.
- BERNARD-ALLÉE, P. & VALADAS, B., 1992**, « L'état des recherches sur l'archéologie agricole en Limousin », *Norois* 156, p. 509-518.
- BOLLINE, A., 1971**, « Les rideaux en Hesbaye gemboutoise. Étude morphologique et sédimentologique », *Bulletin de la Société de Géographie de Liège* 7, p. 61-67.
- BRACK, P. & DELAY, F., 1997**, « Transmissivity and morphological features in a chalk aquifer: a geostatistical approach of their relationship », *Journal of Hydrology* 191, p. 139-160.
- CARCAILLET, C. & TALON, B., 1996**, « Aspects taphonomiques de la stratigraphie et de la datation de charbons de bois dans les sols : exemple de quelques sols des Alpes », *Géographie physique et Quaternaire* 50/2, p. 233-244.
- CHARTIN, C., BOURENNANE, H., SALVADOR-BLANES, S., HINSCHBERGER, F. & MACAIRE, J.-J., 2011**, « Classification and mapping of anthropogenic landforms on cultivated hillslopes using DEMs and soil thickness data – example from the SW Parisian Basin, France », *Geomorphology* 135, p. 8-20.

- COUREL, B., SCHAEFFER, P., ADAM, P., MOTSCH, E., EBERT, Q., MOSER, E., FELIU, C., BERNASCONI, S.M., HAJDAS, I., ERTLEN, D. & SCHWARTZ, D., 2017**, « Molecular, isotopic and radiocarbon evidence from broomcorn millet cropping in Northeast France since the Bronze Age », *Organic Geochemistry* 110, p. 13-24.
- DABNEY, S., 2006**, « Terrace relationships », dans R. Lal (éd.), *Encyclopedia of soil science*, Boca Raton, p. 1752-1755.
- DAPIAGGI, D., 2017**, *Les ordres religieux à l'origine de la planification agraire ? Étude des relations spatiales entre l'implantation des monastères et la répartition des rideaux de culture dans le Haut-Rhin*. Mémoire Master 1, Faculté de Géographie et d'Aménagement, Strasbourg.
- DEAK, J., GEBHARDT, A., LEWIS, H., LEE, H. & USAI, M.-R., 2017**, « Micromorphology of soils disturbed by vegetation clearance and tillage », dans C. Nicosia & G. Stoops (éd.) *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology*, p. 233-264.
- DE ALBA, S., LINDSTROM, M., SCHUMACHER, T.E. & MALO, D.D., 2004**, « Soil landscape evolution due to soil redistribution by tillage: a next conceptual model of soil catena evolution in agricultural landscapes », *Catena* 58, p. 77-100.
- DERCON, G., GOVERS, G., POESEN, J., SANCHEZ, H., ROMBAUT, K., VANDENBROECK, E., LOAIZA, G. & DECKERS, J., 2007**, « Animal-powered tillage erosion assessment in the southern Andes region of Ecuador », *Geomorphology* 87, p. 4-15.
- DESBORDES, J.-M. & VALADAS, B., 1979**, « L'érosion agricole en milieu cristallin : processus, conséquences et dimension historique du phénomène à partir d'exemples pris dans le massif d'Ambazac – Limousin (France) », dans H. Vogt & T. Vogt (éd.) *Actes du colloque Érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen*, Strasbourg, 1978, p. 19-25.
- DROUOT, M., 1961**, *Thann à l'époque mazarine. Histoire politique et administrative*, Strasbourg (Institut des Hautes Études Alsaciennes, 19).
- ERTLEN, D., SCHWARTZ, D., TRAUTMANN, M., WEBSTER, R. & BRUNET, D., 2010**, « Discriminating between organic matter in soil from grass and forest by near-infrared spectroscopy », *European Journal of Soil Science* 61, p. 207-216.
- EVARD, E., 1951**, « Recherche sur l'évolution karstique du pays de Herve », *Bulletin de la Société Géologique de Belgique* 74, p. 71-104.
- FAO, ISRIC, ISSS, 2006, *World reference base for soil resources 2006*. A framework for international classification, correlation and communication, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Roma.
- FAVIS-MORTLOCK, D., BOARDMANN, J. & BELL, M., 1997**, « Modelling long-term anthropogenic erosion of a loess cover: South Downs, UK », *Holocene* 7, p. 79-89.
- FÉNELON, P., 1956**, « Les rideaux de la Picardie et de la péninsule Ibérique », *Bulletin de l'Association des Géographes Français* 255-256, p. 2-9.
- FÉNELON, P., 1963**, « Controverse sur les rideaux », *Bulletin de l'Association des Géographes Français* 316-317, p. 24-28.
- FOLLAIN, S., WALTER, C., LEGOUT, A., LEMERCIER, B. & DUTIN, G., 2007**, « Induced effect of hedgerow networks on soil organic carbon storage within an agricultural landscape », *Geoderma* 142, p. 80-95.
- FOURQUIN, G., 1975**, « Le premier Moyen Âge », dans G. Duby (éd.), *Histoire de la France rurale*, t. 1, p. 287-371.
- FRITZ, C., 1985**, « Saint-Amarin. 3. Histoire », dans *Encyclopédie de l'Alsace*, t. 11, p. 6570.
- FROELICHER, L., 2016**, *Les haies, une alternative à l'openfield dans les zones loessiques d'Alsace ? Perspectives historiques, systèmes agraires du futur, érosion, effets sur le colluvionnement et le stockage du carbone*, Thèse Université de Strasbourg.
- FROELICHER, L., SCHWARTZ, D., ERTLEN, D. & TRAUTMANN, M., 2016**, « Hedges, colluvium, and lynchets along a reference toposequence (Habsheim, Alsace, France): the history of erosion in a loess area », *Quaternaire* 27/2, p. 171-183.
- GOEPP, S., 2007**, *Origine, histoire et dynamique des Hautes-Chaumes du massif vosgien. Déterminismes environnementaux et actions de l'homme*. Thèse Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- GOSSELET, M.-J., 1906**, « Observations sur les creuses de l'Artois et de la Picardie et réflexions sur l'importance de la dissolution souterraine de la craie », *Annales de la Société Géologique du Nord* 35, p. 237.
- GOVERS, G., VANDAELE, K., DESMET, P., POESEN, J. & BUNTE, K., 1994**, « The role of tillage in soil redistribution on hillslopes », *European Journal of Soil Science* 45, p. 469-478.
- GUTH, C., 1994**, « Des Francs aux Carolingiens », dans *Le Val Saint-Amarin*, OT/SI Haute-Thur Markstein, p. 32-34.
- LASNE, M.H., 1890**, « Sur les terrains phosphatés des environs de Doullens. Etage Sénonien et terrains superposés », *Bulletin de la Société Géologique de France* 18, p. 441-490.
- LEBEAU, R., 1969**, *Les grands types de structures agraires dans le monde*, Paris.
- MEYNIER, A., 1959**, *Les paysages agraires*, Paris.
- MOLDENHAUER, K.M., HEINRICH, J. & VATER, A., 2010**, « Causes and history of multiple soil erosion processes in the northern Odenwald uplands », *Erde* 14, p. 171-186.
- NIELSEN, N.H. & DALSGAARD, K., 2017**, « Dynamics of celtic fields – a geoarcheological investigation of Oster Lem Hede, western Jutland, Denmark », *Geoarcheology* 32, p. 414-434.
- NISHIMOTO, K., ITO, M. & NATORI, S., 1968**, « The structures of arundoin, cylindrin and fernenol », *Tetrahedron* 24, p. 735-752.
- NYSSSEN, J., POESEN, J., MITIKU, H., MOYERSONS, J., & DECKERS, J., 2000**, « Tillage erosion on slopes with soil conservation structures in the Ethiopian highlands », *Soil and Tillage Research* 57/3, p. 115-127.
- NYSSSEN, J., POESEN, J., MOYERSONS, J., DECKERS, J. & MITIKU, H., 2010**, « Genèse de rideaux suite à la culture attelée : observations en Éthiopie pour mieux comprendre les paysages ruraux européens », *Bulletin de la Société Géographique de Liège* 54, p. 117-122.
- NYSSSEN, J., DEBEVER, M., POESEN, J. & DECKERS, J., 2014**, « Lynchets in eastern Belgium – a geomorphic feature resulting from non-mechanised crop farming », *Catena* 121, p. 164-175.
- PATRO, M., WEGOREK, T. & ZUBALA, T., 2008**, « Ploughed on terraces in loess landscape of strongly developed high plains », *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Land Reclamation* 39, p. 95-101.
- POESEN, J., TOM, D. & BUNTE, K., 1994**, « Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review », *Catena* 23/1-2, p. 141-166.

- POESEN, J., VAN WESEMAEL, B., GOVERS, G., MARTINEZ-FERNANDEZ, J., DESMET, P., VANDAELE, K., QUINE, T. & DEGRAER, G., 1997**, « Patterns of rock fragment cover generated by tillage erosion », *Geomorphology* 18/3-4, p. 183-197.
- RAISTRICK, A. & CHAPMAN, S.E., 1929**, « The lynchet groups of upper Wharfedale », *Antiquity* 3, p. 165-181.
- ROSENBLATT, F., 1994**, « Les aléas de la guerre de Trente Ans », *Le Val Saint-Amarin*. OT/SI Haute-Thur Markstein, p. 47-49.
- SCHWARTZ, D., THINON, M., GOEPP, S., SCHMITT, C., CASNER, J., ROSIQUE, T., WUSCHER, P., ALEXANDRE, A., DAMBRINE, E., MARTIN, C. & GUILLET, B., 2005**, « Premières datations directes de défrichements protohistoriques sur les chaumes secondaires des Vosges (Rossberg, Haut-Rhin). Approche pédoanthracologique », *Comptes Rendus Géosciences* 337, p. 1250-1256.
- SCHWARTZ, D., FROEHLICHER, L. & VORBURGER, F., 2019**, « Rideaux de culture et paysages de haies dans les vallées alsaciennes à la fin des époques médiévales : de la reconstitution des espaces au questionnement chronologique par l'icônographie », dans P. Valette et J.-M. Carozza (éd.), *Géohistoire de l'environnement*, Paris, p. 57-73.
- SCHWARTZ, D., ROBIN, V., ADAM, P., SCHAEFFER, P., GEBHARDT, A., DAPIAGGI, D., STEVENEL, C., THISS, M., TRAUTMANN, M. & ERTLEN, D., en préparation**, « Dating the lynchet landscapes: from the case study (Goldbach, Haut-Rhin, France) to a general methodological frame », *The Holocene*.
- STOFFEL, G., 1868**, *Dictionnaire topographique du département du Haut-Rhin, comprenant les noms des lieux anciens et modernes*, rédigé sous les auspices de la Société Industrielle de Mulhouse, Paris.
- STOLZ, C., 2011**, « Spatiotemporal budgeting of soil erosion in the abandoned fields area of the "Rahnstätter Hof" near Michelbach (Taunus Mts, Western Germany) », *Erdkunde* 65, p. 355-370.
- VAN OOST, K., VAN MUYSEN, W., GOVERS, G., DECKERS, J. & QUINE, T.A., 2005**, « From water to tillage erosion dominated landform evolution », *Geomorphology* 72, p. 193-203.
- VAN WESTREENEN, F., 2008**, « Graften et graven in het Heuvelland », *Natuurhistorisch Maandblad* 97/9, p. 183-189.
- VRYDAGHS, L., DEVOS, Y. & PETO, A., 2017**, « Opal Phytoliths », dans C. Nicosia et G. Stoops (éd.) *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology*, p. 155-163.
- WALTER, C., MÉROT, P., LAYER, B. & DUTIN, G., 2003**, « The effect of hedgerows on soil organic storage in hillslopes », *Soil Use and Management* 19, p. 201-207.
- WOOD, P.D., 1961**, « Strip lynchets reconsidered », *The Geographical Journal* 127/4, p. 449-459.
- YVARD, J.C., 1977**, « La genèse des "rideaux" », *Picardie Information* 26, p. 55-57.
- ZADOROVA, T., PENIZEK, V., ŽIZALA, D., MATEJOVSKÝ, J. & VANEK, A., 2018**, « Influence of former lynchets on soil cover structure and soil organic storage in agricultural land, Central Czechia », *Soil Use and Management* 34, p. 60-71.

ÉTUDIER L'OCCUPATION D'UNE VILLE : LES ENJEUX DU PCR « TOPOGRAPHIE GÉNÉRALE ET INSERTION TERRITORIALE DE L'AGGLOMÉRATION ANTIQUE DE BRIGA »

Étienne MANTEL^{1,2}, Stéphane DUBOIS^{1,3}, Jonas PARÉTIAS^{4,*}, Victor VIQUESNEL-
SCHLOSSER⁵, Corentin VOISIN⁴, Bruno GAVAZZI⁶, Matthieu RICHARD⁷

¹ UMR 7041 ArScAn

² Service Régional de l'Archéologie de Normandie

³ INRAP Grand-Est-Sud

⁴ UMR 7044 Archimède ; Université de Strasbourg

⁵ UMR 5608 TRACES ; Université de Toulouse II - Jean Jaurès

⁶ Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) ; UMR 7516 ; Université de Strasbourg/EOST, CNRS

⁷ Technicien de fouilles contractuel

* Contact : j.paretias@yahoo.com

RÉSUMÉ

Les fouilles conduites depuis 2006 sur le site du « Bois-l'Abbé », situé sur la commune d'Eu (Seine-Maritime), ont permis de mettre en évidence que ces vestiges ne s'apparentaient pas à un sanctuaire isolé, comme l'évoquaient les précédents chercheurs, mais à une agglomération nommée *Briga*, dont la superficie atteignait au moins 65 hectares à son apogée au début du III^e siècle. À la suite de ces découvertes, le Programme Collectif de Recherche « Topographie générale et insertion territoriale de l'agglomération antique de *Briga* », coordonné par Étienne Mantel (DRAC [1] – SRA [2] de Normandie), a été initié en 2018. Interdisciplinaire par nature, ce programme a pour objectif de fédérer des intervenants venant de différentes institutions (DRAC, Universités, INRAP et bénévoles) afin d'accroître les connaissances sur l'urbanisme, les origines, le développement et le déclin de cette agglomération encore inconnue jusqu'en 2006.

MOTS-CLÉS

Gaule Belgique, agglomération romaine, *Briga*, géophysique.

The archaeological excavations carried out since 2006 on the site of "Bois-l'Abbé", located in the town of Eu (Seine-Maritime), have made it possible to show that the remains do not belong to an isolated sanctuary, as mentioned by previous researchers, but to an antique urban area called *Briga*, of which the extent at its peak in the early third century reached at least 65 ha. Following these discoveries, the collective research program (PCR) "Topographie générale et insertion territoriale de l'agglomération antique que *Briga*", coordinated by Etienne Mantel (DRAC [1] – SRA [2] de Normandie) was initiated in 2018. This interdisciplinary program aims to bring together specialist from different institutions (DRAC, Universities, INRAP and volunteers) in order to improve the knowledge about urban planning, origins, development and decline of this urban area which was unknown until 2006.

KEYWORDS

Gallia Belgica, Roman town, *Briga*, geophysics.

Article accepté après évaluation par deux experts selon le principe du double anonymat

Le site archéologique du « Bois-l'Abbé » est situé dans le nord de la Seine-Maritime, à la frontière du département de la Somme, sur le territoire de la commune d'Eu. Implanté à 7 km de la mer sur le point culminant (135 m d'altitude) de l'étroit plateau de « Beaumont » (fig. 1), il domine, au nord, la vallée de la Bresle, un petit fleuve côtier navigable sur quelques kilomètres à l'époque antique qui permettait de relier la Manche, et, au sud-ouest, le vallon sec de Saint-Pierre-en-Val. Cette situation topographique favorable est probablement à l'origine du choix d'une implantation humaine dès le Néolithique final [1].

Composée d'acteurs issus de différentes institutions (SRA, association FATRA [2], Université de Strasbourg, Université de Toulouse, INRAP), l'équipe qui étudie actuellement le site s'est structurée depuis 2018 autour du Programme Collectif de Recherche (PCR)

« Topographie générale et insertion territoriale de la ville antique de *Briga* » [3]. Son objectif est double : comprendre la structuration et l'évolution de la ville de manière dynamique, depuis ses origines protohistoriques jusqu'à son déplacement en fond de vallée sous l'actuelle ville d'Eu, et évaluer l'insertion de l'agglomération dans le territoire qui l'entoure.

[1] MANTEL & DUBOIS dir. 2020 (à paraître).

[2] Fédération des Archéologues du Talou et des Régions Avoisinentes. <https://fatratlou.wixsite.com/archeologie>

[3] Un conseil scientifique, dont Jean-Yves Marc (Université de Strasbourg) assure la présidence, a été constitué autour de Séverine Blin (AOROC-CNRS), Stéphane Dubois (INRAP), Matthieu Poux (Université Lyon II Lumière), Laurent Popovitch (Université de Bourgogne) et Thierry Dechezleprêtre (Conseil départemental des Vosges) afin de définir les grandes orientations de la recherche.

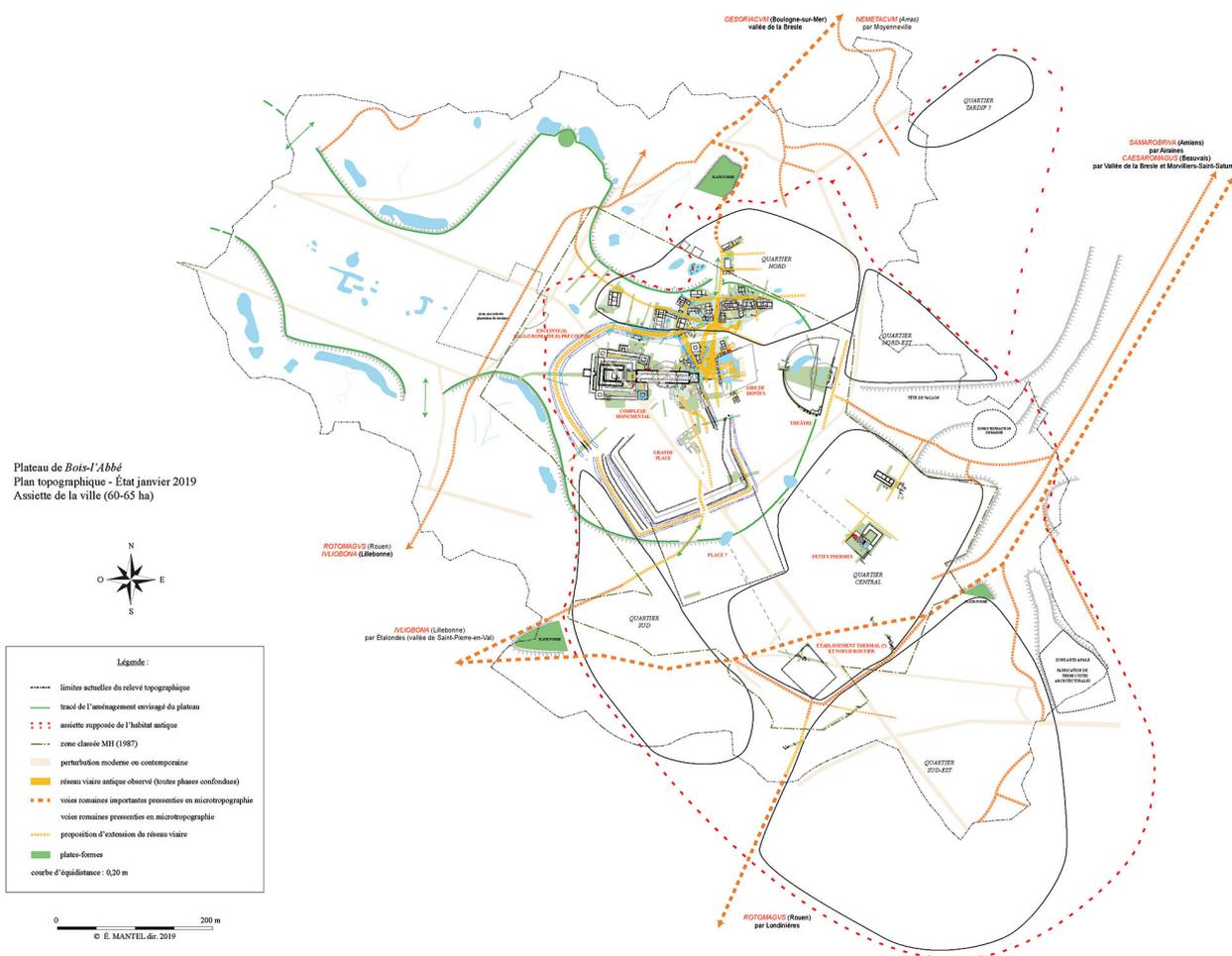


Figure 1

Emprises et tracés principaux d'aménagements anthropiques, toutes périodes confondues, étudiés et observés dans l'environnement de *Briga* (Étienne Mantel dir. 2019, DAO Jonas Parétias).

HISTOIRE DES RECHERCHES

Redécouvert à la fin du XVIII^e siècle par une équipe de terrassiers lors des travaux d'aménagement du chemin vicinal reliant Eu à Foucarmont, le site du « Bois-l'Abbé » a fait l'objet d'interventions limitées au XIX^e siècle, d'abord sous la conduite de Louis Estancelin (1820-1821) [4], régisseur du domaine du comte d'Orléans, puis de l'abbé Cochet (1872), pionnier de l'archéologie normande (et plus particulièrement en Seine-Maritime) [5]. Ces interventions de courtes durées ont principalement concerné les monuments dont les vestiges étaient les plus perceptibles dans la topographie, en l'occurrence le Grand Temple [6] et l'édifice de spectacle reconnu comme un amphithéâtre, puis un théâtre (fig. 2). Ce n'est que dans la seconde moitié du XX^e siècle que les premiers travaux archéologiques méthodiques ont été menés chaque été, entre 1965 et 1980, par une équipe de bénévoles et lycéens dirigés par Michel Mangard, alors proviseur de lycée à Lillebonne et futur directeur de la circonscription des Antiquités de Haute-Normandie. Les larges sondages pratiqués concernèrent exclusivement les deux principaux monuments explorés au siècle précédent : le théâtre et le temple (fig. 2). Ces recherches aboutirent à la publication d'un important article dans *Gallia* qui

relate l'exceptionnelle découverte épigraphique liée à l'édifice de spectacle en 1965 [7] et, près de trente ans plus tard, d'un ouvrage monographique qui présente les résultats obtenus sur le lieu de culte [8]. Après une décennie et demie d'abandon, un service municipal d'archéologie fut créé au milieu des années 1990 à l'instigation de la Mairie d'Eu et du Service Régional d'Archéologie de Haute-Normandie pour mener des sondages ponctuels au « Bois-l'Abbé ». L'objectif de ces explorations effectuées au sein de la clairière de 23 hectares classée au titre des Monuments Historiques depuis 1987, ainsi qu'à sa bordure sud, consistait d'abord à reconnaître la présence ou non de vestiges et d'en assurer la mise en valeur. Menées conjointement par le Service Municipal d'Archéologie de la Ville d'Eu et le Service Régional d'Archéologie de Haute-Normandie entre 2002 et 2005, les recherches

[4] ESTANCELIN 1825.

[5] COCHET 1873.

[6] Cet édifice est désigné par cette appellation depuis sa reconnaissance au XIX^e siècle, un terme qui a été conservé dans l'actuelle nomenclature du site.

[7] MANGARD 1982 ; AE vol. 1978, 501 ; AE vol. 1982, 716 ; AE vol. 2006, 836.

[8] MANGARD 2008.

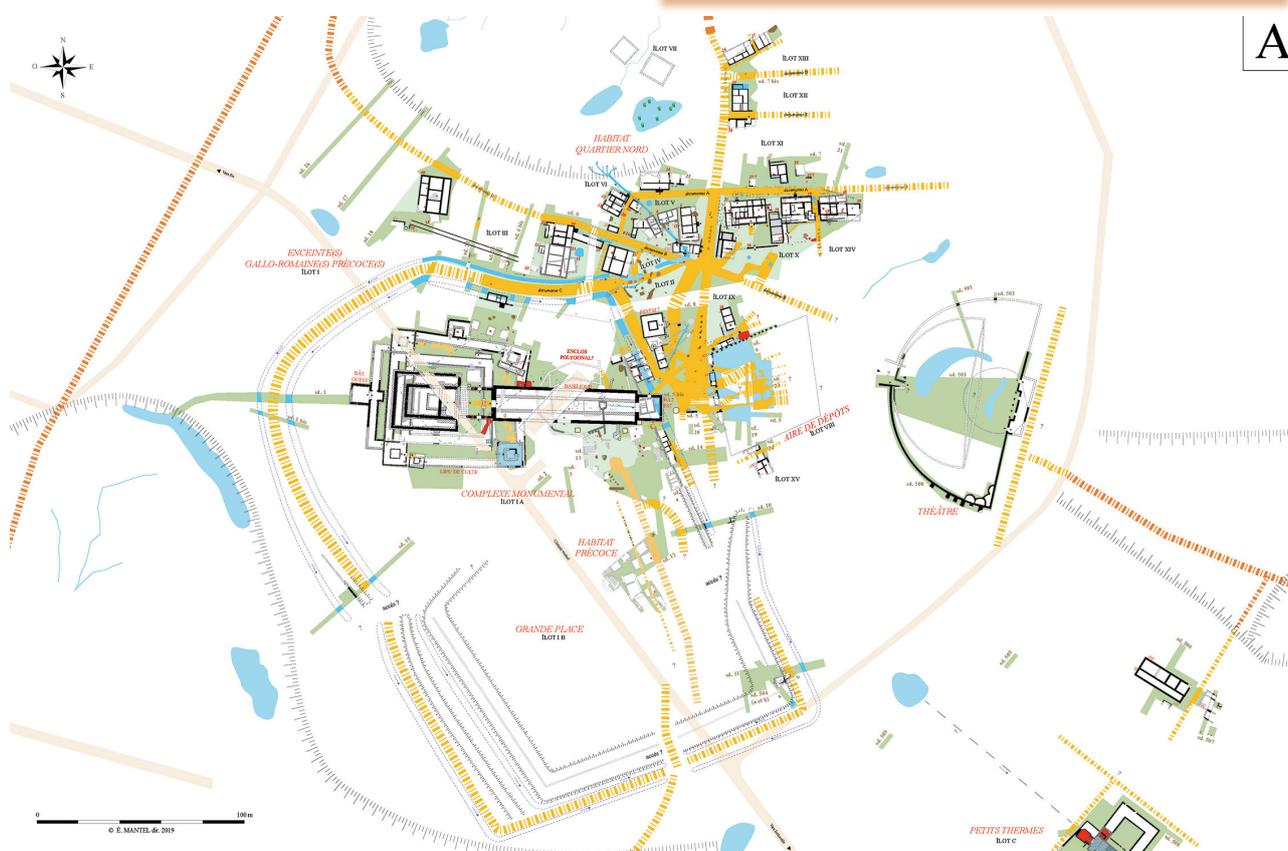


Figure. 2 : plan interprété des vestiges découverts au nord-ouest de *Briga*, toutes phases confondues. (Étienne Mantel dir. 2019, DAO Jonas Parétias).

se concentrèrent sur le niveau de « terres noires » du lieu de culte qui conservaient encore d'abondants dépôts constitués de centaines d'objets. Partiellement fouillé par Michel Mangard, cet horizon sur lequel le Grand Temple a été implanté (**fig. 2**, pointillés verts) faisait l'objet de pillages intensifs par des détectoristes clandestins depuis les années 1980.

L'année 2006 marqua un changement de méthode avec le début d'une campagne triennale de fouille programmée, menée sous l'égide du Ministère de la Culture et dirigée par Étienne Mantel, aux abords est du temple central (**fig. 2**). Les investigations prennent un essor décisif suite à la mise au jour dès la première année d'une plaque dédicatoire annonçant la présence d'une basilique [9], un monument de 69 m de long par 16 à 17 m de large qui a été intégralement fouillé depuis [10]. La découverte d'une inscription mentionnant le nom de l'édifice associée à son plan complet constitue, à ce jour, une découverte qui demeure sans équivalent dans les Trois Gaules. Son association à un temple de grande dimension (32 m x 28 m), à un théâtre de 102 m de diamètre (**fig. 3**), à une place publique pressentie de plusieurs hectares et la densité de vestiges dans la zone classée évoquait alors un véritable complexe monumental lié à une ville plutôt qu'un

sanctuaire isolé. Cette inscription révéla également le nom de cette agglomération – *Briga* –, issu d'un mot celtique désignant une colline ou, par extension, un site fortifié de hauteur, jusqu'alors totalement inconnu des sources littéraires ou iconographiques antiques et médiévales [11]. Les découvertes archéologiques effectuées depuis n'ont eu de cesse de confirmer que les édifices reconnus depuis le XIX^e siècle comme ceux d'un simple sanctuaire situé aux confins de la cité des Ambiens (le *conciliabulum* théorisé par Gilbert-Charles Picard dans les années 1970 [12]) sont intégrés à un ensemble bâti beaucoup plus vaste, qui s'étend sur une superficie d'au moins 65 hectares au début du III^e siècle [13].

Ces résultats, qui ont profondément renouvelé les connaissances au « Bois-l'Abbé » et son interprétation, font actuellement l'objet d'une première monographie,

[9] MANTEL, DUBOIS & DEVILLERS 2006 ; *AE* vol. 2006, 837 ; *AE* vol. 2007, 980.

[10] MANTEL & DUBOIS 2010, p. 3-25.

[11] MANTEL, DUBOIS & DEVILLERS 2006, p. 39.

[12] PICARD 1970.

[13] MANTEL & DUBOIS 2017, p. 181.



Figure. 3
Vue vers le sud-est du complexe monumental, du Quartier Nord d'habitat et du théâtre (cliché Étienne Mantel 2014).

en deux volumes, sous la direction d'Étienne Mantel et Stéphane Dubois. Cette synthèse des connaissances acquises au cours de ces cinquante dernières années sera publiée à la fin de l'année 2020 comme numéro spécial de la *Revue archéologique de Picardie* [14]. Malgré ces incontestables avancées récentes, de nombreux questionnements persistent sur cette agglomération dont seuls deux quartiers ont été amplement reconnus (fig. 2 : habitat précoce et Quartier Nord). La nature des édifices du Quartier Central ainsi que leur insertion dans la ville, l'organisation interne et les systèmes d'accès de l'enceinte à l'intérieure de laquelle se développe l'occupation précoce, la nature de l'îlot VIII, la validation de l'existence d'un théâtre initial comme sa forme et sa chronologie, la caractérisation de l'enceinte fortifiée présumée du haut Moyen Âge à l'extrémité ouest du plateau (située au lieu-dit *Bois-des-Combles*) ou la mise en exergue de quartiers artisanaux constituent des axes de recherche pour les années à venir. L'étude de *Briga* s'inscrit dans la thématique de la genèse, du développement et de l'abandon des villes de Gaule Belgique, et plus largement de Gaule Chevelue. Dans ce cadre, le PCR offre la possibilité d'organiser des opérations de terrain qui viendront compléter la documentation sur la topographie de cette ville et son développement jusqu'à sa disparition totale dans le courant du IV^e siècle.

L'APPORT RÉCENT DES DONNÉES DE TERRAIN

Identifiés jusqu'au milieu des années 2010 comme les composants d'un « grand sanctuaire » plus ou moins isolé et à l'organisation très lâche, il est désormais indéniable que ces vestiges monumentaux en apparence isolés sont en réalité situés en bordure ouest d'une agglomération nommée *Briga* [15].

Les fouilles programmées menées depuis 2015 ont permis de caractériser les phases anciennes d'occupation humaine sur le plateau de « Beaumont », dont les premiers indices remontent au Néolithique final [16]. Après de probables hiatus, en l'état des connaissances, à l'âge du Bronze et au Hallstatt, une présence continue, pressentie à La Tène ancienne, est attestée dès

La Tène moyenne (vers 200 av. J.-C.) par l'abondance de mobilier protohistorique dans les niveaux les plus anciens [17]. Dès les dernières décennies du I^{er} siècle av. J.-C., l'occupation prend la forme d'une bourgade, constituée de petites unités d'habitation (fig. 2, habitat précoce) enserrées dans un système défensif (fossé, *vallum*, *agger*) d'environ 3 hectares et dominée par son sanctuaire à l'ouest, lui-même délimité par un enclos fossoyé d'environ 2 hectares [18]. Vers 70-80 ap. J.-C., ce quartier ainsi que le dispositif fortifié sont définitivement arasés au profit d'un espace ouvert non bâti où est aménagée une grande place publique. À cette même époque, de nouvelles unités construites essaient aux alentours pour former les embryons des futurs quartiers. L'agglomération connaît alors une grande phase d'extension, qui est en particulier documentée par les fouilles extensives menées sur environ un hectare d'un quartier d'habitation, localisé au nord du complexe monumental et de l'agglomération (fig. 2, Quartier Nord). Son étude a permis de déterminer que la ville est organisée dans ce secteur à partir de la fin du I^{er} siècle ap. J.-C. en îlots plus ou moins réguliers délimités par un quadrillage de rues orienté selon les points cardinaux tout étant adapté aux contraintes topographiques [19]. Cette occupation va se développer, s'organiser et se densifier pendant les II^e et III^e siècles (fig. 2) [20], jusqu'à son abandon total dans le dernier quart du III^e siècle [21].

Dès l'époque tibérienne, la ville va progressivement se doter de monuments publics maçonnés édifiés sur la partie haute du plateau à l'emplacement d'un lieu de culte gaulois en matériaux périssables, établi probablement dès la Tène moyenne (fig. 2, complexe monumental). L'ensemble monumental a été constitué en au moins quatre phases, dont les deux dernières sont les plus imposantes, entre le début du I^{er} siècle et le milieu du III^e siècle ap. J.-C [22]. L'ampleur des investissements témoignent d'une réelle volonté de la part des évergètes de doter l'agglomération de *Briga* d'une parure monumentale dédiée aux cérémonies communautaires. Réalisés en plusieurs phases, ces agrandissements conduisent à doter la ville de bâtiments aux dimensions imposantes (fig. 2 et 3) réunis dans un ensemble qui concentre, au début du III^e siècle, tous les édifices et espaces fonctionnels constitutifs d'un

[14] MANTEL & DUBOIS dir. 2020 (à paraître).

[15] MANTEL, DUBOIS & DEVILLERS 2006, p. 32

[16] MANTEL & DUBOIS dir. 2020 (à paraître).

[17] *Ibid.*

[18] MANTEL & DUBOIS 2013, p. 137-138 ; MANTEL & DUBOIS 2014, p. 110-111.

[19] MANTEL, DUBOIS & JONVEL 2015, p. 24-25 ; MANTEL, DUBOIS & PARÉTIAS 2020 (à paraître).

[20] MANTEL & DUBOIS 2012, p. 157-160 ; MANTEL & DUBOIS 2014, p. 113-126.

[21] MANTEL & DUBOIS 2017, p. 182-183.

[22] MANTEL & DUBOIS 2010, p. 19-25.

complexe public s'inspirant, avec des adaptations, du modèle du *forum*. Situé dans la partie ouest, le lieu de culte est organisé autour d'un temple principal enserré par un quadriportique qui assure la fonction de péribole et relie quatre édifices à plan centré (*fana*) édifiés aux angles. À l'est sont aménagés une basilique dans l'axe du temple, une probable salle de conseil (Bâtiment Est) et une grande place publique délimitée par un mur auquel sont accolées des boutiques ouvertes vers l'extérieur [23]. Un théâtre de 102 m de diamètre complète l'équipement monumental actuellement reconnu dans cette agglomération (fig. 2). L'existence d'un tel ensemble d'édifices, couplée à la découverte d'attestations épigraphiques exceptionnelles pour le nord des Trois Gaules, semblent désigner *Briga* comme le chef-lieu d'une subdivision administrative nommé *pagus catulou(...)*, qui relevait alors de l'une des cités voisines, probablement celle des Bellovaques (autour de Beauvais-*Caesaromagus*) [24] plutôt que de celle des Ambiens, dont le chef-lieu était Amiens-*Samarobriva* [25].

L'agglomération est vraisemblablement abandonnée à partir de 270 ap. J.-C. Ce déclin intervient dans un contexte caractérisé par une instabilité régionale, également documentée par les prospections pédestres conduites dans le nord de la Seine-Maritime par Étienne Mantel [26]. Sans qu'il soit possible de préciser leur importance respective, la conjonction de facteurs défavorables (des raids, des problèmes économiques, des conditions climatiques défavorables etc.) semble expliquer ce déclin [27]. Dans le Quartier Nord, des réfections et de nombreux aménagements destinés à consolider les bâtiments ont été mis en évidence dès le début du III^e siècle et jusqu'à l'abandon du quartier, ce qui atteste de glissements de terrain importants. Au début du IV^e siècle, après une forte contraction

urbaine, ne subsiste à *Briga* qu'une petite occupation d'un quart d'hectare, concentrée aux abords du Bâtiment Est, dont la nature reste encore à déterminer (fig. 2). En l'état actuel des connaissances, elle semble en partie liée à la récupération des matériaux de construction des monuments [28].

De manière complémentaire aux opérations de terrain, l'étude du mobilier exhumé dans le complexe public comme dans les quartiers d'habitats se poursuit de manière très active, principalement dans le cadre de travaux universitaires de deuxième et troisième cycles. L'étude de ces collections acquises de 1965 à nos jours (le mobilier du XIX^e siècle a pour l'essentiel disparu !) occupe une place prioritaire dans le cadre du PCR. La reprise de l'étude du mobilier ancien et sa mise en perspective avec celui issu des fouilles récentes donnent des résultats qui conduisent déjà à affiner les chronologies (numismatique [29], céramologie [30]), à proposer des restitutions des élévations du complexe public (études du lapidaire [31] et des peintures murales [32]), à comprendre les pratiques culturelles et culturelles (étude des dépôts du complexe public, du sanctuaire de l'îlot II, de l'aire de dépôts de l'îlot VIII : fig. 2), à une connaissance de la ville comme pôle économique et social (artisanat, commerce, circulation monétaire, consommation alimentaire [33]).

DES CONDITIONS D'INTERVENTION FAVORABLES

La préservation du site archéologique du « Bois-l'Abbé » de toute activité humaine pendant plus d'un millénaire constitue son principal atout, une réalité qui s'explique en grande partie par l'abandon de l'agglomération à l'époque tardo-antique et par la rapide

[23] MANTEL & DUBOIS dir. 2020 (à paraître).

[24] MANTEL, DUBOIS & DEVILLERS 2006, p. 40 ; MANTEL & DUBOIS dir. 2020 (à paraître).

[25] MANGARD 1972.

[26] MANTEL dir. 2010, p. 8-9 ; MANTEL & DUBOIS dir. 2020 (à paraître).

[27] MANTEL & DUBOIS 2017, p. 191 ; MANTEL & DUBOIS dir. 2020 (à paraître).

[28] MANTEL & DUBOIS 2017, p. 191.

[29] Le mémoire de master mené par Stéphane Dubois à l'Université de Dijon, sous la direction de Laurent Popovitch, consiste en une analyse numismatique des monnaies d'époque romaine découvertes dans le complexe monumental et ses abords.

[30] Thèse de doctorat sur la vaisselle en céramique à *Briga* par Victor Viquesnel-Schlosser à l'Université de Toulouse II – Jean Jaurès, sous la direction de Martine

Joly, et un mémoire de master 2 effectué par Alix Delcroix à l'Université de Lyon II, sous la direction de Matthieu Poux, qui s'intéresse à l'étude d'une partie des céramiques retrouvées dans le quartier d'habitat nord.

[31] Thèse de doctorat sur l'architecture du complexe monumental de *Briga* à travers, entre autres, le lapidaire par Jonas Parétias à l'Université de Strasbourg, sous la direction de Jean-Yves Marc.

[32] L'étude d'une partie du décor peint du complexe monumental a déjà été bien engagée par Pierre-Manuel Weill dans un mémoire de master soutenu en 2015 à l'Université de Paris X-Nanterre, étude qu'il poursuit bénévolement depuis.

[33] Une thèse en archéozoologie, qui intègre et compare certaines données issues de *Briga* à trois autres sites régionaux de même nature (Vieil-Évreux, Ribemont-sur-Ancre et Vendeuil-Caply) a été soutenue par Alice Bourgeois le 9 novembre 2019 à l'Université de Picardie Jules Verne.

recolonisation du couvert forestier dense, toujours présent de nos jours. Les occupations postérieures à l'abandon de l'agglomération sont rares : un chemin vicinal daté de la fin du XVIII^e siècle coupe le Grand Temple (**fig. 2**) et quelques bâtiments appartenant à une exploitation agricole implantée vers 1860 à l'emplacement du complexe monumental antique et qui est actuellement utilisée comme base archéologique. Les vestiges archéologiques sont en grande partie recouverts par la forêt, à l'exception de la clairière en jachère de 23 hectares classée au titre des Monuments Historiques depuis 1987 (**fig. 3**). Ces conditions favorables permettent de programmer les moyens d'action nécessaires à une meilleure compréhension de l'agglomération antique. Compte tenu de la nature argileuse du sol, du choix des matériaux de construction (des rognons de silex présents en abondance dans le substrat) et du niveau de conservation des vestiges, les sondages constituent la méthode la plus efficace à grande échelle pour appréhender l'occupation humaine et son évolution sur le plateau de « Beaumont ».

PERSPECTIVES POUR LA FOUILLE PROGRAMMÉE

À l'issue de près de deux décennies de recherches archéologiques de terrain menées lors de campagnes estivales de deux à cinq mois et trois années de transition (2016 à 2018), l'essentiel des vestiges reconnus dans le Quartier Nord et à la périphérie du complexe monumental a fait l'objet d'une mise en valeur par l'équipe de la fouille programmée. En 2019, les investigations ont pris une nouvelle tournure avec le lancement effectif du PCR qui s'est traduit par l'autorisation de trois opérations programmées [34]. La première, dans la continuité des travaux menés les années précédentes, concerne la poursuite de la fouille des abords du complexe monumental, tandis que les deux autres sont motivées par la reprise des recherches sur les monuments, déjà sondés aux XIX^e et XX^e siècles, en vue d'une publication : le théâtre et un établissement thermal désigné sous l'appellation de « Petits Thermes ».

La nécessité de poursuivre et d'étendre l'exploration des agglomérations est constamment soulignée à l'issue des événements scientifiques organisés

depuis plusieurs décennies sur le phénomène urbain. Depuis le colloque de Saint-Riquier sur les villes de la Gaule Belgique au Haut-Empire en 1982, qui concluait sur l'indigence globale des données [35] et celui de Bliesbrück-Reinheim en 1992 [36], les agglomérations du territoire dites « secondaires » [37] sont désormais mieux perçues grâce à la multiplication des fouilles programmées et préventives. La présentation de résultats récents comme ceux de Jouars-Pontchartrin (78) [38] ou de Beaumont-sur-Oise (95) [39] témoigne d'un réel renouvellement de la documentation à l'issue de la publication des actes de colloque sur les villes romaines du nord de la Gaule en 2007 [40]. Cet état des connaissances ne doit néanmoins pas faire oublier, comme le rappelait John Scheid dans son introduction du colloque de Grand en 2015 [41], que seule la poursuite d'interventions de terrain soutenues et sur le long terme permettra de répondre aux problématiques par l'apport de nouvelles données [42]. Dans un contexte où les villes reconnues sur le territoire demeurent peu documentées, y compris lorsque des investigations archéologiques intermittentes y ont été menées depuis plus d'un siècle, les résultats obtenus à *Briga* contribuent activement au renouvellement des connaissances sur les agglomérations dans le nord des Trois Gaules à l'époque romaine.

LES PROSPECTIONS PÉDESTRES ET MICROTOPOGRAPHIQUES

L'extension des recherches aux abords du Grand Temple marqua un réel changement de méthode à l'origine de la mise en exergue de son intégration dans un complexe monumental public [43] et rendit nécessaire la reconnaissance de l'environnement immédiat des deux édifices visibles dans le paysage depuis le XIX^e siècle (temple et théâtre, **fig. 2**). Dès 2007, l'objectif a consisté à mettre en œuvre des approches de terrain susceptibles d'appréhender les abords de ces importants monuments publics. La méthode la plus simple et la moins onéreuse, compte tenu de la topographie du plateau et du couvert forestier, a été d'organiser des prospections pédestres, dirigées par Étienne Mantel, pour estimer l'étendue de l'assiette de l'agglomération (**fig. 1**, pointillés rouges). Sur la base d'un repérage et

[34] MANTEL *et al.* 2020.

[35] MASSY dir. 1984.

[36] PETIT & MANGIN dir. 1994.

[37] MARC & BLIN 2010, p. 23-24.

[38] BLIN 2007.

[39] VERMEERSCH 2007.

[40] HANOUNE dir. 2007.

[41] DECHEZLEPRÊTRE, GRUEL & JOLY 2015.

[42] SCHEID 2015, p. 17.

[43] MANTEL & DUBOIS 2010, p. 5 ; 16-25.

d'une cartographie des indices anthropiques caractéristiques de l'Antiquité (présence de tuiles, de tessons...), elles ont permis de reconnaître et circonscrire plus finement l'occupation du plateau afin d'estimer la superficie maximale de la ville à au moins 65 hectares à son apogée [44]. La mise en évidence de concentrations de vestiges donne parfois des indications qui permettent de pressentir la fonction de certaines zones. À un peu moins de 600 m au sud-est du théâtre, en bordure est de l'agglomération, un quartier artisanal a été repéré (fig. 1, zone artisanale) par le ramassage de terres cuites architecturales (céramiques, tuiles...) surcuites et l'identification d'anomalies du relief. La connaissance plus précise de la topographie constitue un élément indispensable à la réflexion sur les implantations humaines (voies, bâtiments...). Pour compléter les observations issues des prospections, une couverture microtopographique de la zone classée et de ses abords a été réalisée entre 2010 et 2016 sur une surface d'environ 80 hectares. Ces six campagnes d'arpentage au sol, menées par Étienne Mantel et Richard Jonvel [45] ont permis d'identifier les reliefs remarquables, de les référencer et de les intégrer dans la réflexion générale à l'échelle de l'agglomération. Les nombreux chemins creux, appelés cavées, observés dans le relief actuel correspondent vraisemblablement au passage de voies antiques qui assuraient l'accès à l'agglomération depuis la vallée de la Bresle et le vallon. L'existence d'une éventuelle enceinte fortifiée sur le plateau de « Beaumont » [46], qui reste encore à caractériser et dont l'origine naturelle ou anthropique

sera confirmée par des analyses géomorphologiques, a aussi été pressentie à l'issue de ces prospections. Ces données viennent compléter le plan archéologique issu des fouilles pour constituer une carte topographique de l'agglomération de *Briga* et d'une partie de son environnement (fig. 4) qui guidera à l'avenir les nouvelles interventions de terrain.

LE LIDAR PAR DRONE

Si elle présente des avantages indéniables (faibles coûts, non prise en compte des perturbations contemporaines...), l'acquisition de données topographiques par arpentage au sol demeure relativement longue à mettre en œuvre. Compte tenu des résultats obtenus sur d'autres sites archéologiques de premier plan, une première campagne de relevé LIDAR (*light detection and ranging*) par drone a été effectuée sur 19 hectares par la société Altamétris à l'été 2019. Au vu des premiers résultats [47] actuellement en cours d'analyse, ce protocole d'acquisition peut être considéré comme fonctionnel pour couvrir les zones boisées difficilement

[44] MANTEL & DUBOIS 2017, p. 181.

[45] Aujourd'hui responsable d'opération pour la période médiévale au service archéologique d'Amiens-Métropole, il travaillait à l'époque pour le compte d'UnivArchéo à l'Université de Picardie – Jules Vernes.

[46] MANTEL, DUBOIS & JONVEL 2015, p. 29-30.

[47] ASSALI 2020, p. 249-265.

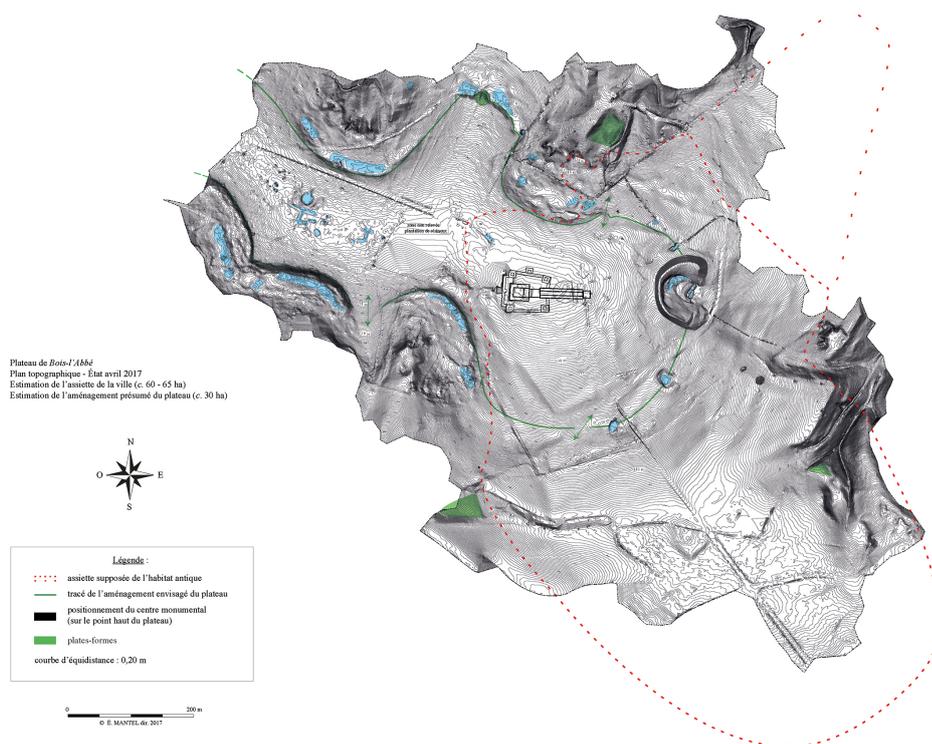


Figure 4

Tracé pressenti de l'assiette de la ville sur fond topographique avec indication de la rupture de pente qui marque un aménagement présumé du plateau (Étienne Mantel dir. 2017, DAO Jonas Parétias).

accessibles et escarpées. Étant donné la vitesse d'acquisition du LIDAR par drone, la généralisation de la méthode à plusieurs centaines d'hectares environnants (plateau de « Beaumont », vallée de la Bresle, vallon de Saint-Pierre-en-Val) pour enregistrer rapidement et précisément les microreliefs et anomalies constitue la technique la plus efficace. Dans des zones tests, les résultats seront confrontés avec les données déjà obtenues (relevés microtopographiques, prospections géophysiques, électriques...) pour illustrer la complémentarité de ces techniques non destructrices et la nécessité de les faire de manière concertée en parallèle de la fouille, sur le modèle des travaux menés à Mandeure/*Epomanduodurum* dans le cadre d'un PCR [48].

LES PROSPECTIONS GÉOPHYSIQUES

Si elles permettent de développer et d'alimenter les problématiques relatives à la topographie de la ville, les différentes techniques de prospections mises en œuvre jusqu'alors n'offraient pas la possibilité de percevoir la structuration des vestiges enfouis. Pour répondre à cet enjeu crucial et permettre de comprendre l'organisation de l'agglomération, une première intervention a été entreprise au « Bois-l'Abbé » par la société Géocarta en 2010 dans le cadre d'une prestation commerciale. Les méthodes de mesure de la résistivité électrique et du pseudo-gradient vertical magnétique mises en place lors de cette mission se sont révélées trop peu précises pour identifier des vestiges archéologiques, dont certains ont été reconnus par la suite lors de sondages, dans le contexte environnemental du site. Ces résultats non-concluants peuvent s'expliquer par une métrologie peu appropriée au contexte de faibles contrastes physiques manifestes entre vestiges et encaissant.

À la suite de cet échec complet, de nouvelles prospections géomagnétiques plus adaptées au contexte ont été menées dans le cadre d'une collaboration avec l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS - UMR 7516 Unistra/CNRS). Fort des résultats obtenus, une mission a été reconduite chaque été entre 2017 et 2019 dans le but de cartographier le plus précisément possible le sous-sol de la clairière classée (fig. 5). Elle a consisté en la mise en œuvre d'un système développé par l'IPGS qui permet une mesure précise du champ total au plus proche des sources pour différentes applications [49]. Monté sur un sac à dos, le système permet une mesure entre 0,2 et 0,8 m du sol qui est géoréférencée en temps réel à l'aide d'un système GNSS différentiel. Grâce aux relevés,

des profils d'acquisition sont établis et sont utilisés pour dresser une carte des anomalies magnétiques. Cette méthode s'est révélée adaptée aux importantes surfaces à couvrir et aux contraintes géologiques très particulières du substrat argileux à silex irréguliers. Les différentes anomalies magnétiques des 12,5 hectares couverts à ce jour ont été étudiées et interprétées en variant les échelles de représentation d'intensité (fig. 5). À l'exception de certaines zones, actuellement couvertes de tôles pour assurer la protection des vestiges, l'ensemble des relevés livre des informations exploitables, ce qui illustre bien la nécessité d'adapter la méthode au contexte local.

Les données sont plus facilement interprétables dans les parties sud et ouest du plateau, une situation qui peut s'expliquer par une meilleure conservation des vestiges, par un plus grand soin apporté à la construction ou par la présence d'une grande densité de matériel à fort potentiel magnétique. De nombreuses anomalies quadrangulaires parsèment cette extrémité du plateau, avec des concentrations importantes dans les parties sud-est et sud-ouest. De longs tracés linéaires se retrouvent également dans sa partie ouest. Au sud de la clairière, à proximité des « Grands Thermes », d'importantes variations confirment le prolongement des maçonneries au-delà des quelques sondages effectués dans les années 1990. Enfin, immédiatement au sud-est du théâtre, une série d'anomalies quadrangulaires a été décelée. D'une emprise totale proche de celle des « Petits Thermes », elle peut s'apparenter à un complexe d'environ 1 500 m², qui présente des subdivisions internes peu perceptibles. Les résultats obtenus démontrent l'efficacité de la méthode développée et mise en œuvre par l'IPGS [50]. Si, à *Briga*, les caractéristiques du substrat ne permettent pas de connaître le plan détaillé des bâtiments et de proposer une première interprétation de leur fonction, la densité de l'occupation comme la présence de grands ensembles bâtis, pressentis par les prospections pédestres, sont confirmés. Les deux premières interventions ont permis d'évaluer l'efficacité de la méthode tout en accroissant le nombre de données recueillies en un temps limité. En 2019, des relevés complémentaires plus précis au ras du sol ont été menés dans les zones remarquables afin de repérer d'éventuelles structures moins perceptibles et de

[48] BARRAL *et al.* 2015.

[49] GAVAZZI *et al.* 2016 ; GAVAZZI *et al.* 2019.

[50] La méthode et les résultats sont exposés de manière plus détaillée dans GAVAZZI *et al.* 2020 (à paraître).

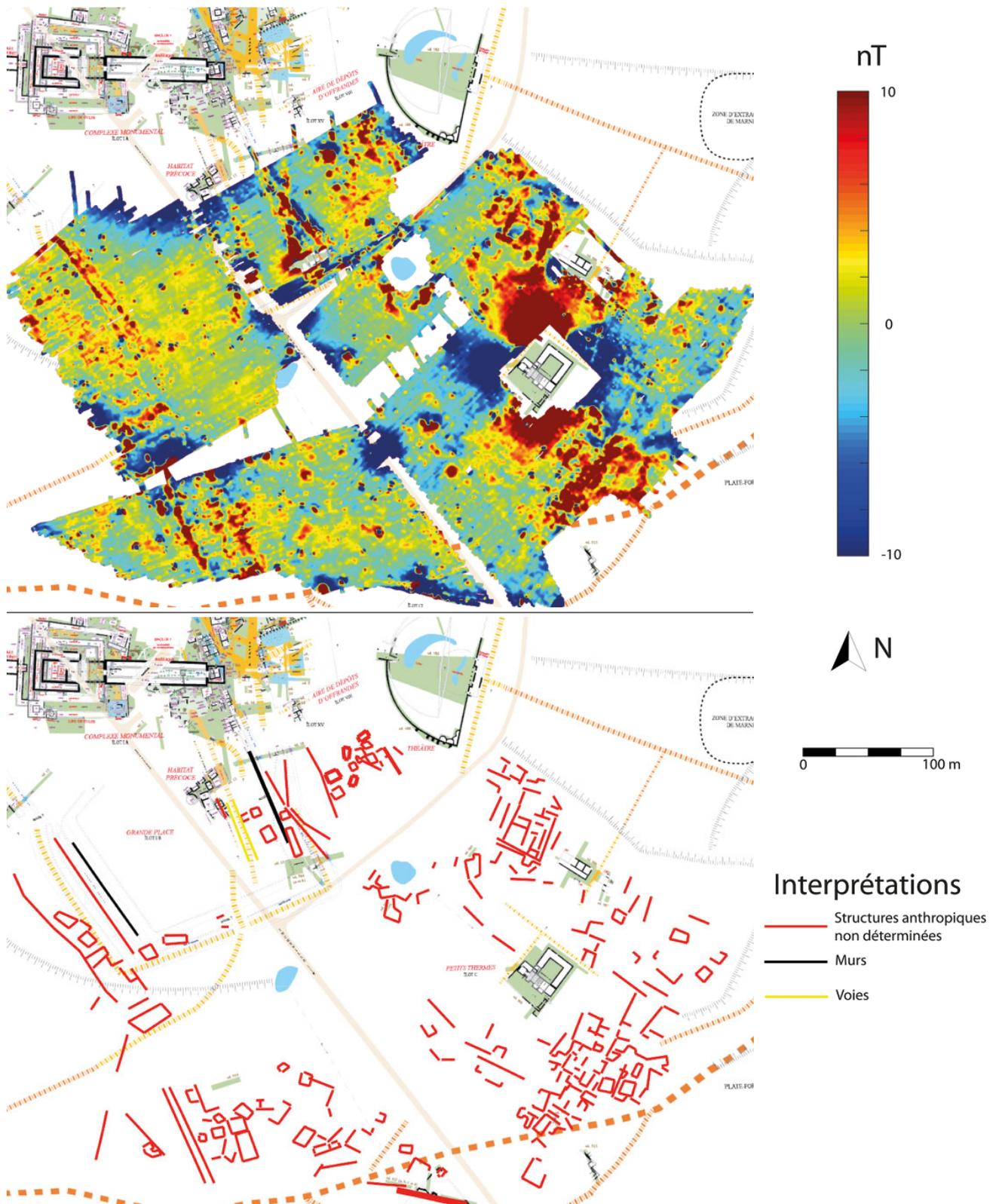


Figure 5
 Carte de l'anomalie de l'intensité du champ magnétique et interprétations associées (plan archéologique Étienne Mantel dir 2019, DAO Jonas Parétias ; données géophysiques et interprétation Bruno Gavazzi 2019).

préciser les premières interprétations. Cette approche géophysique a été complétée par la réalisation d'essais de la méthode électrique, avec le soutien logistique de l'opérateur d'archéologie préventive Archéologie Alsace, dont les résultats sont en cours d'interprétation [51]. À l'horizon 2020, l'ensemble des parcelles exploitables situées dans la zone classée au titre des Monuments Historiques ou aux abords aura été couvert. Enfin, l'agglomération de *Briga* offre un bon terrain d'expérimentation pour l'adaptation de la méthode au milieu forestier, un enjeu qui demeure important pour comprendre cette agglomération dont les trois quarts de la superficie sont recouverts par la forêt.

PERSPECTIVES DE RECHERCHE

La confrontation de l'ensemble des données acquises au cours de ces interventions constitue une étape indispensable à la meilleure compréhension de l'insertion topographique de l'agglomération sur l'étroit plateau de « Beaumont ». Les prospections pédestres et microtopographiques, qui ont permis de déterminer les limites spatiales de l'occupation antique sur une superficie d'au moins 65 hectares à son apogée – un chiffre susceptible d'évoluer à l'issue de nouvelles investigations en forêt – ont été complétées depuis 2017 par le recours aux sciences de la terre (géophysique, électrique, LIDAR). Les données acquises avec ces différentes méthodes constituent autant de niveaux de lecture additionnels dont l'analyse transversale affine la perception du milieu naturel et topographique dans lequel s'intègre la ville antique.

La constitution du PCR s'est également accompagnée d'une diversification des méthodes de relevé issues des sciences de la terre afin de documenter de la manière la plus complète possible cette partie de plateau densément occupée. Le caractère collectif de la démarche scientifique et l'interdisciplinarité de l'équipe offre la possibilité de répondre à une partie des grands questionnements qui demeurent en suspens, alors même que les connaissances acquises aujourd'hui ont été profondément renouvelées depuis le début des années 2000 [52]. La superficie de l'agglomération ne permet bien entendu pas d'envisager une fouille extensive de l'ensemble des surfaces accessibles, ce qui conforte la nécessité de cibler et diversifier les recherches, en fonction de problématiques précises. En l'état actuel des connaissances, le développement urbain du Quartier Nord ne peut pas être comparé aux autres quartiers pressentis sur lesquels les investigations restent encore embryonnaires. Le croisement des méthodes contribuera alors à mieux appréhender

l'organisation du tissu urbain, sans devoir recourir à des décapages mécaniques trop conséquents, et participe déjà à renouveler les problématiques de recherche. Il sera ainsi possible d'affiner les hypothèses de délimitation des quartiers de la ville, des tracés des voies qui les desservent et de proposer un plan schématique des structures perçues en prospections fines pour nourrir la réflexion générale à l'échelle de l'agglomération et de son territoire.

Le site archéologique du « Bois-l'Abbé » offre également un excellent terrain d'investigation pour les géosciences, en particulier la géomorphologie et la pédologie. Les récentes observations montrent clairement que des phénomènes de solifluxion ont contribué à l'abandon de l'agglomération [53]. Si ces glissements de terrain sont attestés archéologiquement, une étude d'ensemble sur le substrat et ses caractéristiques structurales s'avère nécessaire pour en comprendre les dynamiques et les causes. Le sol géologique sur lequel reposent les niveaux archéologiques n'est pas identique sur l'ensemble de la surface du site puisque le terrain naturel Yprésien-Thanétiens, rencontré surtout sur la partie nord du plateau, voisine avec des formations du Coniacien et de limons remaniés. Parallèlement, des variations topographiques ont été observées grâce à la microtopographie, en particulier les forts pendages du thalweg dans le Quartier Nord, mais aussi les anomalies du terrain comme les replats, anthropiques ou naturels, ayant servi à l'implantation d'ensembles bâtis comme les « Petits Thermes » [54]. L'intervention de géomorphologues et d'un pédologue, programmée en 2020 pour mener une étude à l'échelle du site, renforcera l'interdisciplinarité du PCR.

Les avancées obtenues et à venir grâce à l'appui des disciplines des sciences de la terre sont très encourageantes pour documenter les dynamiques d'occupation et leur évolution. Elles devront être poursuivies et multipliées à plus grande échelle en parallèle avec la seule méthode qui ait réellement fait ses preuves pour comprendre la structuration des installations anthropiques et en proposer un phasage chronologique : la fouille extensive.

Enfin, la valorisation de la recherche constitue également l'un des enjeux définis dans le cadre du PCR. Une exposition thématique consacrée à l'agglomération romaine de *Briga* est programmée du 10 septembre au 13 décembre 2020 au Musée des Antiquités de

[51] REILLER & GAVAZZI 2020, p. 241-248.

[52] ROGERET 1998, p. 246 ; CHOLET 2004.

[53] MANTEL et DUBOIS 2017, p. 190-191.

[54] CHOLET 2002, p. 54.

Rouen-Métropole, puis à la Chapelle du Collège d'Eu au printemps 2021. Des publications thématiques et la mise en œuvre d'autres moyens de médiation scientifiques et culturels sont prévus, à moyen terme, pour partager avec le plus grand nombre de citoyens la connaissance de cet important site archéologique du nord de la France.

CONCLUSION

Au terme de près de quinze années de fouilles programmées à *Briga*, associées à la reprise de toute la documentation ancienne des XIX^e et XX^e siècles, les résultats obtenus offrent des connaissances sans commune mesure avec la perception que l'on avait de ce site au tout début des années 2000, tant dans sa nature que dans son organisation. La facilité d'accès des zones à investiguer, qui s'explique par l'absence presque totale de constructions aux alentours, permet d'aborder de grands secteurs de la ville. Ces fouilles sont également rendues possibles par la faible stratification des vestiges, qui, dans certaines zones, ne sont recouverts que d'une mince couche de terre végétale ou de 20 à 30 cm de niveaux archéologiques. Ces conditions favorables à la mise en place d'une recherche programmée ont permis l'exploration de surfaces conséquentes en aire ouverte. Les deux hectares et demi investigués dans la partie ouest de l'agglomération ont documenté l'évolution du complexe monumental, son organisation et une partie de deux quartiers d'habitat (**fig. 2**, habitat précoce et Quartier Nord). Cette méthode extensive, qui ne peut être mise en œuvre sur des sites similaires mieux stratifiés où les interventions sont évidemment plus longues, permet

de révéler le plan de la ville et son évolution chronologique. Les données issues de la fouille, qui demeurait le seul véritable moyen d'investigation fructueux à *Briga* jusqu'en 2017, sont désormais complétées par les résultats des prospections géophysiques (**fig. 5**). Le recours aux sciences de la terre confirme le caractère dense de l'occupation de cette extrémité de plateau, déjà pressenti par les sondages archéologiques et les prospections pédestres (**fig. 1**).

Ces avancées ont été obtenues par une équipe interdisciplinaire, constituée au fil de presque deux décennies, de professionnels de l'archéologie, de postdoctorants, d'étudiants de 2^e et 3^e cycles et de bénévoles. Leur complémentarité couvre l'ensemble des champs d'investigation nécessaires à la compréhension de l'agglomération de *Briga*, dans toutes ses dimensions. Fort de ces résultats, *Briga* figure au rang des sites essentiels pour alimenter la réflexion sur l'occupation humaine dans le nord de la France et la naissance du phénomène urbain, que ce soit pendant la Protohistoire ou l'époque romaine. À ces thématiques communes aux agglomérations des Trois Gaules, s'ajoutent des problématiques plus spécifiques qui placent *Briga* au cœur des discussions et la démarque des autres agglomérations du territoire. La nature de l'occupation protohistorique désormais de mieux en mieux caractérisée au « Bois-l'Abbé », l'existence d'un lien (ou non) avec l'*oppidum* d'Incheville implanté à moins de 3 km à l'est, le statut de la bourgade qui présentait un dispositif fortifié jusqu'au début de l'époque flavienne, l'originalité du plan du complexe monumental du début de l'époque sévérienne, ou encore l'abandon/déplacement de la ville vers l'estuaire de la Bresle à la fin du III^e siècle ap. J.-C. constituent des axes de recherche forts pour les années à venir. ■

BIBLIOGRAPHIE

AE : L'Année épigraphique, Paris
L'Année Épigraphique, vol. 1978, 1981.
L'Année Épigraphique, vol. 1982, 1984.
L'Année Épigraphique, vol. 2006, 2009.
L'Année Épigraphique, vol. 2007, 2010.

ASSALI, Pierre, 2020, « Première campagne d'acquisition LiDAR » dans Étienne Mantel, Stéphane Dubois, Jonas Parétias, Victor Viquesnel-Schlosser, Corentin Voisin, Matthieu Richard & Bruno Gavazzi, *Rapports des fouilles programmées 2019. Agglomération antique de Briga « Bois l'Abbé », Eu, Seine-Maritime - 76 255 001 AH. Programme collectif de recherche « Topographie générale et insertion territoriale de la ville de Briga »*, Caen, p. 249-265.

- BARRAL, Philippe, BILLOIN, David, BLIN, Séverine, BOSSUET, Gilles, CRAMATTE, Cédric FRUCHART, Catherine, LAPLAIGE, Clément, MAMIE, Antoine, MONNIER, Jacques, MOUGIN, Pierre, NOUVEL, Pierre, PININGRE Jean-François & THIVET Matthieu 2015**, « Nouvelles données sur l'agglomération antique d'*Epomanduodurum* (Mandeure et Mathay, Doubs) », *Gallia* 72/2, p. 11-142.
- BLIN, Olivier, 2007**, « L'agglomération antique de Jouars-Pontchartrain (Yvelines), *Diodurum*. Évolution d'un vicus de la cité Carnute », dans Roger Hanoune (éd.), *Les villes romaines du nord de la Gaule : vingt ans de recherches nouvelles*, Actes du XXV^e colloque international de HALMA-IPEL UMR CNRS 8164, Villeneuve-d'Ascq, *Revue du Nord*, Hors-Série (collection Art et Archéologie 10), p. 187-203.
- CHOLET, Laurent, 2002**, *Le sanctuaire romain du « Bois l'Abbé », sondages et fouilles programmées menées de 1994 à 2000 dans le cadre d'études préalables à la mise en valeur du site*, Rapport de fouille dactylographié, SRA de Haute-Normandie.
- CHOLET, Laurent, 2004**, *Le sanctuaire gallo-romain du « Bois-l'Abbé » : 200 ans de fouilles en forêt d'Eu*, Dieppe.
- COCHET, Jean-Benoît-Désirée, 1873**, « Fouilles du Bois l'Abbé, à Eu », *Revue Archéologique nouvelle série*, 14^e année, 25^e vol., p. 59-60.
- DECHEZLEPRÊTRE, Thierry, GRUEL, Katherine & JOLY, Martine (éd.), 2015**, *Agglomérations et sanctuaires: réflexions à partir de l'exemple de Grand*, Actes du colloque de Grand, 20-23 octobre 2011, Épinal (Archéologie et territoire 2).
- MASSY, Jean-Luc, (dir.), 1984**, *Les villes de la Gaule Belgique au Haut-Empire*, Actes du colloque tenu à Saint-Riquier (Somme) les 22-24 octobre. 1982, Amiens (*Revue archéologique de Picardie* 3-4, numéro spécial).
- ESTANCELIN, Louis, 1825**, « Mémoire sur les antiquités de la ville d'Eu et de son territoire », *Mémoires de la Société des Antiquaires de Normandie* 2, p. 1-24.
- GAVAZZI, Bruno, LE MAIRE, Pauline, MUNSCHY, Marc & DECHAMP, Aline, 2016**, « Fluxgate vector magnetometers: A multisensor device for ground, UAV, and airborne magnetic surveys », *The Leading Edge* 35 (9), p. 795-797, DOI: <https://dx.doi.org/10.1190/tle35090795.1>
- GAVAZZI, Bruno, LE MAIRE, Pauline, MERCIER DE LÉPINAY, Jeanne, CALOU, Paul & MUNSCHY, Marc, 2019**, « Fluxgate three-component magnetometers for cost-effective ground, UAV and airborne magnetic surveys for industrial and academic geoscience applications and comparison with current industrial standards through case studies », *Geomechanics for Energy and the Environment* 20, article 100117, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gete.2019.03.002>
- GAVAZZI, Bruno, BRAHIMI, Sonia, BERNARD, Paul & REILLER, Hugo, 2020 (à paraître)**, « Nouvelles prospections magnétiques à Briga : comparaison entre mesure du champ magnétique à l'aide de magnétomètres vectoriels et un levé industriel à l'aide de gradiomètres en milieu à faibles contrastes d'aimantation », dans Étienne Mantel & Stéphane Dubois (dir.), avec la collaboration de Louison Deschamps, Jonas Parétias & Matthieu Richard, Briga. *Bilan de cinquante années de recherches*, Blangy-sur-Bresle (*Revue archéologique de Picardie*, numéro spécial).
- HANOUNE, Roger (éd.) 2007**, *Les villes romaines du nord de la Gaule : vingt ans de recherches nouvelles* Actes du XXV^e colloque international de HALMA-IPEL UMR CNRS 8164, Villeneuve-d'Ascq, *Revue du Nord*, Hors-Série (collection Art et Archéologie 10).
- MANGARD, Michel, 1972**, « Le sanctuaire gallo-romain d'Eu-Bois l'Abbé et le problème de la frontière entre Calètes et Ambiens », *Revue des Sociétés Savantes de Haute-Normandie* 67, p. 3-11.
- MANGARD, Michel, 1982**, « L'inscription dédicatoire du théâtre du Bois l'Abbé à Eu (Seine-Maritime), *Gallia* 40/1, p. 35-51.
- MANGARD, Michel, 2008**, *Le sanctuaire gallo-romain du Bois l'Abbé à Eu (Seine-Maritime)*, *Revue du Nord*, Hors-série (collection Art et Archéologie 12).
- PETIT, Jean-Paul & MANGIN, Michel, (dir.), 1994**, *Les agglomérations secondaires : La Gaule Belgique, les Germanies et l'Occident romain*, Actes du colloque de Bliesbruck-Reinheim/Bitche, 21-24 octobre 1992, Paris.
- MARC, Jean-Yves & BLIN, Séverine, 2010**, « Le grand sanctuaire de Mandeure à l'époque impériale et ses destinataires », *Bulletin de la Société d'Émulation de Montbéliard* 133, p. 23-54.
- MANTEL, Étienne, (dir.), 2010**, *Briga ou l'histoire d'une bourgade antique peu à peu dévoilée en forêt d'Eu*, Blangy-sur-Bresle (FATRA 3).
- MANTEL, Étienne & DUBOIS, Stéphane, 2010**, « Une agglomération gallo-romaine révélée en forêt d'Eu. Découvertes archéologiques sur le site de l'antique Briga (1820-2009) » dans Étienne Mantel (dir.), *Briga ou l'histoire d'une bourgade antique peu à peu dévoilée en forêt d'Eu*, Blangy-sur-Bresle (FATRA 3), p. 1-26.
- MANTEL, Étienne & DUBOIS, Stéphane, 2012**, « Premier éclairage sur l'agglomération antique de Briga (Eu, Bois-l'Abbé, Seine-Maritime) : fenêtres ouvertes sur un quartier d'habitation au nord-est du centre monumental », *Journées archéologiques de Haute-Normandie, Évreux, 6-8 mai 2011*, Rouen, p. 151-160.
- MANTEL, Étienne & DUBOIS, Stéphane, 2013**, « Aux origines de l'agglomération antique de Briga (Eu, Bois l'Abbé, Seine-Maritime). Fouille d'un quartier d'habitat d'époque julio-claudienne », *Journées archéologiques de Haute-Normandie, Rouen, 11-13 mai 2012*, Mont-Saint-Aignan, p. 125-138.
- MANTEL, Étienne & DUBOIS, Stéphane, 2014**, « L'agglomération gallo-romaine de Briga (Eu, Bois l'Abbé, Seine-Maritime) au Haut-Empire : mise au jour des premiers îlots d'habitation », *Journées archéologiques de Haute-Normandie, Rouen, 24-26 mai 2013*, Mont-Saint-Aignan, p. 125-138.
- MANTEL, Étienne & DUBOIS, Stéphane, 2017**, « L'agglomération de Briga (Eu, Bois-l'Abbé, Seine-Maritime. Premières données sur l'occupation durant l'Antiquité tardive », dans Michel Kasprzyk & Martial Monteil (éd.), *Agglomérations, vici et castra du Nord de la Gaule entre Antiquité tardive et début du haut Moyen Âge*, *Gallia* 74/1, p. 181-193.
- MANTEL, Étienne & DUBOIS, Stéphane, (dir.)**, avec la collaboration de DESCHAMPS, Louison, PARÉTIAS, Jonas & RICHARD, Matthieu, 2020 (à paraître), Briga. *Bilan de cinquante années de recherches*, *Revue archéologique de Picardie*, Numéro spécial, Blangy-sur-Bresle,
- MANTEL, Étienne, DUBOIS, Stéphane & DEVILLERS, Sophie, 2006**, « Une agglomération antique sort de l'anonymat (Eu, «Bois l'Abbé», Seine-Maritime) : Briga ressuscitée », *Revue Archéologique de Picardie* 3/4, p. 31-50.

MANTEL, Étienne, DUBOIS, Stéphane & JONVEL, Richard, 2015, « *Briga* antique (Eu, «Bois l'Abbé», Seine-Maritime) : exploration archéologique d'îlots d'habitation au nord du complexe monumental », *Journées archéologiques de Haute-Normandie*, Alizay, 20-22 juin 2014, Rouen, p. 21-32.

MANTEL, Étienne, DUBOIS, Stéphane & PARÉTIAS, Jonas, 2020 (à paraître), « *Briga*, une ville de la Gaule Belgique. Comment une remise en question des données anciennes en révèle l'existence et son importance », *Annales des XXVIII^e Rencontres Archéologiques de Saint-Céré (Lot)*, Saint-Céré.

MANTEL, Étienne, DUBOIS, Stéphane, PARÉTIAS, JONAS, VIQUESNEL-SCHLOSSER, Victor, VOISIN, Corentin, RICHARD, Matthieu, GAVAZZI, Bruno, 2020, *Rapports des fouilles programmées 2019. Agglomération antique de Briga « Bois l'Abbé », Eu, Seine-Maritime - 76 255 001 AH. Programme collectif de recherche « Topographie générale et insertion territoriale de la ville de Briga »*, Caen.

PICARD, Gilbert-Charles, 1970, *Les provinces occidentales de l'Empire Romain*, in Association internationale d'études du Sud-Est européen (éd.), *Sources archéologiques de la civilisation européenne*, Actes du Colloque international organisé par l'AIESEE, Mamaia (Roumanie), 1-8 septembre 1968, Bucarest, p. 152-154.

REILLER, Hugo & GAVAZZI, Bruno, 2020, « Première campagne de prospections électriques à *Briga* » dans Étienne Mantel, Stéphane Dubois, Jonas Parétias, Victor Viquesnel-Schlosser, Corentin Voisin, Matthieu Richard & Bruno Gavazzi, *Rapports des fouilles programmées 2019. Agglomération antique de Briga « Bois l'Abbé », Eu, Seine-Maritime - 76 255 001 AH. Programme collectif de recherche « Topographie générale et insertion territoriale de la ville de Briga »*, Caen, p. 241-248.

ROGERET, Isabelle, 1998, *La Seine-Maritime, Carte Archéologique de la Gaule*, Paris.

SCHEID, John, 2015, « Grand et Apollon, comment identifier un lieu de culte ? », dans Thierry Dechezleprêtre, Katherine Gruel & Martine Joly (éd.), *Agglomérations et sanctuaires: réflexions à partir de l'exemple de Grand*, Actes du colloque de Grand, 20-23 octobre 2011, Épinal (Archéologie et territoire 2), p. 13-18.

VERMEERSCH, Didier, 2007, « L'agglomération antique de Beaumont-sur-Oise (Val d'Oise) : bilan des connaissances », dans Roger Hanoune (éd.), *Les villes romaines du nord de la Gaule : vingt ans de recherches nouvelles*, Actes du XXV^e colloque international de HALMA-IPEL UMR CNRS 8164, Villeneuve-d'Ascq, *Revue du Nord*, Hors-Série (collection Art et Archéologie 10), p. 99-132.

UN MODÈLE POUR COMPRENDRE L'INFLUENCE DE L'ÉTAT DE LA RECHERCHE, DES PROCESSUS POST-DÉPOSITION ET DE L'ATTRACTIVITÉ SUR LA DÉCOUVERTE DES SITES ARCHÉOLOGIQUES DANS LE KOCHERSBERG (BAS-RHIN, ALSACE, GRAND-EST, FRANCE)

Charlène MOREL^{1,*}

¹ UMR 7044 Archimède - Université de Strasbourg

* charlene.e.morel@gmail.com

RÉSUMÉ

Dans le cadre d'une étude portant sur les stratégies d'implantation des communautés agricoles, un modèle spatial est développé afin de mieux intégrer les biais de la carte de répartition des sites connus. Les paramètres inclus dans la modélisation sont l'état de la recherche archéologique, les processus post-déposition et un critère d'attractivité. L'objectif de ce modèle est de mieux comprendre quels facteurs favorisent l'implantation, la conservation, la découverte des vestiges et *in fine* la carte de répartition des sites archéologiques. Malgré quelques limites inhérentes à l'exercice de la modélisation spatiale, le modèle produit de nouveaux résultats qui sont détaillés *via* un exemple concernant la micro-région du Kochersberg en Alsace (Grand-Est, France).

MOTS-CLÉS

Modélisation, SIG, archéologie spatiale, Kochersberg, géoarchéologie, taphonomie.

As part of a study focusing on the settlement strategies of farming communities, a spatial model is developed in order to overcome the repartition map's biases. This model integrates as parameters the state of archaeological investigation, the taphonomical processes and an attractiveness criterion. The aim of the model is to understand which parameters influence the establishment of settlements as well as the conservation and discovery of their remains. Although this model has a few limitations, it produces new results that are detailed through the case study of the Kochersberg region in Alsace (Grand-Est, France).

KEYWORDS

Modeling, GIS, spatial archaeology, Kochersberg, geoarchaeology, taphonomy.

Article accepté après évaluation par deux experts selon le principe du double anonymat

La répartition des vestiges archéologiques est au cœur de toutes les problématiques en archéologie spatiale. Les méthodes utilisées afin de répondre à ces questionnements depuis les années 1950 reposent sur la cartographie des sites avec une prise en compte très légère voire inexistante des biais inhérents à l'archéologie tels que l'état de la recherche archéologique et les processus post-déposition [1]. Depuis 2007, les cartes de confiance archéologiques sont couramment utilisées [2], mais elles ne suffisent pas à prendre en considération tous les biais archéologiques. En effet, même si les biais liés à l'état de la recherche sont pris en compte, ceux liés aux processus post-déposition tels que l'érosion ou le recouvrement sédimentaire ne le sont pas. Afin de combler ce manque, un modèle spatial est établi en prenant en compte à la fois les processus taphonomiques, l'état de la recherche archéologique ainsi que l'attractivité potentielle estimée. Cet article traite à la fois de l'élaboration de cette modélisation et de son application à la micro-région lœssique du Kochersberg, au nord-ouest de Strasbourg (Bas-Rhin, Alsace, Grand-Est, France).

MÉTHODOLOGIE

Ce travail vise à étudier l'occupation et l'exploitation d'un milieu lœssique du Néolithique (environ 5600 avant notre ère) jusqu'au XII^e siècle de l'ère commune. Les milieux lœssiques comptent parmi les plus fertiles du monde [3] et sont de ce fait peuplés tôt et intensément [4]. Les problématiques touchant à la répartition des sites archéologiques et plus particulièrement aux stratégies d'implantation sont sensibles à des biais tels que l'état de la recherche archéologique ou les effets de masques ou de destruction des processus post-déposition. Des outils palliant ces biais ont été créés à l'instar de la carte de confiance archéologique dont le

but est d'estimer la fiabilité des corpus en fonction de l'état de la recherche archéologique et de la représentativité des données [5]. Il est cependant nécessaire de disposer d'un outil offrant plus de paramètres explicatifs quant à la répartition des sites que la carte de confiance seule qui ne prend pas en compte les processus post-déposition ainsi que les paramètres ayant une influence sur les stratégies d'implantation. Pour tenter de dépasser ces limites, il est proposé de développer un modèle spatial incluant l'état de la recherche archéologique, les processus post-déposition (érosion et recouvrement) et un paramètre plus social et directement lié aux populations étudiées : l'attractivité potentielle des secteurs [6]. En premier lieu, cette modélisation se fonde sur l'hypothèse que l'état de la recherche, les processus taphonomiques et l'attractivité influencent tous les trois la découverte des vestiges archéologiques. C'est pourquoi l'état de la recherche archéologique et les processus post-déposition sont pris en compte dans la modélisation. Cependant, ce n'est pas sur ces critères que les principaux tests sont effectués, mais sur celui de l'attractivité estimée, puisque le but est de mieux comprendre quelles stratégies d'implantation étaient mises en œuvre par les communautés agricoles du passé. L'hypothèse principale testée dans cet article est que ces communautés s'installaient de façon préférentielle sur les sols les plus fertiles. Ainsi, cette démarche vise à étudier en particulier l'impact de la fertilité des sols sur l'implantation des populations. Pour évaluer la fiabilité du modèle, les résultats sont comparés au corpus archéologique afin de vérifier d'une part que les trois critères considérés influencent bien tous la découverte des vestiges et ensuite de tester l'impact en particulier de la fertilité sur le peuplement. La zone d'étude se situe en Alsace, dans le Bas-Rhin, au nord-ouest de Strasbourg ; il s'agit du placage lœssique du Kochersberg (**fig. 1**).

[1] DJINDJIAN 2011 (notamment le chapitre 17, p. 485-503).

[2] Notamment grâce aux travaux de l'équipe d'Archae-Dyn : OSTIR *et al.* 2008.

[3] CATT 2001.

[4] BAKELS 2009.

[5] OSTIR *et al.* 2008.

[6] Ce critère se retrouve sous plusieurs formes dans la bibliographie traitant des périodes spécifiques, comme par exemple JEUNESSE 1980, PLOUIN & WOLF 1989, CAROZZA *et al.* 2017 et THOMANN 2008 sans cependant n'avoir jamais été testé.

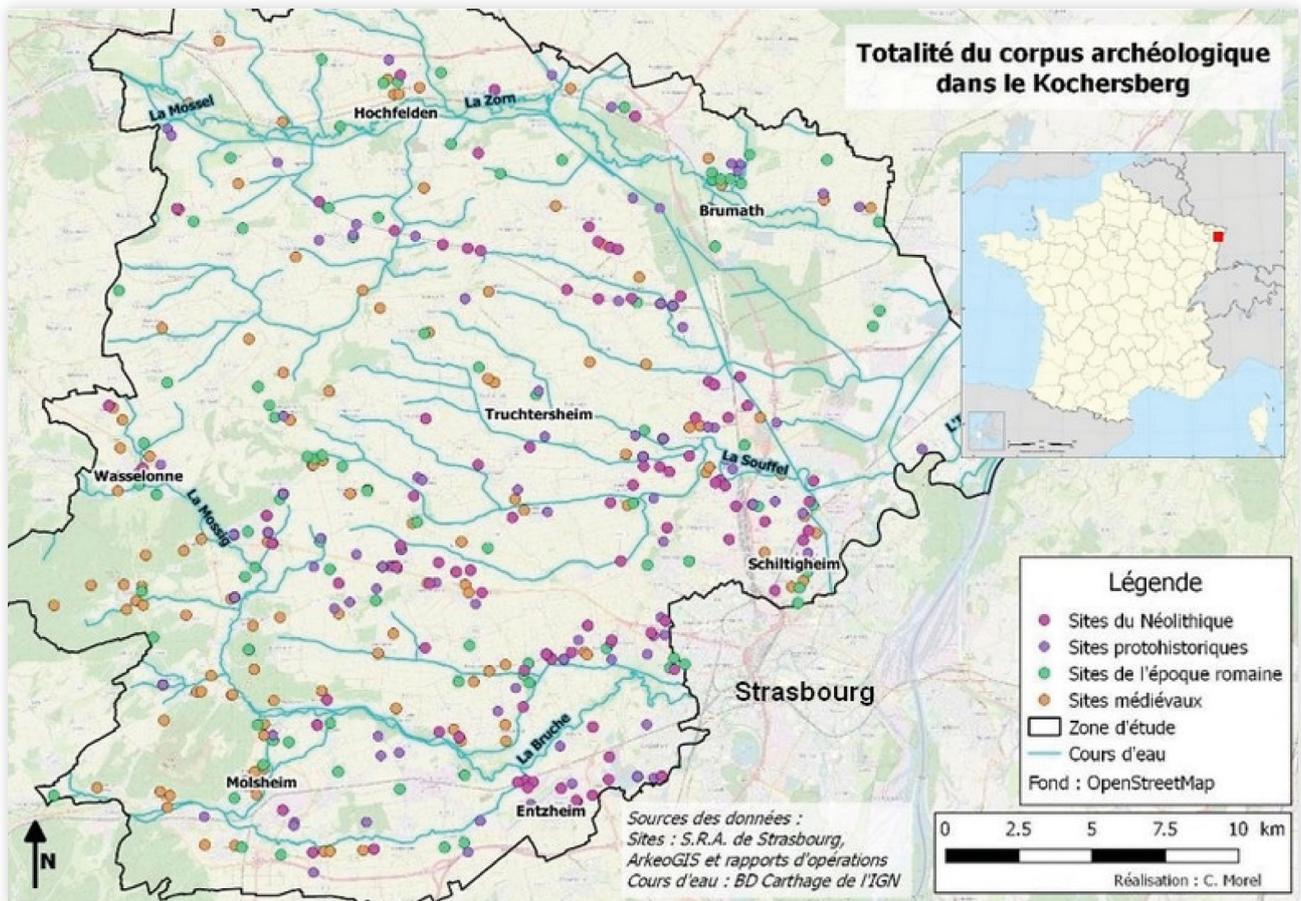


Figure 1 : zone d'étude au sein du Kochersberg et corpus archéologique (DAO : C. Morel).

En détail, cette modélisation prend en compte les données suivantes :

- La totalité de la documentation archéologique de la micro-région étudiée afin d'établir un état de la recherche et de travailler sur les questions de confiance et de fiabilité de la donnée ;

- un modèle numérique de terrain (MNT - réalisé à partir des données de la BD Topo de l'IGN au pas de 25m [7]) qui sert à calculer une carte des formes du paysage afin de travailler sur l'érosion et le recouvrement sédimentaire ;

- la carte pédologique (ici, celle au 1/100000è issue des travaux de l'Association pour la relance agronomique en Alsace - ARAA [8]), utilisée afin de déterminer la fertilité relative d'un sol par rapport à ses voisins à l'aide des caractéristiques physiques et chimiques.

Ces données géoréférencées sont ensuite introduites dans un SIG afin de pouvoir effectuer des opérations sur les données et d'en extraire des informations pertinentes pour le modèle à l'aide d'outils de traitements simples et clef en main. De fait, ces différentes données ne sont généralement pas produites pour l'archéologie et il convient de faire preuve de discernement dans leur utilisation

ainsi que de comprendre leurs limites. Par exemple, la carte des sols de l'ARAA est produite pour et par des agronomes et comporte des informations ayant trait aux sols actuels.

La première étape de la modélisation consiste à fixer les paramètres de l'état de la recherche et des processus sédimentaires à travers des cartes de répartition de ces phénomènes. La carte de l'état de la recherche archéologique est créée au moyen de plusieurs couches vectorielles à partir de toute la documentation archéologique (rapports de prospection, de fouilles mais aussi les diagnostics négatifs) ; chacune représentant l'étendue d'une opération archéologique. Toutes les opérations ont été prises en compte sans considérer leur nature ou leur résultat [9]. Toutes ces couches sont ensuite

[7] Pour plus d'informations sur la BD Topo et les conditions d'accès : https://geoservices.ign.fr/resources_documentaires/Espace_documentaire/BASES_VECTORIELLES/BDTOPO/DC_BDTOPO_3-0.pdf

[8] <http://www.araa-agronomie.org/>

[9] Puisqu'il s'agit ici de cartographier l'état de la recherche, les diagnostics négatifs sont tout aussi utiles que ceux ayant livré des vestiges.

regroupées dans le but d'obtenir une carte répondant à la question « Où les archéologues ont-ils cherché des vestiges ? ». On nomme cette couche la carte de fiabilité.

Ensuite, les processus sédimentaires sont cartographiés. Comment est-il possible de rendre compte de l'érosion et/ou du recouvrement sédimentaire dans une micro-région d'environ 700 kilomètres carrés ? La solution choisie est de procéder à une simplification de ces phénomènes. Pour se faire, on calcule un TPI (Topographic Position Index) à partir du MNT. Cet outil ainsi que le suivant proviennent de la boîte à outils « Topography Tools » pour Arcview dans sa version 1.3 [10]. Cette opération consiste à calculer la position topographique relative d'une cellule par rapport à ses voisines. Le voisinage utilisé est de neuf cellules, soit neuf pixels (ou 25 mètres par cellule) de chaque côté. À partir de ce TPI, il est alors possible de réaliser une classification en forme du paysage à l'aide d'un algorithme de « landform classification » [11]. Cet algorithme permet de classer chaque cellule du raster selon un code de 1 à 10 en fonction de la pente relative avec les cellules avoisinantes. Cela permet ainsi de mieux appréhender la topographie du secteur. Afin de simplifier le modèle, ces dix classes sont regroupées – *via* l'addition de certaines classes dont la topographie est proche – en trois qui correspondent aux positions topographiques suivantes : plaines, pentes ou sommets et fonds de versants ou de vallons. Ces classes correspondent alors à des classes de pentes relatives en fonction de la topographie extra-locale, c'est-à-dire seulement les neuf cellules voisines, et pas à l'échelle de tout le Kochersberg, ce qui permet une meilleure cartographie de phénomènes aussi locaux que l'érosion. Il est alors possible d'attribuer – en fonction des classes de topographie – la valeur de « recouvrables, n'ayant probablement pas subi d'érosion ou de recouvrement sédimentaire majeur » aux zones planes, « érodées » aux zones en pente et aux sommets et « recouverts » aux fonds de vallons. Cette attribution se fonde sur le fonctionnement général des processus

sédimentaires au sein du Kochersberg [12]. On obtient ainsi une carte simplifiée des phénomènes post-déposition.

La troisième carte réalisée est celle de l'attractivité potentielle des secteurs pour les populations étudiées, soit la fertilité dans le cadre de cet article. La fertilité relative est établie à l'aide de la carte des sols de l'ARAA évoquée précédemment. Les caractéristiques présentes pour chaque type de sol de la classification de l'ARAA ont été étudiées afin de déterminer lesquelles pouvaient déjà exister aux époques anciennes, telles que la texture, la réserve utile et les propriétés chimiques du matériau parental. Le but n'était pas tant de pouvoir quantifier la fertilité réelle de chaque sol que de pouvoir attester de la productivité relative de ceux-là, c'est-à-dire leur fertilité par rapport aux sols voisins. Le résultat obtenu est le classement de chaque type de sol dans une classe de productivité : très fertile, moyennement fertile et peu à pas productif.

Les cartes sont ensuite fusionnées les unes aux autres au sein du SIG afin d'obtenir une carte représentant simultanément les trois critères ; l'outil « Union » du logiciel QGIS est utilisé dans ce but [13]. Afin de représenter plus facilement les données, il est choisi d'avoir recours à un système de codes chiffrés ajoutés au sein d'une nouvelle colonne dans la table attributaire du résultat de l'union [14].

Ainsi, les processus post-déposition sont notés de la façon suivante : 100 pour « érodé », 200 pour « recouvert » et 300 pour « moindre impact » ; l'état de la recherche quant à lui est noté ainsi : 010 pour « peu à pas fiable », 020 « moyennement fiable » et 030 « fiable » ; enfin la fertilité relative de cette façon : 001 pour « peu à pas fertile », 002 pour « moyennement fertile » et 003 pour « très fertile ». Cette codification permet de regrouper les trois paramètres du modèle sous un code unique (fig. 2).

Par exemple, le code 200 / 010 / 003 – combiné en 213 – signifie que le secteur a subi un recouvrement sédimentaire, n'a pas été exploré par les archéologues et était probablement très attractif pour les communautés agricoles entre le Néolithique et le XII^e siècle de l'ère commune. Au total, ce sont donc 27 combinaisons qu'il est possible d'obtenir au sein du modèle, de 111 pour une zone érodée, sans recherche archéologique et pas attractive à 333 pour un secteur n'ayant probablement pas subi d'érosion ou de recouvrement sédimentaire, bien connu archéologiquement et potentiellement très attractif. Ces combinaisons sont trop nombreuses pour être cartographiées de façon lisible. C'est pourquoi elles ont été contractées en « additionnant » les trois

[10] JENNESS 2006.

[11] WEISS 2001, JENNESS 2006, MOKARRAM 2015.

[12] ERTLEN *et al.* 2012.

[13] https://docs.qgis.org/2.18/fr/docs/user_manual/processing_algs/qgis/vector_overlay_tools.html

[14] Cela rend le modèle plus simple à mettre en œuvre mais n'est pas indispensable à l'utilisation de l'outil d'union.

Combinaison des critères	Processus post-déposition	Fiabilité de la recherche archéologique	Fertilité relative	Contraction des critères
111	Erosion	Mauvaise	Peu à pas fertile	3
112	Erosion	Mauvaise	Moyennement fertile	4
121	Erosion	Moyenne	Peu à pas fertile	4
211	Sédimentation	Mauvaise	Peu à pas fertile	4
113	Erosion	Mauvaise	Très fertile	5
122	Erosion	Moyenne	Moyennement fertile	5
131	Erosion	Très bonne	Peu à pas fertile	5
212	Sédimentation	Mauvaise	Moyennement fertile	5
221	Sédimentation	Moyenne	Peu à pas fertile	5
311	Moindres	Mauvaise	Peu à pas fertile	5
123	Erosion	Moyenne	Très fertile	6
132	Erosion	Très bonne	Moyennement fertile	6
213	Sédimentation	Mauvaise	Très fertile	6
222	Sédimentation	Moyenne	Moyennement fertile	6
231	Sédimentation	Très bonne	Peu à pas fertile	6
312	Moindres	Mauvaise	Moyennement fertile	6
321	Moindres	Moyenne	Peu à pas fertile	6
133	Erosion	Très bonne	Très fertile	7
223	Sédimentation	Moyenne	Très fertile	7
232	Sédimentation	Très bonne	Moyennement fertile	7
313	Moindres	Mauvaise	Très fertile	7
322	Moindres	Moyenne	Moyennement fertile	7
331	Moindres	Très bonne	Peu à pas fertile	7
233	Sédimentation	Très bonne	Très fertile	8
323	Moindres	Moyenne	Très fertile	8
332	Moindres	Très bonne	Moyennement fertile	8
333	Moindres	Très bonne	Très fertile	9

Figure 2
Classes obtenues au sein du modèle spatial.
(doc : C.Morel).

chiffres ensemble. La combinaison 111 devient alors 3, 123 devient 6, etc. Les combinaisons sont indiquées dans la dernière colonne du tableau présenté en figure 2. Cette opération permet de n'obtenir que sept classes plus cartographiables qui correspondent à des niveaux de probabilité de présence de sites dans le cas où l'hypothèse d'indépendance et de poids équivalent des paramètres du modèle est juste. Ainsi, la comparaison de la carte de la répartition connue [15] des sites archéologiques avec les cartes à sept classes et avec les histogrammes des vingt-sept classes permet d'explorer les différentes hypothèses.

RÉSULTATS

La figure suivante (fig. 3) montre la répartition des sites du Néolithique au XII^e siècle de l'ère commune sur la carte de prédiction de la répartition des sites à sept classes simplifiées. On remarque sur cette carte que les zones aux scores les plus hauts (7 à 9) concentrent la majorité des sites tandis que très

peu de sites ne sont présents dans les zones aux scores les plus bas (3 à 5), ce qui indique que les trois paramètres influencent bien la présence des sites. Néanmoins, il ne semble pas y avoir une répartition linéaire en fonction du score simplifié. Ce constat est confirmé par l'histogramme présentant la densité des sites au km² au sein de chacune des vingt-quatre classes (fig. 4) [16].

On peut alors remarquer que dans la plupart des cas où deux des critères sont dans leur condition jugée la plus favorable (soit un 3) - classes 133, 233, 331, 332 -, la densité des sites est supérieure à la moyenne au sein du Kochersberg. La seule exception est la classe 323. On note aussi que certaines combinaisons sont plus favorables

[15] L'expression « répartition connue » est utilisée par opposition à la répartition réelle des sites qui, elle, est inconnue.

[16] Sur les 27 possibilités théoriques, seules 24 ont été trouvées sur le terrain avec la fertilité relative comme critère d'attractivité potentielle, il y a donc trois classes sans occurrence dans la zone. Il s'agit des classes 113, 213 et 313.

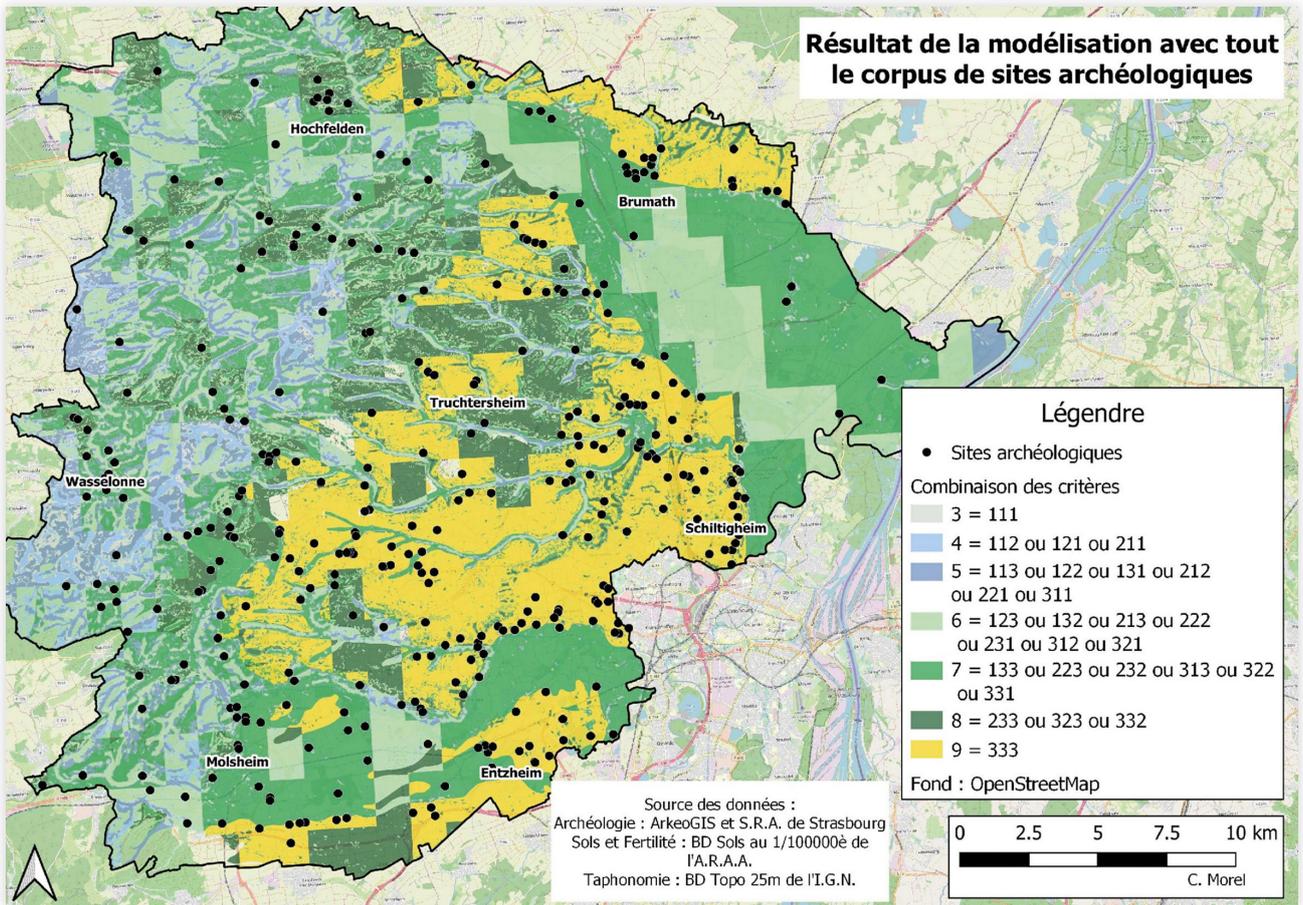


Figure 3
 Carte des sites archéologiques sur les classes obtenues avec le modèle (DAO : C. Morel).

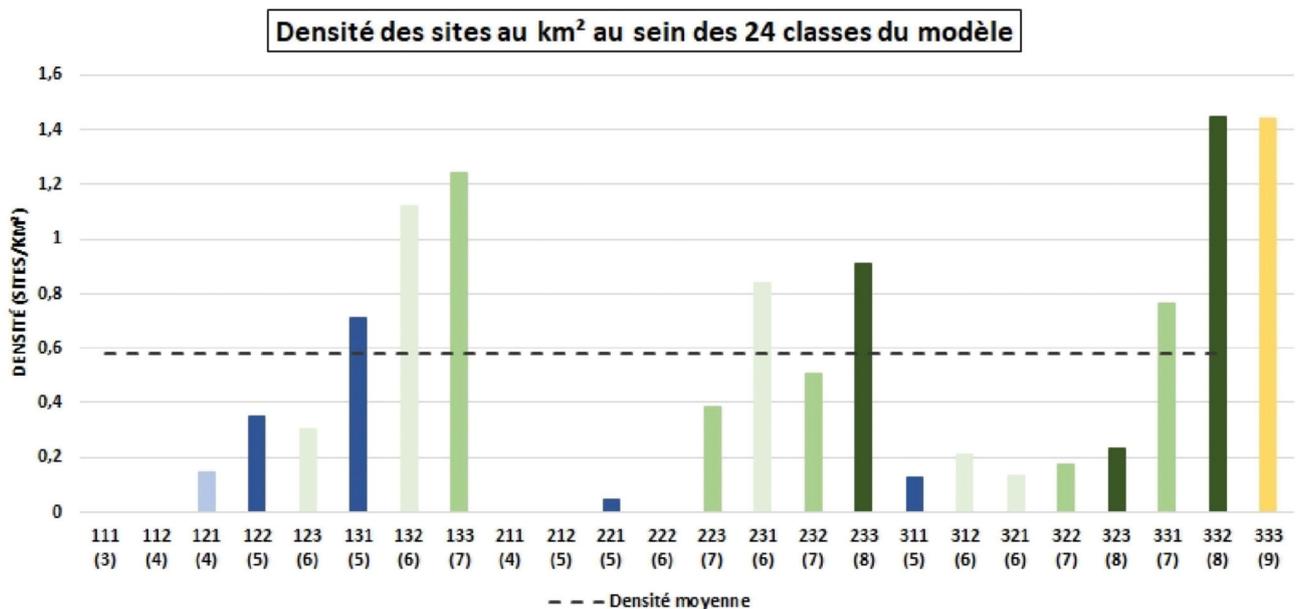


Figure 4
 Histogramme présentant la densité des sites archéologiques au km² au sein des vingt-quatre classes du modèle (doc : C. Morel).

que d'autres malgré un score agrégé plus faible, par exemple la classe 132 (6) qui est plus peuplée que les classes 232 (7), 233 (8) ou encore 331 (7). On ne peut néanmoins pas remarquer de facteur significativement plus impactant que les autres. Ce résultat permet d'affirmer que les trois critères pris en compte influencent bien les chances de découvrir des vestiges, mais qu'ils ne s'avèrent pas indépendants et de même poids relatif à l'échelle du corpus entier. Il apparaît en effet qu'un bon état de la recherche, peu de recouvrement et d'érosion et des sols très fertiles sont des critères nécessaires à la découverte de vestiges dans le Kochersberg, mais que d'autres paramètres impactent la distribution des sites de façon générale.

Une fois cette influence des trois paramètres validée, il est possible d'aller plus loin dans les pistes de réflexion ouvertes grâce à cette modélisation. On peut distinguer les sites de différentes périodes au sein du modèle afin de voir s'il existe des distinctions dans la façon dont les critères influencent la découverte des vestiges de chacun d'entre eux. Afin de pouvoir distinguer clairement si des différences existent entre les périodes, les plus extrêmes du corpus, c'est-à-dire

les sites du Néolithique (c. 5600 – 2200 avant l'ère commune) et du Moyen Âge (du V^e siècle au XII^e siècle de l'ère commune) sont comparés. La carte suivante représente ces deux jeux de données sur le fond résultant de la modélisation (fig. 5).

Visuellement, il semble que les sites médiévaux (en rouge sur la carte) sont moins systématiquement dans les plages favorables que les sites du Néolithique. Ce phénomène est principalement visible dans le sud-ouest du Kochersberg.

La comparaison des histogrammes de répartition (fig. 6) confirme cette tendance : les sites médiévaux occupent un grand nombre de classes et sont présents dans pratiquement toutes les configurations à l'exception quasi-systématique de celles dont le premier chiffre est un 2, soit les classes ayant subi un recouvrement sédimentaire. Dans ces cas-là, il est nécessaire que la recherche archéologique soit très fiable (le second chiffre est un 3) pour que des sites du Moyen Âge soient découverts. Ce constat vis-à-vis du recouvrement sédimentaire est le même pour le Néolithique. Par contre, les sites du Néolithique sont globalement plus présents quand un maximum de critères sont réunis

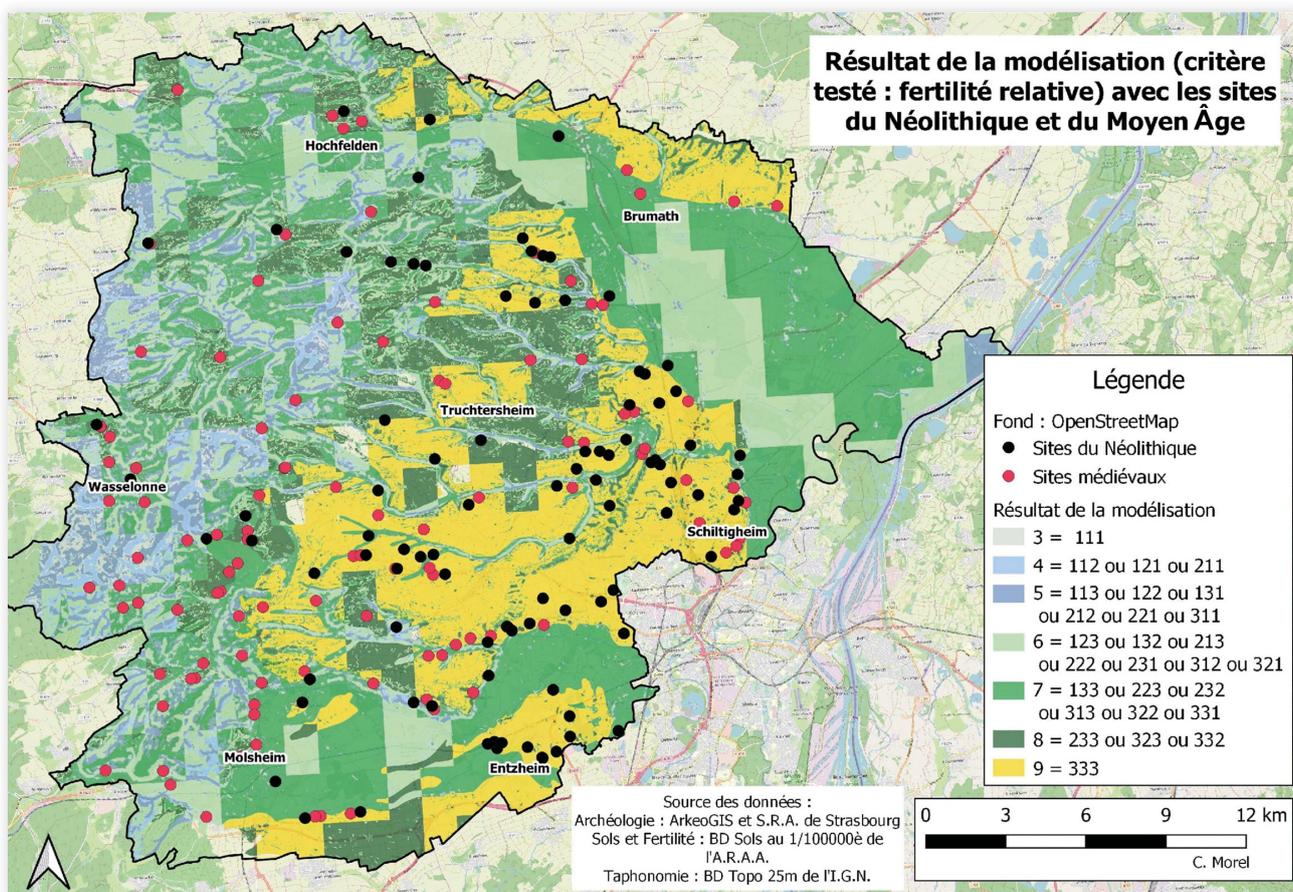


Figure 5
Sites du Néolithique et du Moyen Âge sur les classes du modèle (DAO : C. Morel).

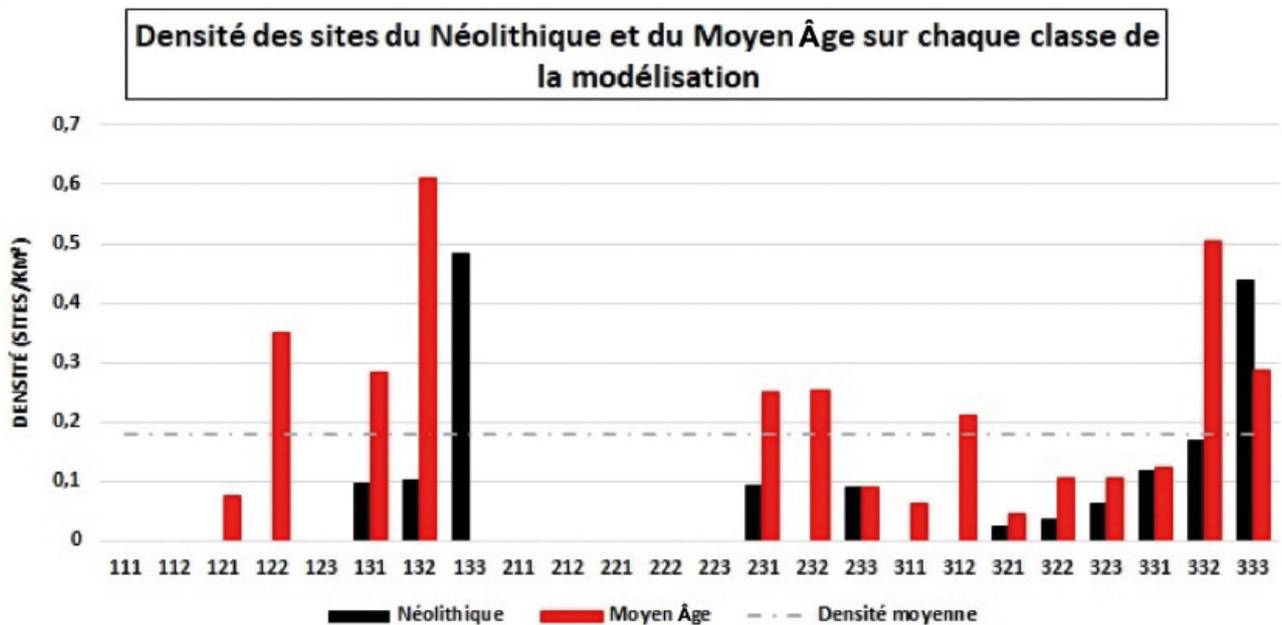


Figure 6

Histogramme des densités de sites néolithiques et médiévaux au km² sur les vingt-quatre classes du modèle (doc : C. Morel).

et assez peu présents dans les deux premiers tiers du diagramme, à l'exception d'un pic au sein de la classe 133, qui signifie de l'érosion, une excellente recherche et les sols les plus fertiles (**fig. 6**). On note également que pour les sites néolithiques, lorsque le couple des deux premiers paramètres est assez bon (32,33), la répartition semble fonction du troisième paramètre (la fertilité).

Il est alors possible d'en déduire que la découverte de vestiges médiévaux est moins dépendante des critères utilisés que celle des sites néolithiques. À quoi cette différence est-elle due ? La découverte de sites médiévaux dépend-elle de la même manière de chaque critère ? Et, plus concrètement, le modèle qui fonctionne bien avec les sites du Néolithique (et avec la totalité du corpus de sites du Kochersberg), est-il mal adapté en ce qui concerne les sites médiévaux ? Cela pousse aussi à s'interroger sur la façon dont le modèle a été construit : aurait-il fallu considérer que l'érosion a moins d'impact que le recouvrement sédimentaire sur les chances de découvrir des sites archéologiques dans le Kochersberg, et donc de noter le recouvrement en 1 et l'érosion en 2 ? Les résultats semblent l'indiquer.

En ce qui concerne l'attractivité des sols les plus fertiles, le modèle montre qu'au Néolithique, ce sont eux qui portent la vaste majorité de l'occupation. Ce résultat vient renforcer l'hypothèse d'une dépendance de l'implantation à la fertilité des sols. Cependant, ce n'est plus le cas au Moyen Âge où la

carte tout comme l'histogramme montre un affranchissement des sites vis-à-vis des sols les plus fertiles. Ce résultat nouveau permet de mettre en avant une mutation – qui a eu lieu entre la fin du Néolithique et environ 450 de l'ère commune – dans les stratégies d'implantation des communautés d'agriculteurs. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer cela : un changement dans les modes agricoles (plus extensifs, avec des habitats aux marges des sols très fertiles ainsi que ces derniers soient totalement libres pour l'agriculture), ou un changement plus large des modes de vie, avec l'utilisation plus large de produits importés par exemple.

DISCUSSION

La modélisation spatiale des trois critères qui, selon l'hypothèse de départ, favorisent le plus la découverte des sites archéologiques, offre un nouvel outil. Ce dernier permet d'attester des conditions les plus favorables – au sein d'un secteur donné – à la découverte des sites archéologiques de différentes périodes. Cela offre un fort potentiel pour la création de modèles prédictifs et en termes de prescriptions archéologiques dans la région, bien qu'il ne s'agisse pas du sujet de cet article. Le modèle permet aussi de réfléchir à la répartition connue des sites, à ses biais, à sa logique, etc. Les simplifications réalisées pour la modélisation sont à la fois

son point fort et ses limites. D'un côté, le modèle est totalement adaptable à n'importe quel secteur à l'aide de données relativement aisées à obtenir (un MNT, les données sur la recherche archéologique et une carte des sols par exemple) et permet l'obtention de résultats rapides. Cet atout n'est pas négligeable puisqu'il permet de rendre plus courante la prise en compte des biais inhérents à l'archéologie. Cependant, ces simplifications peuvent limiter la validité des résultats de la modélisation. En effet, les critères utilisés tels que les processus post-déposition peuvent être très locaux et de ce fait pas toujours aisés à cartographier à l'échelle d'une micro-région comme le Kochersberg. Ces phénomènes extra-locaux peuvent être à l'origine d'anomalies dans les résultats de la modélisation. Cela n'enlève rien à la pertinence du modèle, mais doit être gardé à l'esprit afin de réaliser, le cas échéant, les vérifications locales qui s'imposent. Dans tous les cas, une bonne connaissance du secteur est recommandée avant la mise en place d'une telle modélisation. Les résultats que produit cet outil nécessitent dans tous les cas l'interprétation du chercheur et la vérification des anomalies, voire un ajustement des critères utilisés.

CONCLUSION

Un modèle spatial a été créé afin de mieux comprendre quels critères influencent le plus la capacité des archéologues à mettre au jour les vestiges archéologiques. Cette modélisation prend en compte les processus post-déposition, l'état de la recherche archéologique et l'attractivité potentielle estimée des secteurs. Le résultat de la modélisation prend la forme d'une carte qui montre que ces trois critères jouent un rôle majeur dans la « découvrabilité » des vestiges. Les tests montrent que la capacité des archéologues à découvrir des sites du Néolithique est plus dépendante des trois facteurs que pour les sites du Moyen Âge où l'influence des processus post-déposition mérite d'être nuancée et celle la fertilité relative niée. Cela montre les limites d'un modèle fondé sur la simplification de phénomènes potentiellement très locaux et la nécessité de vérifier sur le terrain tout résultat qui apparaît comme une anomalie. Pouvoir mettre en avant les mutations des stratégies d'implantation grâce à la modélisation permet de construire de nouvelles hypothèses à leur sujet. ■

REMERCIEMENTS

Le modèle a été construit à l'aide de Damien Ertlen et de Pierre-Alexis Herrault, du Laboratoire Image, Ville et Environnement (UMR 7362) que je remercie ici.

BIBLIOGRAPHIE

- ARAA** s. d. « À propos de l'ARAA ». ARAA. Consulté le 16 mars 2020. <http://www.araa-agronomie.org/>.
- BAKELS, Corrie C., 2009**, *The Western European Loess Belt*, Leiden.
- CAROZZA, Laurent (éd.), 2017**. *L'habitat et l'occupation des sols à l'âge du Bronze et au début du premier âge du Fer*, Paris (Recherches archéologiques 12).
- CATT, John A., 2001**, « The agricultural importance of loess », *Earth-Science Reviews* 54/1, p. 213-229.
- DJINDJIAN, François, 2011**, *Manuel d'archéologie*, Paris (Collection U Archéologie).
- ERTLEN, Damien, GEBHARDT, Anne, SCHNEIDER, Nathalie, DURAND, Frédérique, THOMAS, Yohann, MICHLER, Matthieu, SCHNEIKERT, François, BOËS, Eric, & SCHWARTZ, Dominique, 2012**, « Antropisation et érosion agraire dans un paysage loessique (Bas-Rhin, France) », dans Frédérique Bertoncello & Frank Bremer (dir.), *Variabilités environnementales, mutations sociales : nature, intensités, échelles et temporalités des changements, XXII^e rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, 20-22 octobre 2011*, Antibes, p. 85-92.
- JENNESS, Jeff, 2006**, *Topographic position index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x*, (version 1.3a), Jenness Enterprises.

- JEUNESSE, Christian, 1980**, « Le peuplement rubané de Basse-Alsace : aspects géographiques », dans *Le Rubané d'Alsace et de Lorraine : état des recherches 1979*, Association d'études préhistoriques et protohistoriques d'Alsace, Strasbourg, p. 85-101.
- MOKARRAM, Marzieh, GHOLAMREZA, Roshan & SAEED, Negahban. 2015**, « Landform Classification Using Topography Position Index (Case Study: Salt Dome of Korsia-Darab Plain, Iran) », *Modeling Earth Systems and Environment*, 1/4, <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0055-9>.
- OSTIR, Kristof, KOKALJ, Ziga, SALIGNY, Laure, TOLLE, Florian, & NUNINGER, Laure, 2008**, « Confidence maps : a tool to evaluate archaeological data's relevance in spatial analysis », dans Axel Posluschny, Karsten Lambert & Irmela Herzog (éd.), *Layers of Perception, Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, Berlin 2-6 April 2007*, Berlin, p. 272-277.
- QGIS**, s. d., « Recouvrement de vecteur », Consulté le 7 avril 2020. https://docs.qgis.org/2.18/fr/docs/user_manual/processing_algs/qgis/vector_overlay_tools.html.
- THOMANN, Marcel, 2008**, « Le Kochersberg au Haut Moyen Âge, recherches, thèses et hypothèses », *Revue d'Alsace* 138, p. 79-127.
- WEISS, Andrew, 2001**, « Topographic position and land-form analysis.pdf », Poster, Seattle.
- WOLF, Jean-Jacques, 1989**, « La Tène en Alsace : 450-50 av. J.-C. », dans Suzanne Plouin (éd.), *L'Alsace celtique : 20 ans de recherches : Musée d'Unterlinden du 21 novembre 1989 au 18 février 1990, Musée historique de Haguenau du 3 mars au 28 mai 1990, Musée historique de Mulhouse du 15 juin au 28 octobre 1990*, Colmar, p. 94-100.

SPATIALISATION DES DÉCOUVERTES, MODÉLISATION DU PASSÉ. L'INFORMATIQUE AU SERVICE DE L'ARCHÉOLOGIE

Lizzie SCHOLTUS^{1,*}

¹ UMR 7044 Archimède

* l.scholtus@unistra.fr

RÉSUMÉ

Le développement de l'informatique en archéologie permet aujourd'hui de réfléchir sur de grandes quantités de données disparates. Nous proposons ici une modélisation statistique, à travers l'étude du petit mobilier, pour mettre en évidence des groupes régionaux dans l'est de la Gaule à La Tène D1 (150 à 75 av. J.-C.). Cette méthode se fonde sur la division de la zone

d'étude en une grille et le calcul pour chacune de ses mailles d'un profil typologique. Cet article présente les différentes étapes de cette modélisation ainsi que les premiers résultats d'un travail en cours.

MOTS-CLÉS

Groupes régionaux, informatique, modélisation, Gaule de l'Est, La Tène, logiciel R.

The development of computer science in archaeology allows to manage large quantities of disparate data. We propose here a statistical based on the study of small artefacts, in order to highlight regional groups in eastern Gaul during La Tène D1 (150 to 75 BC). This method is based on dividing the study area into a grid and calculating a typological profile for each of its cells. This article presents the different steps of this modelling, as well as the first results of a work in progress.

KEYWORDS

Regional groups, informatics, modelling, Eastern Gaul, La Tène, R software.

Article accepté après évaluation par deux experts selon le principe du double anonymat

L'archéologie produit de plus en plus de données, en particulier depuis le développement de l'archéologie préventive à partir des années 1980. Il devient dès lors compliqué d'analyser manuellement cette grande quantité d'informations et l'utilisation de l'informatique se généralise donc par nécessité.

Par ailleurs, ces données prennent de multiples formes : bases de données, catalogues et inventaires d'objets, rapports de fouilles, monographies papier, sites internet, SIG, etc. Il apparaît alors capital de recourir aux techniques informatiques pour inventorier, normaliser et classifier ces variables disparates. Toutefois, ces outils ne sont pas simplement utilisés afin de visualiser plus facilement les données archéologiques, mais aussi pour les manipuler et les analyser statistiquement.

Ainsi, l'utilisation de ces nouveaux outils, dans le domaine de la recherche archéologique, implique de revoir la manière de traiter l'information, en cherchant des solutions dans d'autres disciplines. De cette manière, la diffusion de l'archéomatique, c'est-à-dire l'informatique appliquée à l'archéologie, nous permet d'appliquer une approche quantitative et de nouveaux modèles aux données archéologiques. Il est désormais possible de mettre à profit ces modèles sur de grandes quantités de données archéologiques spatialisées, et ainsi de les interroger statistiquement pour tenter de modéliser les sociétés du passé.

La méthode développée dans cet article a pour objectif d'étudier la répartition spatiale et la densité de différents types d'objets archéologiques pour déterminer, à l'aide d'outils d'analyses statistiques, des assemblages récurrents. Il s'agit de vérifier s'il existe des différences géographiques permettant de définir des groupes. Cette étude se détache de la recherche traditionnelle en appliquant des méthodes informatiques et statistiques sur les grandes quantités de variables disparates que constituent aujourd'hui les données archéologiques. La modélisation qui en découle, grâce à son informatisation, peut être appliquée sur différents jeux de données, facilitant la multiplication des analyses sur différentes catégories d'objets.

OBJECTIFS ET PROBLÉMATIQUES

Les objectifs de cette étude, centrée sur la Gaule de l'Est entre le III^e siècle av. et le IV^e siècle ap. J.-C., sont multiples. Le premier est de vérifier s'il est possible de déterminer des groupes régionaux en fonction de la répartition spatiale du petit mobilier, et plus particulièrement, par rapport aux différents assemblages de types et sous-types de l'*instrumentum*. Ce sont les objets issus de la vie quotidienne, non céramiques, et qui regroupent de nombreuses catégories ou fonctions [1]. L'idée poursuivie est de modéliser des groupes régionaux pour lesquels une culture matérielle similaire peut être observée, en fonction de la densité typologique du mobilier.

Le deuxième objectif est de prendre en considération de grandes quantités d'objets et de catégories, et non simplement quelques centaines d'individus au sein d'une typologie unique, comme cela se pratique généralement dans ce type d'analyses [2]. Ainsi, cette étude s'appuie sur une démarche classique de l'archéologie consistant à utiliser la répartition des types d'objets dans l'espace [3], afin d'identifier des groupes. Toutefois, là où les études classiques prennent en considération la présence ou l'absence de l'un ou l'autre type [4], ce travail a pour ambition d'observer plus largement la culture matérielle et de se concentrer sur les assemblages de mobiliers. De plus, le recours aux outils informatiques offre la possibilité de multiplier les types d'objets observés, mais aussi les tests et les analyses, afin d'examiner l'incidence de ces différents objets sur la détermination des groupes régionaux. L'idée est aussi d'intégrer à ce type de recherches les informations accessibles grâce à la numérisation

[1] BERTHON *et al.* 2013; ROUX 2013, p. 44.

[2] Voir, par exemple, les cartes de répartition chez FEUGÈRE 1985; WAGNER 2006; ROTH-ZEHNER 2010.

[3] COLLIS 2003.

[4] DJINDJIAN 2017, p. 430.

[5] BERNARD [s. d.]; BUCHSENSCHUTZ & GRUEL [s. d.]; FEUGÈRE [s. d.]. Entre autres.

d'une partie des données archéologiques, maintenant disponibles en ligne [5].

Enfin, le troisième objectif est de mettre en place une méthode de travail qui puisse être facilement reproductible et réutilisable pour d'autres types de mobiliers et d'autres ères chronologiques et/ou géographiques.

L'objet est porteur de sens par sa typologie, sa chronologie, sa fonction, son origine et son contexte de découverte. Il s'agit donc de recourir à toutes ces informations, combinées à l'outil informatique et aux possibilités statistiques qu'il offre, pour ouvrir et tester un nouveau champ d'hypothèses et de réflexions à travers la modélisation. Il est alors possible de synthétiser de grandes quantités de variables et, par là même, rendre perceptibles des phénomènes qu'il n'aurait pas été possible d'analyser sans cet outil.

Pour ce faire, le logiciel libre R sera utilisé. Ce logiciel s'appuie sur un langage orienté vers le traitement de données et l'analyse statistique. Il offre l'avantage d'être flexible puisqu'il fonctionne avec son propre langage de programmation, permettant à l'utilisateur de manipuler ses fonctionnalités à l'aide de lignes de code. De plus, les différentes opérations effectuées sur les données sont consignées au sein de scripts, facilitant ainsi leur automatisation et leur reproductibilité [6].

Avant de présenter les différentes étapes de la méthode, il semble important de garder à l'esprit les difficultés inhérentes à l'utilisation de grandes quantités de données. En effet, la qualité de l'information utilisée ne sera pas identique pour tous les objets inventoriés. Elle est dépendante des sources dont elle provient et il n'est pas toujours possible ni pratique de revenir à l'objet en lui-même lorsque l'on prend en compte plusieurs milliers d'artefacts. Il est donc nécessaire de sélectionner en amont les informations que l'on peut intégrer au corpus, et surtout celles qui sont interrogeables [7]. Quels que soient les éléments sélectionnés, la donnée archéologique, par nature, est invariablement partielle. Cela signifie qu'il faut forcément effectuer une homogénéisation des données, que ce soit d'un point de vue chronologique ou typologique [8].

LA MÉTHODE

La méthode mise en place pour identifier ces groupes s'appuie en particulier sur les travaux d'O. Nakoinz, qui emploie pour la culture de l'Hunsrück-Eifel, au Hallstatt (800 à 500 av. J.-C.) en Allemagne, une analyse automatisée des regroupements de profils typologiques « Typenspektrum » à

l'aide de dendrogrammes hiérarchiques et de *cluster analysis* [9].

La détermination de ces groupes, à travers la culture matérielle, a logiquement pour point de départ les cartes de répartition des différents mobiliers pris en compte, superposées les unes sur les autres (fig. 1, n° 1).

L'étape suivante (fig. 1, n° 2) consiste à effectuer un échantillonnage régulier de cet ensemble de données, afin de limiter l'impact de la distribution inégale du mobilier et du poids des sites importants et mieux connus. La taille de cet échantillonnage est fixée à une grille d'environ deux-cents mailles. Celles-ci mesurent ainsi environ 40 km de côté et couvrent une surface suffisamment large pour inclure plusieurs sites, mais suffisamment petite pour ne pas prendre en considération un nombre trop important de sites. Il s'agit ici d'éviter une analyse trop fine, qui aboutirait à une interprétation plus hiérarchique des sites, et une échelle trop large, qui masquerait leurs différences, mais bien de sélectionner un sous-ensemble qui soit le plus représentatif possible de l'ensemble des données [10]. Ensuite, un calcul de l'estimation par noyau (ou *Kernel density*) est réalisé pour chaque type et sous-type des deux cents échantillons. Il s'agit d'observer la densité de chaque type et sous-type, et non leur distribution réelle. Pour cette analyse, le noyau est fixé au centre de la maille et une courbe gaussienne est utilisée en paramètre de lissage. Ce dernier point interpole donc des données là où elles manquent, en fonction de celles présentes à proximité, et permet de pallier le problème de la représentativité des données d'un corpus déséquilibré par l'état de la recherche et la nature même des informations archéologiques [11].

Par la suite, pour chaque échantillon, un profil typologique est calculé (fig. 1, n° 3), illustrant la densité typologique de chaque maille de la carte. Il s'agit d'une sorte de code-barre (fig. 2) ou « empreinte digitale » [12] caractéristique d'un site, d'une région, d'une période ou de toute autre entité. Pour préparer les données à l'analyse par grappe qui va suivre, ces profils sont consignés au sein d'une matrice (fig. 1, n° 4) reprenant l'estimation de noyau de chaque type ou sous-type présent dans chaque échantillon.

[6] BARNIER 2013, p. 6 ; NAKOINZ & KNITTER 2016, p. 45.

[7] BERNARD 2014, p. 78.

[8] DJINDJIAN 2005, p. 41.

[9] NAKOINZ 2005.

[10] MARCHAL 2018, p. 12.

[11] CONLEN [s. d.] ; NAKOINZ 2010, p. 323 ; NAKOINZ 2013, p. 180.

[12] NAKOINZ 2014.

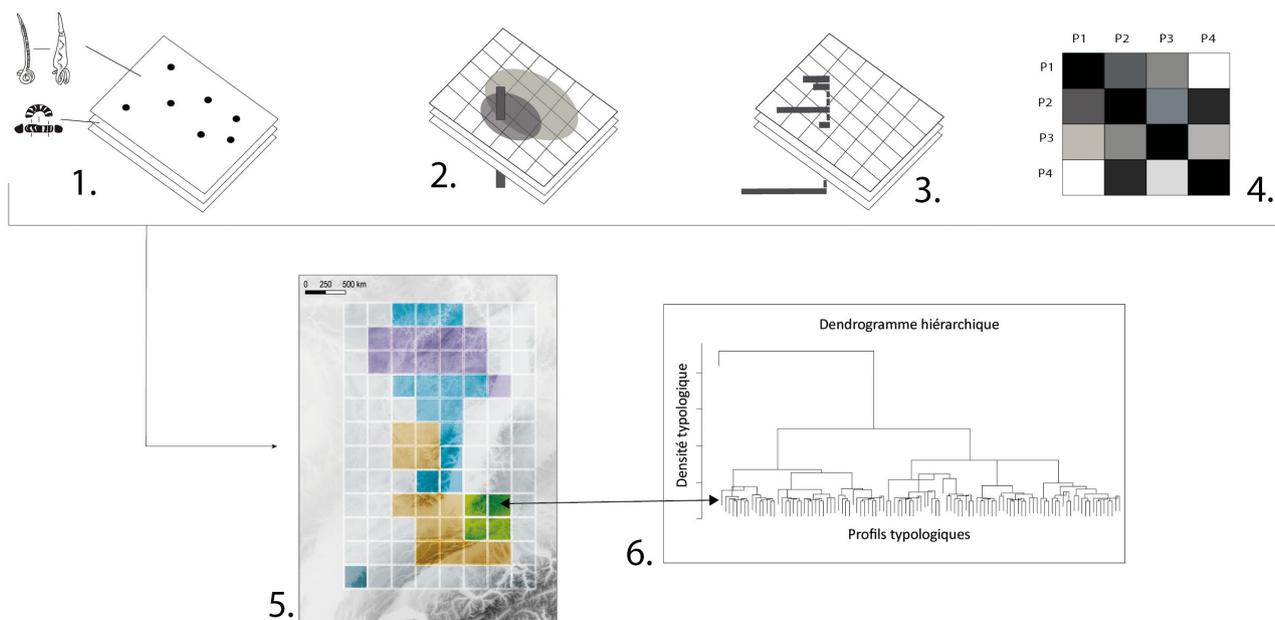


Figure 1 : modèle théorique de la méthode.

1. Superposition des cartes de répartition de mobilier ; 2. Calcul de l'estimation par noyau ; 3. Création des profils typologiques ; 4. Matrice de dissimilitude ; 5. Calcul et projection des *clusters* ; 6. Dendrogramme hiérarchique.

DAO : L. Scholtus (d'après TREMBLAY CORMIER *et al.* 2017).

Pour finir, les mailles sont regroupées au sein de groupes (*clusters*) en fonction de la similarité de leur densité typologique à l'aide de l'algorithme de partitionnement des K-médoïdes qui prend en considération la distance entre tous les points d'une classe et le point central de la même classe pour déterminer des groupes dans le jeu de données [13]. La distance utilisée pour ce calcul est la distance euclidienne puisque l'on considère que les mailles et les assemblages typologiques qu'elles contiennent sont assimilés à des entités géographiques [14]. Le résultat est projeté sur une carte (fig. 1, n° 5), et un dendrogramme hiérarchique peut être utilisé pour vérifier la composition de ces groupes (fig. 1, n° 6).

Les profils typologiques sont un aspect central de cette méthode, puisqu'ils sont le point de départ des comparaisons entre les mailles et leur regroupement. Tout élément peut être pris en compte pour construire ces profils, mais le mobilier reste généralement une source considérable de données en archéologie [15]. Toutefois, pour que ces profils soient le plus

représentatifs possible, il est important d'utiliser le plus de types de données et, présentant de nombreux niveaux de similarités qui vont permettre de les regrouper. C'est pourquoi ces profils sont construits autour des informations typologiques. De cette manière, ils ont l'avantage de considérer tous les objets pour lesquels un type est connu, de la typologie la plus précise au type générique, même si le contexte de découverte n'est pas détaillé. Les seules informations nécessaires pour pouvoir intégrer un objet au sein de l'étude sont donc sa typologie et sa géolocalisation. Cela signifie que la mention d'un artefact, sans la moindre précision typologique autre que sa catégorie fonctionnelle, ne pourra être examinée.

D'autre part, dans ces profils, la quantité d'objets d'un même type, sur un même site, est également prise en compte. On ne se fonde pas uniquement sur le rapport présence/absence d'un type de fait sur un site, mais bien sur la représentativité du type au sein du groupe matériel étudié. De plus, ils sont construits grâce à un « code typologique » permettant de rassembler les sous-types dans le décompte du type global [16]. Ainsi, l'histogramme issu de la création de ces profils typologiques (fig. 2) se compose de barres représentant la quantité totale d'un type d'objet donné, suivies de barres plus petites illustrant les sous-types de ce même type. Cela signifie par exemple, qu'à l'intérieur d'une même maille, une fibule de Nauheim de type Striwe 1996 A1, sera prise en compte dans la quantité

[13] MAECHLER *et al.* 2018 ; MAECHLER *et al.* 2019 ; MAECHLER & STUDER [s. d.].

[14] TREMBLAY CORMIER 2013, p. 311 ; NAKOINZ 2014, p. 193.

[15] TREMBLAY CORMIER *et al.* 2017.

[16] NAKOINZ 2013, p. 156.

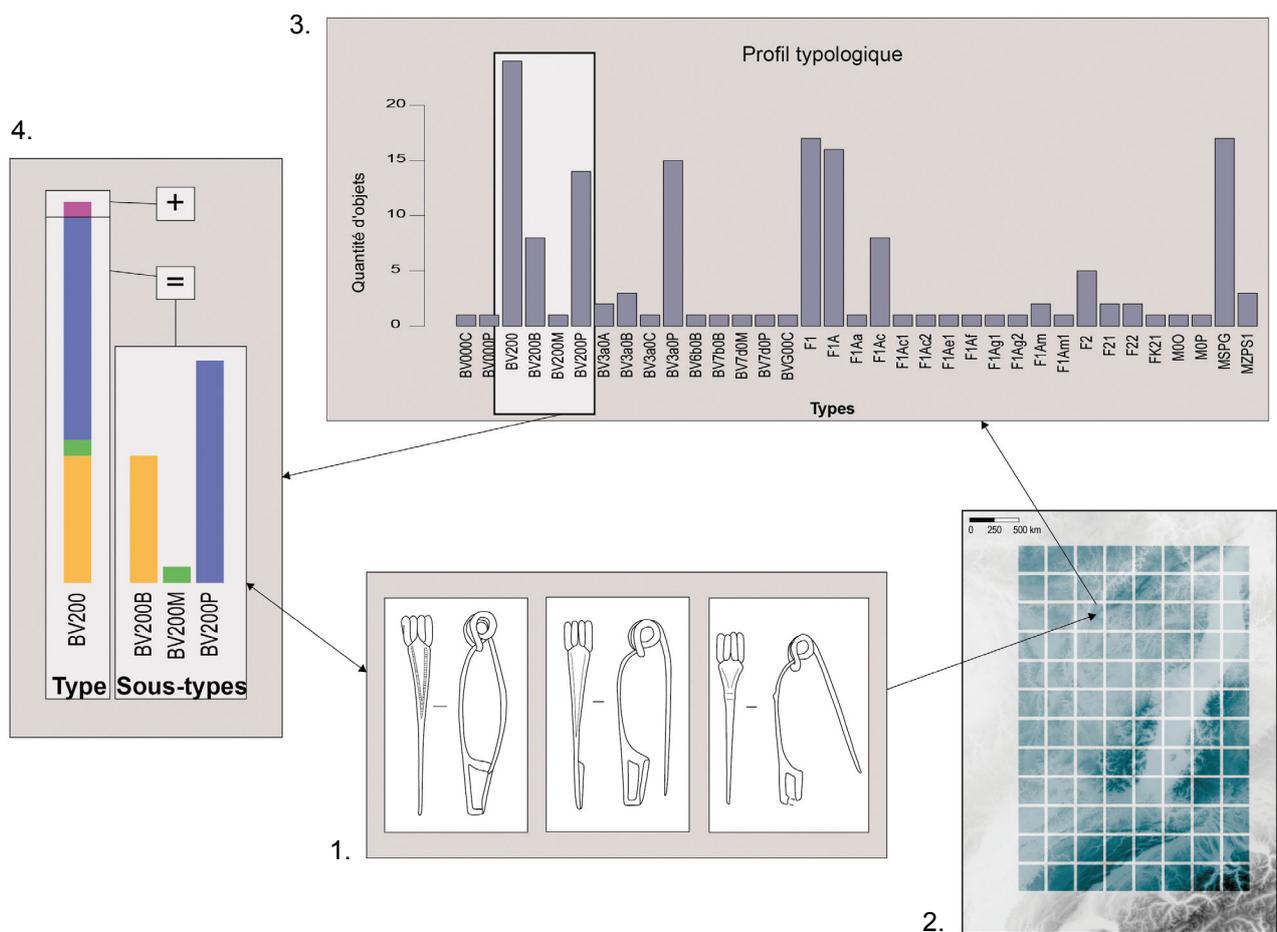


Figure 2 : fonctionnement des profils typologiques.

1. Exemple d'objets mis au jour dans la maille considérée ;
 2. Localisation de la maille dans la zone d'étude ;
 3. Profil typologique créé à partir du mobilier mis au jour dans la maille considérée ;
 4. Illustration du fonctionnement hiérarchique parent/enfants au sein du profil typologique.
- DAO : L. Scholtus.

de fibules de type Striwe 1996 A et dans la somme de fibules de Nauheim de la même maille.

Ce système hiérarchique, de forme parent/enfants, permet de lisser l'état des connaissances des données utilisées en augmentant la part d'objets définis par un type parent [17], par rapport aux types enfants [18] qui sont généralement moins bien renseignés dans la littérature. Cela est important parce qu'il permet de comparer des données pour lesquelles ni la qualité ni le nombre d'informations ne sont similaires, et cela, sans avoir forcément à retourner à l'objet lui-même.

L'utilisation des typologies dans la création de ces profils pose aussi la question de la gestion de cette

information, d'autant plus lorsqu'il existe plusieurs typologies pour une même catégorie d'objet à la même période. Cette réflexion ne sera pas développée ici puisqu'elle fait déjà l'objet d'un article [19].

PRÉSENTATION DES DONNÉES

À l'heure actuelle, l'inventaire se compose d'environ vingt mille objets d'*instrumentum*, datés entre le III^e siècle av. et le IV^e siècle ap. J.-C. (fig. 3). Dans le cadre de cette étude, étant donné l'importance de ce corpus, la datation de chaque objet en fonction de son contexte de découverte précis présentait une entreprise bien trop importante, c'est pourquoi il a été décidé de ne se fonder que sur les datations apportées par les typologies, même s'il est évident que cela induit des périodes de circulation bien plus larges que la datation réelle de ces objets. Pour les mêmes raisons, les ensembles clos n'ont pas été déterminés. Par ailleurs, la prise

[17] Comme le type des fibules de Nauheim, pour garder le même exemple que précédemment.

[18] C'est-à-dire les sous-types issus du type parent, comme le type Striwe 1996 A1 ou A2, toujours selon le même exemple.

[19] SCHOLTUS (à paraître).

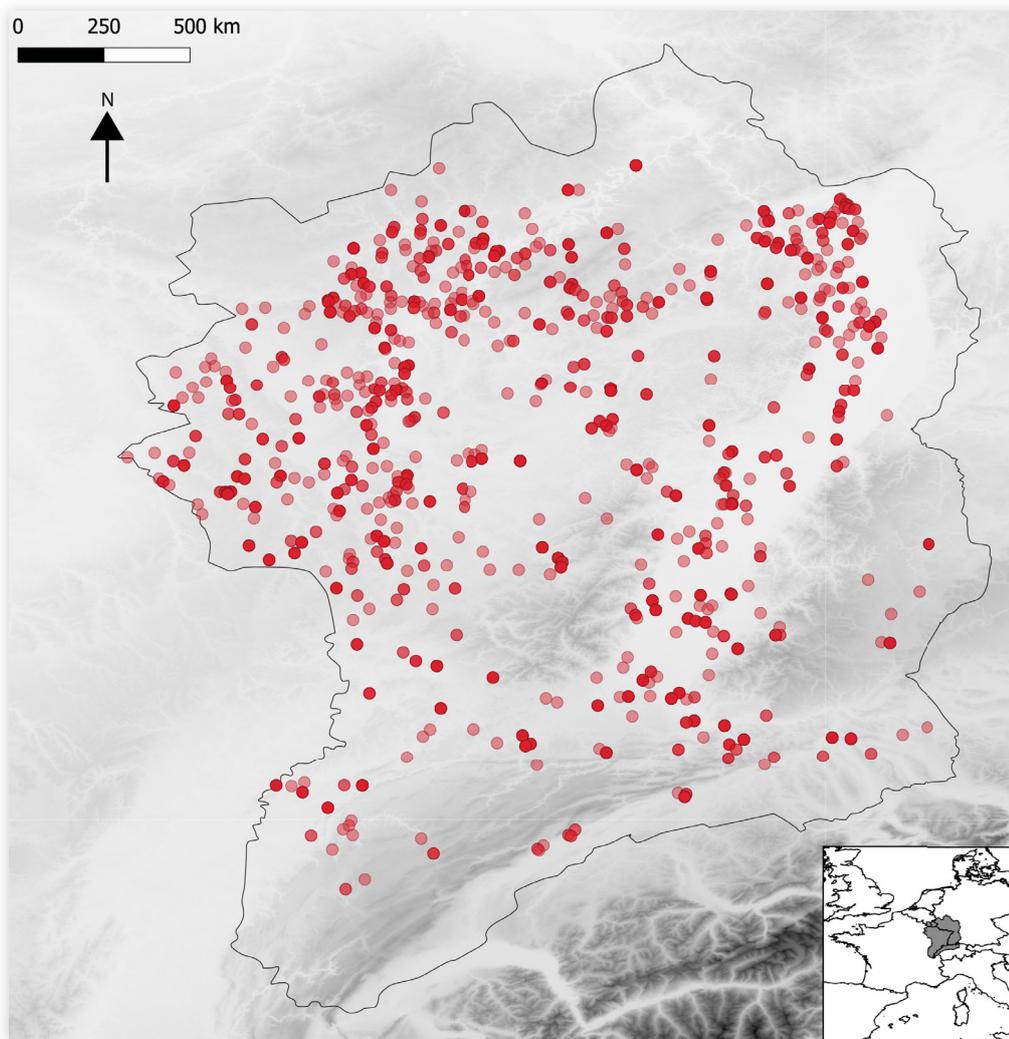


Figure 3
 Carte de localisation de la zone d'étude et répartition du mobilier inventorié à ce jour.
 DAO : L. Scholtus. Fond orographique : données SRTM DEM Version 4 (<http://srtm.csi.cgiar.org>), localisation de la zone d'étude : fond OpenStreetMap.

en compte de ces ensembles clos semblait biaiser l'analyse, puisque cela implique de ne prendre en considération que les tombes et les dépôts, privant l'étude d'un grand nombre de contextes différents.

Ce corpus est divisé en dix-huit phases chronologiques, correspondant aux découpages archéologiques de La Tène moyenne et finale pour la période celtique [20], et à des demi-siècles pour l'époque romaine à partir du changement d'ère. Ce travail étant en cours, ne seront présentés ici que les résultats obtenus pour La Tène D1a [21], pour laquelle l'inventaire est assez conséquent et contient différentes catégories d'objets, répartis sur l'ensemble de la zone d'étude.

Cette période recense environ 14 000 marqueurs, correspondant à 62 perles divisées en 33 types, 829 bracelets divisés en 32 types, 907 fibules divisées en 146 types et 12 138 monnaies divisées en 89 types (fig. 4). La majorité des types de marqueurs pris en compte dans ce corpus est composée d'éléments de parure, généralement considérés comme des marqueurs culturels [22]. On peut également noter une part importante, en quantité d'objets, de monnaies au

sein de ce corpus, apportant un marqueur économique à la caractérisation des groupes régionaux [23]. Cet article ayant pour objectif de présenter la méthode mise en place et les premiers résultats issus de son application, ne seront développés ici que des exemples de mise en évidence de groupes régionaux à partir de l'exemple des fibules. Ces objets présentent un nombre assez important d'individus, des types variés et une dispersion géographique assez étendue pour tester cette méthode.

[20] Ce découpage correspond à des périodes de 25 à 50 ans entre 260 et 52 av. J.-C. selon la chronologie établie dans BARRAL & FICHTL 2012.

[21] C'est-à-dire 150 à 125 av. J.-C.

[22] MILLET 2012.

[23] L'idée, quant à la variété de ces marqueurs, est de pouvoir tester la mise en place des groupes qu'ils permettent de lire, en jouant avec leur présence ou non au sein de l'analyse. En d'autres mots, est-ce que l'utilisation des monnaies lors de l'application de la méthode modifie les groupes déterminés par les éléments de parure? Ce questionnement, en cours d'analyse, ne sera pas développé ici.

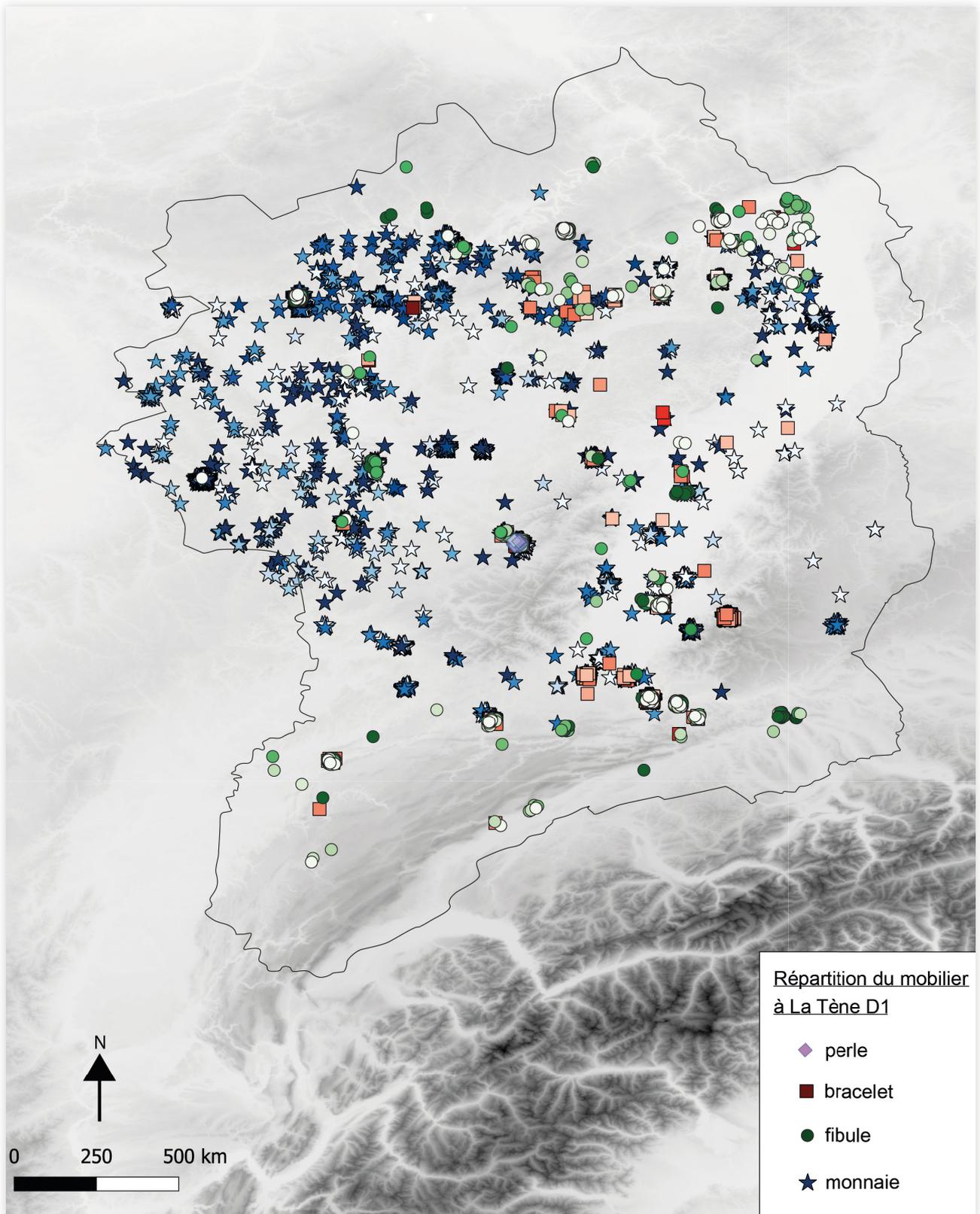


Figure 4

Carte de répartition des différents types (couleurs) selon les catégories (formes) de mobilier pour la période de LTD1a.
 DAO : L. Scholtus. Fond orographique : données SRTM DEM Version 4 (<http://srtm.csi.cgiar.org>).

RÉSULTATS

La méthode traditionnelle pour mettre en exergue des groupes régionaux consiste à déterminer des aires englobant la répartition géographique de chaque type de mobilier étudié. Le résultat obtenu, selon ce principe et avec les données utilisées (**fig. 5**), est difficilement lisible. On peut discerner une division en quart de la zone d'étude et quelques espaces qui semblent se distinguer du reste, mais ce n'est pas une observation claire au premier abord. Si l'on prend en considération la distribution effective du mobilier utilisé pour produire cette carte, il apparaît que de nombreuses zones ne sont pas renseignées par du mobilier, mais simplement par l'aire de répartition d'autres objets plus éloignés [24]. Cet élément complexifie et fausse la lecture de cette carte.

Il paraît alors évident que cette méthode ne peut fonctionner pour de grandes quantités d'objets, ses limites étant déjà atteintes avec moins de mille fibules, en raison de la multitude de types et sous-types pris en compte.

Par ailleurs, lorsque l'on observe la répartition des différents types de fibules par site sur le graphique (**fig. 6**), un certain nombre d'éléments apparaît, alors qu'ils n'étaient pas perceptibles sur la carte de répartition précédente (**fig. 5**).

Premièrement, on remarque qu'un certain nombre de types de fibules est présent sur l'ensemble des sites de la zone d'étude (**fig. 6**, cadre jaune pâle). Il

[24] C'est le cas en particulier pour les extrémités ouest et est de la zone d'étude.

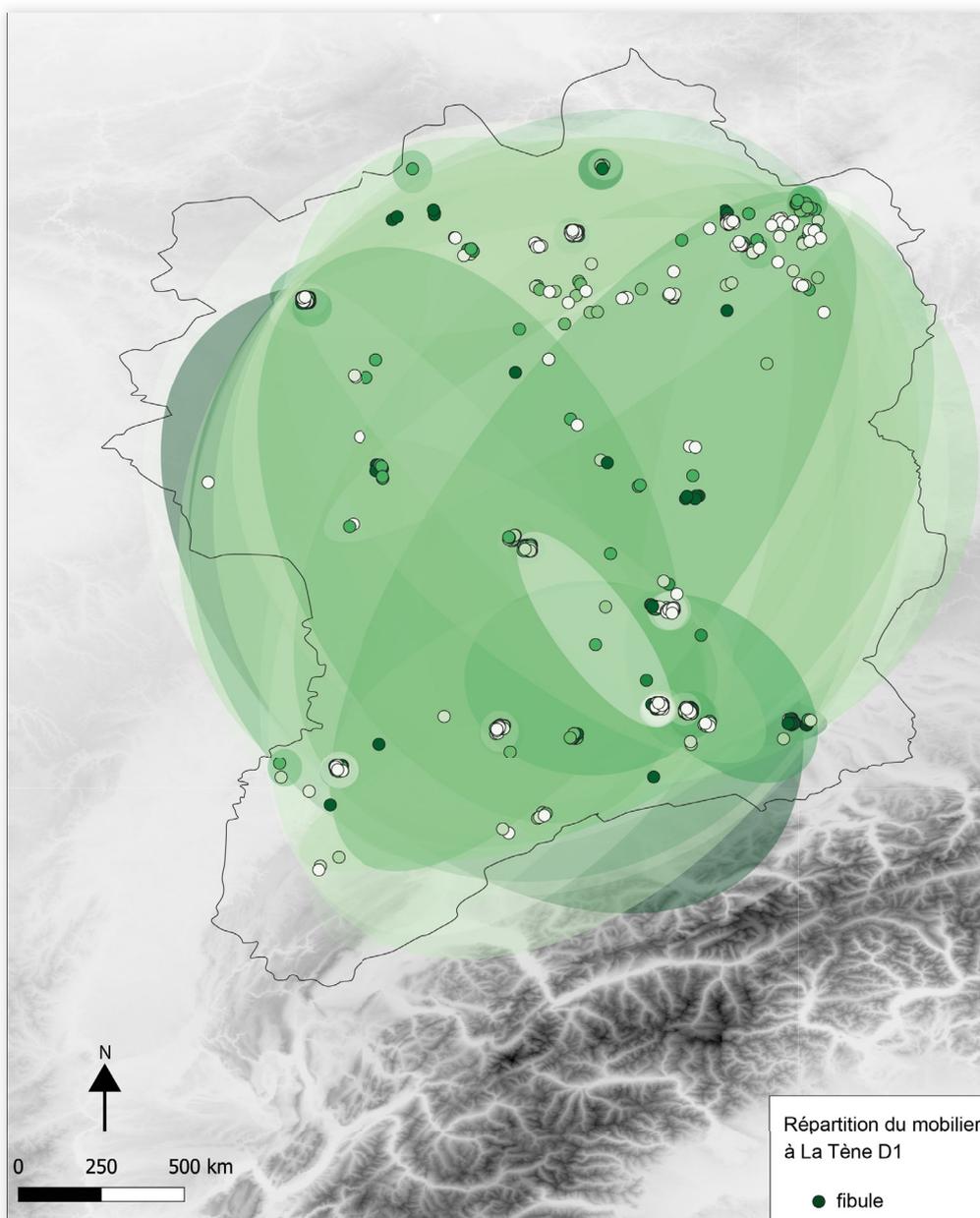


Figure 5 : carte de groupes régionaux, en couleur, en fonction des types de fibules à LTD1a selon la méthode traditionnelle.

DAO : L. Scholtus. Fond orographique : données SRTM DEM Version 4 (<http://srtm.csi.cgiar.org>).

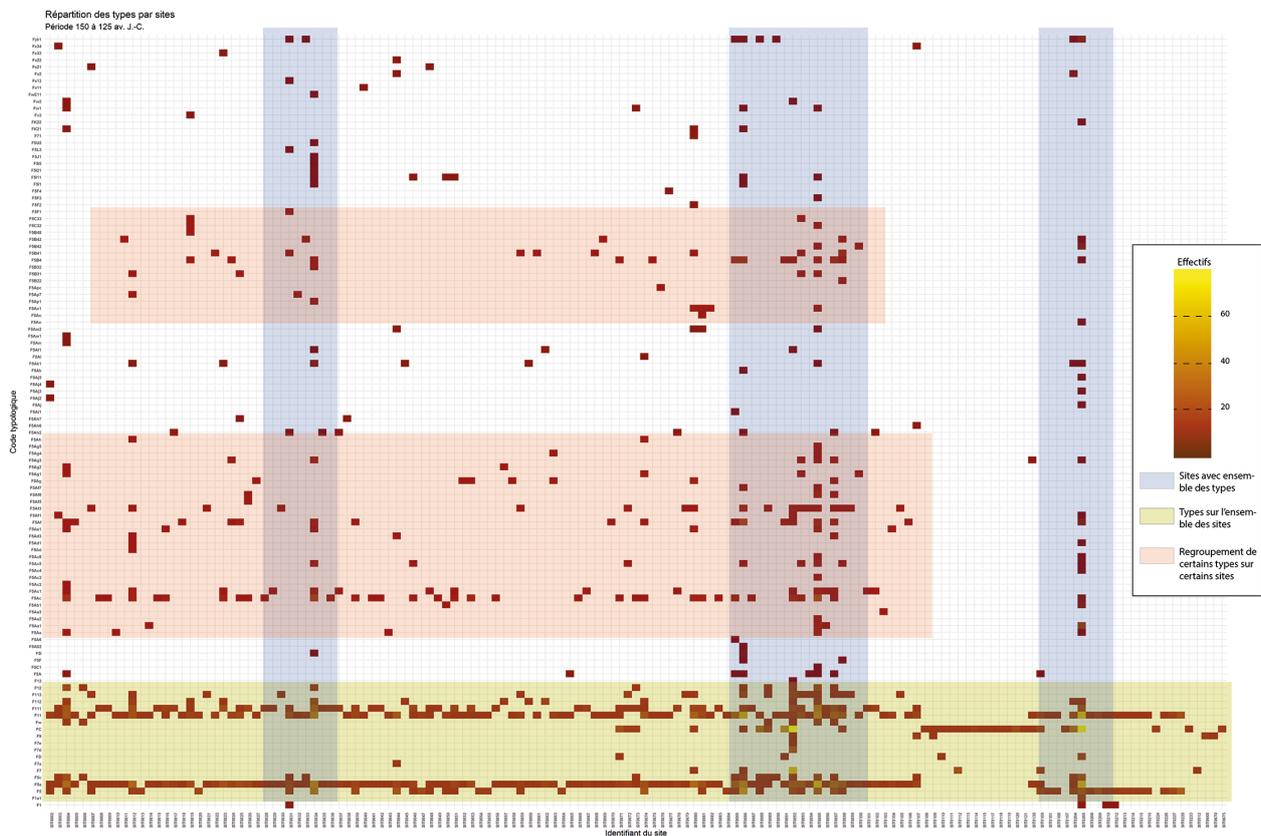


Figure 6 : graphique illustrant la répartition des types de fibules par sites pour LTD1a.
Analyse et DAO : L. Scholtus.

s'agit essentiellement de fibules de type Lauterach et Nauheim Striwe 1996 A3 [25] et leurs sous-types, ainsi que de fibules simples à ressort à quatre spires selon la typologie de Riha 1994 type 1 [26]. On note aussi, si l'on regarde la densité d'effectifs pour ces objets, qu'ils sont présents en grande quantité sur un grand nombre de sites. Ce sont d'ailleurs les seuls objets pour lesquels on note une si forte présence. Ils ne pourront donc avoir une grande influence dans la création des groupes régionaux, étant donné qu'ils se retrouvent sur l'ensemble de la zone d'étude et qu'ils se retrouvent en grande quantité sur une majorité de sites. Toutefois, les densités d'effectifs étant bien plus importantes sur certains de ces sites, il est possible qu'elles aient un poids pour ces mêmes lieux dans la détermination des groupes à l'aide des profils typologiques.

Dans un deuxième temps, on observe plusieurs contextes pour lesquels la majorité des types de fibules est signalée (fig. 6, cadres bleu pâle). Il s'agit de Mayence en Rhénanie-Palatinat, de La Pierre d'Appel et de La Bure dans les Vosges, des sites d'Augst et de Bâle en Suisse, et du Titelberg au Luxembourg. Ce sont aussi les sites pour lesquels les densités de fibules présentées précédemment sont parmi les plus importantes. Ils ont fait l'objet de longs programmes de fouilles ou d'études approfondies de leurs

mobiliers [27]. Cette différence peut s'expliquer par l'état de la recherche, mais il faut noter que beaucoup d'entre eux ont un statut particulier. En effet, ce sont tous des sites d'habitats possédant de nombreuses structures et, pour la plupart, des fortifications. Le Titelberg est même considéré comme étant la capitale de cité du peuple des Trévires. Il s'agit donc de sites hors norme, par rapport à la globalité de l'inventaire, composé surtout de découvertes isolées.

Pour finir, on distingue plusieurs regroupements de certains types présents uniquement sur quelques nombres de sites (fig. 6, cadres rouge pâle). Cependant, ces éléments ne sont pas plus évidents à délimiter que sur la carte précédente, d'autant plus que la position géographique des lieux de découverte n'est pas prise en compte sur ce graphique. La comparaison de chaque maille de la zone d'étude, les unes par rapport aux autres, prend donc tout son sens ici.

La carte obtenue en confrontant les assemblages typologiques pour chaque maille de la zone

[25] STRIEWE 1996.

[26] RIHA 1994.

[27] DEYBER *et al.* 1984 ; RIHA 1994 ; MIKLER 1997 ; GASPAR 2007 ; SCHOLTUS 2014.

d'étude (**fig. 7**) met bien évidence des mailles pour lesquelles la densité typologique est similaire. Ici, six *clusters* [28] ont été déterminés selon l'algorithme des k-médoides. Le premier, représenté en transparent sur la carte, correspond à l'assemblage de mobiliers présents de manière générale sur l'ensemble de la zone. Il correspond certainement aux mêmes objets que ceux illustrés par le graphique (**fig. 6**) dans l'ensemble

regroupant les types de fibules présents sur l'ensemble des sites. D'autre part, les mailles représentées en hachures ne sont pas prises en compte dans l'analyse, puisqu'elles se situent en dehors de la fenêtre observée.

L'algorithme met en évidence cinq *clusters* sur lesquels il est possible de réfléchir. Le postulat de départ était de mettre en évidence des groupes régionaux à partir des assemblages typologiques, toutefois, il ne semble pas y avoir de localisation géographique particulière à chacun de ces *clusters* ou de réelles différences que l'on pourrait qualifier de régionales. En effet, le *cluster 2*, même s'il est plus centré sur les Vosges et le sud de la Forêt Noire, semble se disperser sur l'ensemble de la carte. Il en va de même pour le

[28] Créer des *clusters*, ou analyse en grappe, consiste à assigner un ensemble d'éléments à un groupe, de sorte que les éléments au sein du même *cluster* soient les plus similaires possibles les uns par rapport aux autres, et en comparaison avec les éléments contenus dans les autres *clusters*. CHARRAD *et al.* 2014, p. 1.

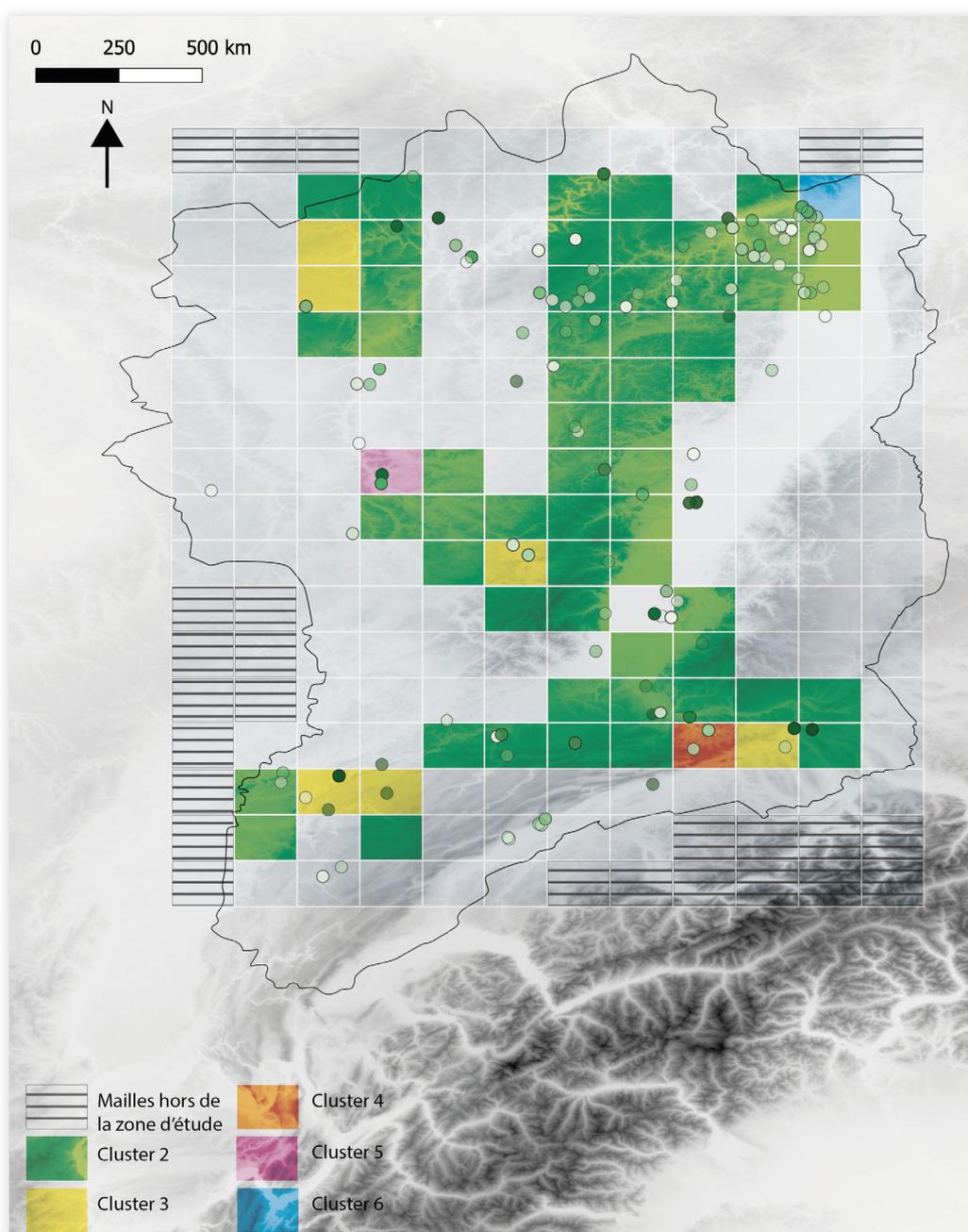


Figure 7

Résultat de l'analyse des *clusters* sur les types de fibules à LTD1a (partitionnement des données en fonction des assemblages typologiques selon la méthode des K-médoides).

DAO : L. Scholtus.
Fond orographique : données SRTM DEM Version 4 (<http://srtm.csi.cgiar.org>).

cluster 3 qui, bien qu'il ne corresponde qu'à un petit nombre de mailles, se retrouve à la fois au sud de la zone et au nord-ouest, ainsi que sur les Vosges et ne correspond donc pas à la vision archéologique d'un groupe régional dont toutes les entités se trouveraient localisées dans un même ensemble géographique. Toutefois, ce *cluster* est intéressant, car, bien que non contiguës dans l'espace, le résultat de l'analyse indique que ces mailles contiennent bien un assemblage typologique identique ou très proche. Par ailleurs, au moins trois d'entre elles renferment des sites mentionnés dans le paragraphe précédent, dans la catégorie des sites pour lesquels presque l'ensemble des types du corpus est représenté. On retrouve le Titelberg au nord-ouest, La Pierre d'Appel et La Bure dans le bassin de Saint-Dié-des-Vosges dans les Vosges et Augst au sud-est. Tout comme lors de l'interprétation du graphique (**fig. 6**), il est légitime de se demander si cette différenciation n'est pas due à un état de la recherche, puisque ce sont des sites sur lesquels les recherches sont denses. Toutefois, ce fait a été pris en compte au moment de la détermination des *clusters*, en fondant la création des profils sur la proportion de découvertes, et non sur les effectifs. Les différences de quantités d'objets entre les mailles et l'état de la recherche sont donc pondérées, ce qui permet d'affirmer que les mailles contenues dans le *cluster* 3 possèdent un profil typologique différent de celui des autres *clusters*. Enfin, les *clusters* 4, 5 et 6 ne se sont attribués chacun qu'à une seule maille. Là encore, cet élément est intéressant, puisque cela signifie que, pour chacune de ces trois mailles, le profil typologique ne correspond à aucun autre de la zone d'étude.

D'autres observations peuvent aussi être faites en prenant en considération la répartition réelle du mobilier. Le *cluster* 2, présenté comme disséminé sur l'ensemble de la zone d'étude, est plus intéressant dans les parties nord-est et sud de la carte, qui contiennent un grand nombre de découvertes, plutôt qu'au centre ou au nord-ouest où les objets sont plus diffus. Si, malgré une grande quantité d'éléments, ces mailles sont toujours présentées comme faisant partie du *cluster* 2 et non du 3 [29], l'hypothèse selon laquelle elles appartiennent à un groupe matériel différent est valide. Il en va de même pour les *clusters* 4, 5 et 6. À l'évidence, leurs mailles respectives contiennent plusieurs découvertes, et leur attribution à des groupes distincts est correcte.

[29] Pour ce cluster, il a déjà été montré plus haut qu'il s'agit des sites contenant le plus de types, mais aussi d'objets.

CONCLUSION

Cette étude présente la mise en place d'une méthode de modélisation qui se fonde sur la répartition des assemblages de mobilier d'*instrumentum* pour tenter de mettre en évidence des groupes régionaux de culture matérielle. Pour ce faire, elle s'appuie sur un corpus composé d'une grande quantité d'objets, issus de contextes variés.

Le résultat obtenu à l'aide de l'outil informatique et de la création de profils typologiques nécessite de prendre en compte l'ensemble des éléments archéologiques et statistiques à notre disposition. Il présente l'avantage de déterminer clairement quels espaces géographiques, représentés par des mailles, possèdent des assemblages typologiques similaires et lesquels sont explicitement différents, contrairement aux simples cartes de répartition.

Les résultats présentés sur le graphique (**fig. 6**) et sur la carte (**fig. 7**) laissent envisager que ces *clusters* illustrent des espaces différents en fonction du statut des sites qu'ils contiennent, ce qui semblerait être particulièrement le cas pour le *cluster* 3. En effet, ces sites, du fait de leur statut (capitales de cité, sites fortifiés, etc.), sont plus riches et entretiennent certainement des réseaux d'interactions et d'échanges plus étendus et livrent donc des types d'objets plus variés et rares. La même réflexion peut être faite pour les sanctuaires, dans lesquels la nature des découvertes est elle aussi différente puisque le fait de dépôt(s) volontaire(s). L'idée première de cette modélisation était de considérer l'ensemble du mobilier sélectionné sans faire de distinction de contexte puisqu'il ne s'agit pas d'une information toujours fiable. En effet, la nature d'un site n'est pas toujours connue selon qu'il s'agisse d'un élément issu de fouilles, de prospections ou encore de découvertes anciennes. Cela s'avère d'autant plus problématique lorsqu'on s'intéresse aux phénomènes culturels. Les sanctuaires de cette période ne sont pas toujours reconnus et la distinction entre un dépôt votif, une cachette ou toute autre interprétation n'est pas évidente. Toutefois, pour donner suite à ce premier résultat, il paraît intéressant de multiplier les analyses en ne prenant en compte que ces sites hors normes ou au contraire en les excluant. La même opération pourra être faite avec les sanctuaires connus et les dépôts. Il s'agira ensuite de comparer les résultats obtenus.

De plus, les données utilisées ici ne concernent que les typologies de fibules. Il faudra donc par la suite réaliser les mêmes étapes pour l'ensemble des catégories d'objets retenues présentées précédemment, de manière séparée et conjointe, pour observer la

manière dont les résultats obtenus varient et l'impact que peuvent avoir les différents champs fonctionnels dans la création de ces groupes.

Enfin, la connaissance de la composition typologique exacte de ces *clusters* apparaît également nécessaire à leur compréhension et leur interprétation. La création de ces groupes repose-t-elle sur une plus grande diversité typologique à l'intérieur des différentes mailles? Ces mailles contiennent-elles des types d'objets radicalement différents les uns des autres? Cet aspect reste encore à traiter.

Pour finir, il sera intéressant, par la suite, de vérifier les compositions récurrentes d'ensembles clos présents

sur la zone d'étude et d'interroger le corpus pour les mettre en évidence. Les résultats de cette analyse supervisée pourront être comparés à ceux obtenus avec la méthode présentée ici et ainsi observer si les assemblages typologiques résultant d'un choix culturel sont concordants avec ceux mis en évidence par l'analyse non supervisée.

Le modèle mis en place ici assure la reproductibilité de l'analyse et permet donc la multiplication des tests sur le corpus de mobilier désormais créé pour la Gaule de l'Est entre le III^e siècle av. et le IV^e siècle ap. J.-C. et ainsi observer l'évolution des groupes mis en évidence sur le temps long. ■

BIBLIOGRAPHIE

- BARNIER, Julien, 2013**, *Introduction à R*, <https://juba.github.io/tidyverse/> (consulté le 11 février 2018).
- BARRAL, Philippe & FICHTL, Stephan (dir.), 2012**, *Regards sur la chronologie de la fin de l'âge du Fer (III^e - I^{er} siècle avant J.-C.) en Gaule non méditerranéenne, Actes de la table ronde sur la chronologie de la fin de l'âge du Fer dans l'Est de la France tenue à Bibracte, Glux-en-Glenne, 15 - 17 octobre 2007*, Glux-en-Glenne.
- BERNARD, Loup, 2014**, « Études de cas et réflexions à partir de la situation de la vallée du Rhin sur l'intérêt du WebSIA coopératif ArkeoGIS », dans Géraldine Alberti, Clément Féliu & Gilles Pierrelvelcin (éd.), *Transalpinare, Mélanges offerts à Anne-Marie Adam*, Bordeaux, p. 77-85.
- BERNARD, Loup, [s. d.]**, *ArkeoGIS, partage et interrogation de données spatialisées sur le passé*, <http://arkeogis.org/> (consulté le 20 janvier 2018).
- BERTHON, Amélie, CHANSON-BERTOLIO, Karine, FEUGÈRE, Michel, & KAURIN, Jenny, 2013**, « Projet de charte pour l'étude des objets archéologiques », *Les nouvelles de l'archéologie* 131, p. 5-6.
- BUCHSENSCHUTZ, Olivier & GRUEL, Katherine, [s. d.]**, *BaseFer*, <https://basefer.huma-num.fr/index.php?zt=tcnt> (consulté le 20 septembre 2019).
- CHARRAD, Malika, GHAZZALI, Nadia, BOITEAU, Véronique, & NIKNAFS, Azam, 2014**, « NbClust : An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set », *Journal of Statistical Software* 61/6, p. 1- 36.
- COLLIS, John, 2003**, « Grands groupes et petits groupes, L'étude de la culture matérielle de l'âge du Fer », dans Suzanne Plouin & Peter Jud (éd.), *Habitats, mobiliers et groupes régionaux à l'âge du Fer*, Dijon, p. 207-215.
- CONLEN, Matthew, [s. d.]**, *Kernel Density Estimation*, <https://mathisonian.github.io/kde/> (consulté le 19 mars 2019).
- DEYBER, Alain, DALAUT, Marc, LADIER, Edmée, & WEISROCK, André, 1984**, « L'habitat fortifié laténien de la « Pierre d'Appel » à Étival-Clairefontaine (Vosges) », *Gallia* 42/1, p. 175-217.
- DJINDJIAN, François, 2005**, *Apports théoriques et méthodologiques en archéologie : applications à la connaissance du paléolithique supérieur européen*, Habilitation, Université de Paris 1 Panthéon Sorbonne, Paris.
- DJINDJIAN, François, 2017**, *L'archéologie : théorie, méthodes et reconstitutions*, Malakoff.
- FEUGÈRE, Michel, 1985**, « Les fibules en Gaule Méridionale de la conquête à la fin du V^e s. ap. J.-C. », *Revue archéologique de Narbonnaise* 12/1, p. 5-509.
- FEUGÈRE, Michel, [s. d.]**, *Artefacts - Encyclopédie en ligne des petits objets archéologiques*, <http://artefacts.mom.fr/fr/home.php> (consulté le 20 janvier 2018).
- GASPAR, Nicolas, 2007**, *Die keltischen und gallo-römischen Fibeln vom Titelberg*, Luxembourg.
- MAEHLER, Martin, ROUSSEUW, Peter, STRUYF, Anja, HUBERT, Mia, HORNIK, Kurt, STUDER, Matthias, ROUDIER, Pierre, GONZALEZ, Juan, KOZLOWSKI, Kamil, SCHUBERT, Erich, & MURPHY, Keefe, 2019**, *cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions*, R package version 2.1.0.
- MAEHLER, Martin & STUDER, Matthias, [s. d.]**, *Partitioning Around Medoids*, <https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/cluster/html/pam.html> (consulté le 3 avril 2019).
- MARCHAL, Olivier, 2018**, *Statistiques appliquées avec introduction au logiciel R*, Paris.
- MIKLER, Hubertus, 1997**, *Die römischen Funde aus Bein im Landesmuseum Mainz*, Montagnac.

- MILLET, Émilie, 2012**, « Le costume funéraire des régions du Rhin moyen et supérieur entre le V^e et le III^e siècle avant J.-C. : de nouvelles perspectives de recherches », dans Martin Schönfelder & Susanne Sievers (éd.), *L'âge du Fer entre la Champagne et la vallée du Rhin, 34e colloque de l'AFEAF, 13-16 mai, Aschaffenburg (Allemagne), Mainz*, p. 421-444.
- NAKOINZ, Oliver, 2005**, *Studien zur räumlichen Abgrenzung und Strukturierung der älteren Hunsrück-Eifel Kultur*, Bonn.
- NAKOINZ, Oliver, 2010**, « Kulturelle Räume der älteren Eisenzeit in Südwestdeutschland », dans Dirk Krausse (éd.), « Fürstensitze » und Zentralorte der frühen Kelten, Stuttgart, p. 317-332.
- NAKOINZ, Oliver, 2013**, *Archäologische Kulturgeographie der ältereisenzeitlichen Zentralorte Südwestdeutschlands*, Bonn.
- NAKOINZ, Oliver, 2014**, « Fingerprinting Iron Age Communities in South-West Germany », dans Catalin Nicolae Popa & Simon Stoddart (éd.), *Fingerprinting the Iron Age : Approaches to Identity in the European Iron Age: Integrating South-Eastern Europe into the Debate*, Oxford, p. 187- 199.
- NAKOINZ, Oliver & KNITTER, Daniel, 2016**, *Modelling human behaviour in landscapes, Basic Concepts and Modelling Elements*, New York.
- RIHA, Emilie, 1994**, *Der römischen Fibeln aus Augst und Kaiseraugst: die Neufunde seit 1975*, Augst.
- ROTH-ZEHNER, Muriel, 2010**, *La céramique de La Tène finale et du début de l'époque romaine en Alsace*, Strasbourg.
- ROUX, Émilie, 2013**, *Approche qualitative et quantitative de l'usage du mobilier non céramique dans les agglomérations (II^e s. av. J.-C. - III^e s. ap. J.-C.), L'exemple des territoires turon, biturige et carnute*, Thèse de doctorat, Université François - Rabelais, Tours.
- SCHOLTUS, Lizzie, à paraître**, « From the artefacts to material culture, Statistical modelling using R », dans *Actes du colloque du CAA, Cracovie avril 2019*.
- Scholtus, Lizzie, 2014**, *La Bure : Relecture des données*, Mémoire de Master, Université de Strasbourg, Strasbourg.
- STRIEWE, Karin, 1996**, *Studien zur Nauheimer Fibel und ähnlichen Formen der Spätlatènezeit*, Espelkamp.
- TREMBLAY CORMIER, Laurie, 2013**, *Identités culturelles et contacts entre Rhin et Rhône du 10eme au 5eme siècle av. n. e. : dynamiques sociales et échanges*, Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, Dijon.
- TREMBLAY CORMIER, Laurie, NAKOINZ, Oliver, & POPA, Catalin Nicolae, 2017**, « Three Methods for Detecting Past Groupings : Cultural Space and Group Identity », *Journal of Archaeological Method and Theory* 20/3, p. 643- 661.
- WAGNER, Heiko, 2006**, *Glasschmuck der Mittel- und Spätlatènezeit am Oberrhein und den angrenzenden Gebieten*, Grunbach.

INRAP ET GÉOPHYSIQUE : VERS UNE APPROCHE RAISONNÉE

Guillaume HULIN^{1,2,*}, François-Xavier SIMON^{1,3}¹ Inrap, Direction Scientifique et Technique² Sorbonne Université, CNRS, EPHE, UMR 7619 Metis³ UMR 6249 Chrono-Environnement

* Contact : guillaume.hulin@inrap.fr

RÉSUMÉ

L'archéologie préventive en France repose sur deux phases d'étude distinctes que sont le diagnostic et la fouille. L'intégration de la prospection géophysique dans ce processus reste, à ce jour, relativement limitée malgré un nombre important d'expériences visant à introduire ces techniques notamment en phase de diagnostic. Des tensions et malentendus sont apparus opposant l'utilisation de la géophysique à la réalisation des tranchées à la pelle mécanique pour l'évaluation du potentiel archéologique en contexte préventif. Ces points de discordance se concentrent autour de trois aspects que sont la fiabilité scientifique, le gain de temps et la rentabilité financière de la géophysique par rapport au diagnostic conventionnel. Malgré cela, au cours des dernières années, l'Inrap développe et met en œuvre des études géophysiques en prônant une utilisation raisonnée de ces techniques, c'est-à-dire uniquement lorsque l'on sait la géophysique particulièrement pertinente. Les principales applications concernent bien évidemment la détection de vestiges archéologiques mais également la reconstitution de paysages anciens et, de manière plus originale, la cartographie et la caractérisation des couches archéologiques lors des fouilles. Pour ce faire, l'Inrap a récemment

mis en place une équipe de prospection géophysique et tous les indicateurs laissent présager une augmentation des demandes et une très bonne intégration de la géophysique auprès de la communauté archéologique.

MOTS-CLÉS

Archéologie préventive, diagnostic archéologique, prospection géophysique, diagnostic en tranchées.

Preventive archaeology in France is based on two stages: evaluation and excavation. Despite a large number of experiments based on geophysical prospection, especially during the evaluation phase, the integration of these techniques within the preventive process remains rather limited. Conflicts and misunderstandings have arisen between proponents of geophysics and proponents of trial trenches to assess the archaeological potential in a preventive context. These points of contention focus on three aspects: scientific reliability, time savings and costs of geophysics compared to standard evaluation. In spite of this, over the last few years, Inrap has been developing and implementing geophysical studies by advocating a rational use of these techniques, i.e. only when geophysics is known to be relevant. The main applications concern the detection of archaeological remains but also the reconstruction of ancient landscapes and, in a more original way, the mapping and characterisation of archaeological layers during excavations. To this end, Inrap recently created a geophysical department and all indicators point to an increase in survey number and a very good integration of geophysics within the archaeological community.

KEYWORDS

Preventive archaeology, archaeological evaluation, geophysical survey, trial trenching.

Article accepté après évaluation par deux experts selon le principe du double anonymat

La législation en matière d'archéologie préventive est actuellement bien établie en France et repose sur deux phases d'étude distinctes que sont le diagnostic et la fouille. Avec environ 2000 opérations par an (1800 diagnostics et 200 fouilles), l'Inrap est le plus important organisme français d'archéologie préventive. Dans ce contexte, l'utilisation de la géophysique en phase de diagnostic a longtemps été source de conflit. Plusieurs tentatives de substituer tout ou partie du diagnostic en tranchées par les outils géophysiques ont été réalisées depuis les années 1980 et, pour la plupart, ont échoué et ont créé tensions et malentendus entre géophysiciens et archéologues. Afin de dépasser les difficultés rencontrées jusqu'alors, l'Inrap met actuellement en œuvre une méthodologie raisonnée pour l'utilisation de la géophysique en contexte préventif.

LE PROCESSUS DE L'ARCHÉOLOGIE PRÉVENTIVE EN FRANCE

En France, le processus de l'archéologie préventive (c'est-à-dire en amont de tout projet d'aménagement susceptible d'impacter le patrimoine archéologique) peut être divisé en cinq étapes :

1. Examen du projet d'aménagement par les agents prescripteurs des Services Régionaux de l'Archéologie (SRA) sur la base duquel il est décidé l'utilité de réaliser un diagnostic archéologique.

2. Comme stipulé dans le livre V du code du patrimoine, le diagnostic est une prérogative publique dont l'exécution est confiée à l'Inrap ou à un service archéologique habilité de collectivité territoriale. Ce diagnostic consiste majoritairement en la réalisation d'ouvertures en tranchées sur 5 à 10 % de l'emprise du projet. En plus de la détection des sites, l'intervention doit permettre de caractériser les vestiges en fournissant des informations sur leur nature, leur fonction, leur datation et leur état de conservation [1].

Chaque projet d'aménagement, même si aucune évaluation archéologique n'y est réalisée, est soumis à une redevance (5400 euros par hectare en 2017). Celle-ci permet de financer le diagnostic, un tiers étant réservé pour subventionner les fouilles de certains aménagements (par exemple, les constructions de

logements sociaux ou de maisons privées) dans le cadre du Fonds National pour l'Archéologie Préventive.

3. À la fin de l'intervention de terrain, un rapport est remis au SRA et examiné par la Commission Territoriale de la Recherche Archéologique (CTRA). Sur la base des résultats obtenus, le préfet de région peut décider de prescrire une fouille archéologique.

4. Si une fouille archéologique est prescrite, sa maîtrise d'ouvrage est donnée à l'aménageur qui doit financer sa réalisation en tenant compte du cahier des charges émis par le SRA. La fouille peut être réalisée par l'Inrap, par un service archéologique habilité de collectivité territoriale ou par une société privée agréée pour réaliser la fouille.

5. Comme pour le diagnostic, un rapport de fouille est remis au SRA et son contenu est évalué par la CTRA.

DIAGNOSTIC EN TRANCHÉES ET GÉOPHYSIQUE : ÉLÉMENTS DE COMPARAISON

La pratique du diagnostic en tranchées systématiques est le résultat d'une longue réflexion méthodologique et d'une longue pratique menées par les archéologues français depuis les années 1980. Cette approche, par la découverte de nombreux sites, a permis d'accroître considérablement les connaissances archéologiques en France au cours de ces dernières décennies [2].

Parallèlement, des tentatives pour introduire la géophysique dans le système archéologique préventif français ont été menées, plus particulièrement en phase de diagnostic et souvent avec l'objectif de réduire, voire de substituer, les tranchées de sondage. Ces tentatives ont généré de nombreuses tensions au sein de la communauté archéologique, qui percevait la géophysique comme un danger plus que comme un outil à leur disposition. Ces points de friction concernaient principalement trois aspects : la fiabilité scientifique de la géophysique, le gain de temps pour l'évaluation du potentiel archéologique et sa pertinence en termes d'économie financière. Ces trois points sont très souvent largement avancés comme des avantages majeurs de la géophysique, mais, au regard des expériences passées, le sont-ils vraiment ?

[1] CNRA 2019.

[2] DEMOULE 2004.

LA GÉOPHYSIQUE EST-ELLE UNE MÉTHODE EFFICACE POUR LE DIAGNOSTIC ARCHÉOLOGIQUE?

Les limites concernant la détection de sites par prospection géophysique ont déjà été mises en avant. On peut citer, par exemple, le cas du canal à grand gabarit Seine-Nord-Europe en Picardie où une étude comparative entre diagnostic en tranchées et géophysique a pu être menée [3]. Dans ce cadre, une zone test de 60 ha y avait été investiguée à la fois par méthodes géophysiques et par diagnostic conventionnel. Sur ce secteur, le contexte sédimentaire est majoritairement constitué de luvisols et, par endroit, de calcaire. La typologie des vestiges archéologiques est principalement constituée de structures creusées à travers ces horizons (fosses, fossés et trous de poteau). Les études géophysiques qui ont été menées sur cette zone test, associant méthode magnétique et méthode électrique, n'ont permis de détecter que 25 % des sites archéologiques découverts lors du diagnostic en tranchées (réalisé avec un taux d'ouverture de 10 %).

Les limites de la géophysique ont également pu être décrites en Alsace dans le cadre des travaux de thèse de SIMON [4]. Dans ce cas, elles sont en partie liées à la grande hétérogénéité des sols qui conditionne l'efficacité des méthodes mises en œuvre. Si les méthodes géophysiques fournissent des résultats corrects sur les loëss, leur usage est nettement moins pertinent sur les limons décarbonatés et sols hydromorphes.

Considérant les types de sol et de vestige rencontrés, ces résultats peuvent être étendus à une grande partie de la moitié nord de la France, tout comme une partie de la Belgique, de l'Allemagne et des Pays-Bas qui présentent des contextes similaires.

Pour les archéologues français, des taux de détection aussi faibles constituent le principal argument pour considérer la géophysique comme une technique d'évaluation peu fiable en comparaison des résultats obtenus avec les tranchées de diagnostic. Par conséquent, si l'utilisation de la géophysique est considérée comme un pas en avant dans les pays où le diagnostic en tranchées n'est pas mis en œuvre ou avec un taux d'ouverture inférieur à 5%, elle est, en France, perçue comme un pas en arrière pour ce qui est de l'évaluation du potentiel archéologique en contexte préventif.

Par ailleurs, si la géophysique est, dans certains cas spécifiques, un outil utile pour la détection de sites, elle reste bien évidemment incapable de caractériser les vestiges archéologiques en matière de

datation, de fonction et d'état de conservation ce qui constitue pourtant une part essentielle du diagnostic archéologique.

À l'heure actuelle, les comparaisons entre géophysique et diagnostic en tranchées restent très limitées que ce soit en France ou à l'étranger. Les retours d'expérience de ces deux techniques d'évaluation doivent donc être approfondis afin d'évaluer au mieux la pertinence de la géophysique sur différents types de sol et pour différents types de site archéologique couramment rencontrés en contexte préventif.

LA GÉOPHYSIQUE EST-ELLE UNE MÉTHODE RAPIDE ?

En France, la durée moyenne de la phase de diagnostic est généralement de moins d'un an, depuis la prescription du SRA jusqu'au rapport final d'opération. Ce qui peut, au premier abord, être considéré comme un temps long est au final un processus extrêmement serré en termes de temps. L'introduction de la géophysique dans un tel processus peut s'avérer complexe et ce d'autant plus qu'elle présente d'évidentes contraintes de mise en œuvre qu'il est nécessaire d'intégrer dans la planification des interventions.

L'état de surface de la zone à prospecter conditionne fortement la faisabilité d'une prospection géophysique ce qui l'est beaucoup moins pour la réalisation de tranchées à la pelle mécanique. Ainsi des parcelles en labour, des cultures hautes ou en friche ne permettent pas le passage des appareils géophysiques. Pour les terrains labourés ou en friche, une préparation de la surface peut être requise pour permettre la mise en œuvre des instruments mais constitue une étape supplémentaire qui s'ajoute au calendrier d'intervention. Les conditions météorologiques (gel, sécheresse...) peuvent également avoir un effet négatif sur la qualité des données géophysiques ce qui nécessite une grande souplesse de la part de l'équipe géophysique.

Ces contraintes sont davantage problématiques dans le cas de grands projets de développement, tels que les projets linéaires (lignes à grande vitesse, autoroutes...) où un nombre considérable de parcelles sont recoupées. La multiplicité des parcelles, et donc des états de surface, implique très souvent de réaliser les prospections géophysiques à différents moments de l'année pour pouvoir couvrir la totalité du projet d'aménagement. Au final, tous ces aspects peuvent rendre la réalisation d'une prospection géophysique longue et coûteuse.

[3] HULIN *et al.* 2018.

[4] SIMON 2012.

LA GÉOPHYSIQUE EST-ELLE UNE MÉTHODE ÉCONOMIQUE ?

L'évaluation archéologique est une démarche scientifique qui implique des dépenses importantes [5]. En France, la politique de financement actuelle ne permet pas de réaliser, sur un même projet, une étude géophysique et un diagnostic conventionnel par tranchées avec un taux d'ouverture de 5 à 10 %. La combinaison des deux méthodes serait idéale mais sa systématisation entraînerait une forte augmentation des coûts. Cela est d'autant plus vrai lorsqu'il n'y a pas de connaissance préalable sur le contexte archéologique et pédologique. Dans de tels cas, au moins deux techniques géophysiques doivent être utilisées afin de fournir des résultats fiables. Une telle approche augmenterait les coûts de 2000 à 3000 euros par hectare pour l'étude des grandes surfaces. Compte tenu de la fiabilité toute relative de la géophysique évoquée précédemment, cette approche s'avère alors très coûteuse comparativement au diagnostic conventionnel par tranchées.

D'UNE APPROCHE À L'AVEUGLE À UNE APPROCHE RAISONNÉE

Pour toutes les raisons exposées ci-dessus, l'utilisation de la géophysique en archéologie préventive a été source de conflit et de désaccord notamment avec les aménageurs qui voient en la géophysique une méthode miracle (faible impact sur le sol, illusion de coût plus faible et de rapidité de mise en œuvre) afin de réduire l'impact du diagnostic en tranchées. Le problème majeur réside dans le fait que la quasi-totalité des tentatives d'introduire la géophysique dans le protocole préventif a été menée pendant la phase d'évaluation et avec de faibles connaissances (voire aucune) sur le type de structures recherché et sur les contextes pédologiques rencontrés (type de sol, épaisseur, variabilité). Une telle approche à l'aveugle est généralement synonyme d'échec et n'apportera que peu de résultats positifs. Pour être pleinement efficace, la géophysique se doit de répondre à des questions précises, avec des *a priori* solides sur ce que l'on recherche et dans quel contexte. Par définition, ceci est en contradiction totale avec le caractère exploratoire de la phase de diagnostic.

Par conséquent, l'Inrap ne recommande pas d'utiliser la géophysique sur de grandes surfaces si le contexte n'est pas ou peu connu. La politique préconisée par l'institut repose sur une approche différente, plus raisonnée, où la géophysique n'est mise en œuvre que dans des cas très spécifiques. Il s'agit ici de n'utiliser la

géophysique que lorsque l'on sait cette méthode particulièrement efficace (en fonction du type de vestige archéologique et du type de sol) ou bien dans les cas où la réalisation de tranchées à la pelle mécanique est difficile (par exemple en contexte urbain). Dans ces deux cas, la géophysique peut être employée avec les méthodes les plus adaptées et la configuration de capteurs la plus appropriée. En ayant recours à la géophysique de la sorte, celle-ci devient alors plus fiable et l'évaluation globale plus pertinente.

Par ailleurs, la géophysique ne doit pas seulement être considérée comme une technique de diagnostic archéologique. Bien que plus limitées en nombre, les études géophysiques peuvent également être réalisées sur les opérations de fouille et apporter des résultats qui peuvent combler certaines lacunes liées aux techniques de fouille actuelles [6]. Cette approche en fouille reste largement sous-estimée et l'Inrap a décidé de développer ces applications en menant un travail de recherche et développement sur ces thématiques.

De 2002 à 2019, l'Inrap a réalisé 219 études géophysiques, dont plus de la moitié depuis 2015 (date de création du pôle géophysique de l'Inrap). Toutes ont suivi les principes de l'approche raisonnée décrite ci-dessus et peuvent être divisées en trois thèmes différents :

DÉTECTION DES STRUCTURES ARCHÉOLOGIQUES

La détection de structures archéologiques est l'application la plus évidente de la géophysique et constitue la principale utilisation de la géophysique par l'Inrap avec 61 % des études géophysiques réalisées dans ce but. Ces études peuvent être menées à plusieurs moments du processus : en préalable au diagnostic, entre le diagnostic et la fouille, ou bien encore pendant ou après la fouille, pour compléter le plan du site en dehors de la zone de fouille.

ANALYSE DU PAYSAGE

L'intégration des observations archéologiques dans leur environnement est cruciale pour comprendre les différents modes d'occupation humaine. La géophysique (en particulier la méthode électromagnétique basse fréquence) peut offrir des informations concernant la géomorphologie sur de larges surfaces. Cette approche, particulièrement efficace, représente 12 % de l'activité du pôle géophysique de l'Inrap.

[5] DEPAEPE *et al.* 2016.

[6] HULIN & SIMON 2012 ; HULIN *et al.* 2014 ; SIMON *et al.* 2012.

CARACTÉRISATION DES NIVEAUX ARCHÉOLOGIQUES SUR SURFACE DÉCAPÉE

À une toute autre échelle, la géophysique peut aussi être utilisée pendant la fouille, directement sur surface décapée [7]. Le but n'est pas tant ici de détecter des vestiges mais plutôt de caractériser les couches archéologiques. Cette caractérisation est principalement basée sur des paramètres magnétiques tels que la susceptibilité ou la viscosité magnétique mais peut également être réalisée par des analyses multispectrales ou des mesures de résistivité électrique. En association avec des analyses pédologiques et géochimiques, ce type d'approche peut révéler des informations pertinentes sur les occupations passées. L'éventail des signatures archéologiques qui peut être étudié par ces techniques est très large allant de l'étude des zones chauffées, aux ateliers de forge, en passant par les dépôts de fumier ou les niveaux de terres noires. Cette approche représente 27 % des études géophysiques réalisées par l'Inrap.

Une telle approche qui consiste à considérer les propriétés géophysiques des sols comme un proxy d'anthropisation est très largement sous-employée. Cependant, la mesure de ces paramètres peut considérablement changer la perception de tout ou partie d'un site et permettre à l'archéologue de mettre en place une stratégie de fouille adaptée en indiquant, directement sur le terrain, certaines zones d'intérêt difficiles à percevoir à l'œil nu.

CONCLUSION : RECONSIDÉRER LA GÉOPHYSIQUE EN ARCHÉOLOGIE PRÉVENTIVE EST NÉCESSAIRE

L'image de la géophysique comme un outil simple, efficace et peu onéreux est basée sur de nombreux exemples de prospections géophysiques effectués sur des sites bien préservés, le plus souvent dans un cadre d'archéologie programmée. Les résultats présentés dans des revues scientifiques montrent des cartes géophysiques souvent impressionnantes. Ces études sont également couramment présentées au grand public, aux politiques et aux aménageurs. La géophysique est ainsi mise en avant comme une technologie novatrice permettant de cibler les « zones intéressantes » et donc de fouiller moins et mieux. Cependant, l'archéologie préventive en France montre que cette vision idyllique de la géophysique est largement erronée

puisque la plupart des sites archéologiques ne fournissent que rarement des résultats géophysiques aussi spectaculaires et évidents à interpréter.

L'archéologie préventive nous a en effet appris que la plupart des sites archéologiques ne laissait que de très légères traces dans le sol, souvent difficiles à identifier sans l'expérience des archéologues de terrain. Ces sites constituent pourtant l'objet principal de leur travail quotidien et leur étude aux cours des dernières décennies a complètement modifié nos connaissances archéologiques. Bien que moins impressionnants pour le grand public, ces sites n'en sont pas moins des marqueurs clés pour la compréhension de notre passé, et la plupart du temps, le diagnostic en tranchées est le seul moyen de les détecter efficacement.

Malgré cela, l'Inrap intègre aujourd'hui les méthodes géophysiques comme un outil à part entière dans le processus scientifique. Comparé à certains pays, notamment anglo-saxons, qui utilisent la géophysique pour la phase d'évaluation, généralement sur de grandes surfaces et sans connaissance contextuelle préalable (nature et épaisseur des sols, type de vestiges...), l'Inrap promeut une utilisation plus rationnelle sur des cas très spécifiques avec des enjeux scientifiques et/ou techniques très précis. Dans la plupart des cas, l'institut met en œuvre la géophysique après le diagnostic en tranchées ou comme outil complémentaire en phase de fouille. De fait, une bonne connaissance du contexte archéologique et pédologique conduit à une plus grande efficacité de la géophysique.

Grâce à cette approche raisonnée, 135 études géophysiques ont été réalisées entre 2015 et 2019, et tous les indicateurs montrent une augmentation de l'activité pour les années à venir. Actuellement, une équipe de 2 géophysiciens aidés de 26 techniciens spécialisés dans l'acquisition de données est pleinement opérationnelle à l'Inrap sur l'ensemble du territoire. L'intégration d'un pôle géophysique au sein d'un institut d'archéologie a fortement contribué à modifier la perception des archéologues envers l'utilisation de ces techniques. Après des décennies d'incompréhension, la géophysique en France semble dorénavant être bien acceptée par la communauté des archéologues qui, utilisée de manière raisonnée, y voient un outil complémentaire pour l'archéologie préventive. ■

[7] SIMON *et al.* 2012 ; HULIN & JAGOU 2014.

BIBLIOGRAPHIE

- CONSEIL NATIONAL DE LA RECHERCHE ARCHÉOLOGIQUE, 2009**, « Le diagnostic d'archéologie préventive », CNRA 2008-2012, Avis n°1, 4 décembre 2009.
- DEMOULE, Jean-Paul, 2004**, *La France archéologique : vingt ans d'aménagements et de découvertes*, Paris.
- DEPAEPE, Pascal, KEROUANTON, Isabelle, PRILAU, Gilles & TALON, Marc, 2016**, « Management of large archaeological projects in a competitive environment: The French case. Recent developments in preventive archaeology in Europe », *Proceedings of the 22nd EAA Meeting in Vilnius, sept. 2016*, Ljubljana, p. 123-135.
- HULIN, Guillaume & SIMON, François-Xavier, 2012**, « Geophysics and preventive archaeology in France: new interdisciplinary issues », *First Break* 30, p. 67-71. DOI : <https://doi.org/0.3997/1365-2397.30.8.60907>.
- HULIN, Guillaume & JAGOU, Benjamin, 2014**, « Reconnaître et caractériser les zones de forge sur surface décapée : apport de la géophysique à l'étude paléométallurgique », *Archéopages* 39, p. 90-99.
- HULIN, Guillaume, PRILAU, Gilles & TALON, Marc, 2014**, « Intégration de la géophysique à un projet archéologique d'envergure : l'exemple du projet canal Seine-Nord Europe », *Revue Archéologique de Picardie* 1/2, p. 245-260.
- HULIN, Guillaume, BAYARD, Didier, DEPAEPE, Pascal, KOEHLER, Alain, PRILAU, Gilles & TALON, Marc, 2018**, « Geophysics and preventive archaeology: comparison with trial trenching on the CSNE project (France) », *Archaeological Prospection* 25/2, p. 1-12. DOI : <https://doi.org/10.1002/arp.1598>.
- SIMON, François-Xavier, 2012**, *Apport de l'outil géophysique pour la reconnaissance et la caractérisation de sites en archéologie préventive, méthodes et perspectives : exemples en Alsace*, Thèse d'Université, Université Pierre et Marie Curie.
- SIMON, François-Xavier, KOZIOL, Agnieszka & THIESSON, Julien, 2012**, « Investigating magnetic ghosts on an Early Middle Age settlement: comparison of data from stripped and non-stripped areas », *Archaeological Prospection* 19/3, p. 191-200. DOI : <https://doi.org/10.1002/arp.1427>.

APPROCHE MULTI-MÉTHODES EXPÉRIMENTALE POUR L'ÉTUDE D'UN SITE D'OCCUPATION ROMAINE ET MÉDIÉVALE À HORBOURG-WIHR

Hugo REILLER^{1,*}, Matthieu FUCHS^{2,3,**}, Bruno GAVAZZI^{1,***}

¹ Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) ; UMR 7516 ; Université de Strasbourg/EOST, CNRS

² Archéologie Alsace

³ UMR 7044 Archimède ; Université de Strasbourg, CNRS

* h.reiller@unistra.fr

** matthieu.fuchs@archeologie.alsace

*** bgavazzi@unistra.fr

RÉSUMÉ

L'étude présente des campagnes de prospections géophysiques et de sondages archéologiques qui se complètent pour répondre à un double objectif : 1- comprendre l'enchaînement de l'occupation anthropique du territoire entre l'époque romaine et l'époque médiévale d'un secteur archéologique inédit à Horbourg-Wihr (Haut-Rhin, France) ; 2- tester l'efficacité de l'utilisation combinée de méthodes de prospections géophysiques et de la fouille archéologique pour identifier et caractériser les vestiges. L'utilisation de différentes méthodes géophysiques complémentaires se révèle particulièrement adaptée au contexte du site et les résultats ont permis d'implanter des sondages ciblés et de mieux comprendre la distribution spatiale des vestiges identifiés lors de la fouille. Ainsi, cette étude apporte de nouvelles informations sur la succession et superposition de vestiges d'un château médiéval sur la base d'un théâtre gallo-romain.

MOTS-CLÉS

Archéologie, géophysique, magnétisme, résistivité électrique, radar, château médiéval, théâtre gallo-romain.

The study presents geophysical surveys and archaeological excavations that complete each other to fulfil two objectives: 1- to understand the evolution of the human occupation from Roman to Medieval times on an archaeological site in Horbourg-Wihr (Haut-Rhin, France); 2- to test the efficiency of an approach using a combination of different geophysical methods and targeted excavations for the assessment of archaeological remains. The use of different geophysical methods is shown to be particularly adapted to the context of the archaeological site. The results allow to conduct targeted excavations and to better understand the spatial distribution of the identified remains. Thus, the study gives new results on the succession and overlap of the archaeological remains of a medieval castle built on the remnant of a Gallo-Roman theater.

KEYWORDS

Archaeology, geophysics, magnetism, resistivity, georadar, medieval castle, Gallo-Roman theater.

Article accepté après évaluation par deux experts selon le principe du double anonymat

CONTEXTE DU PROJET

Le site d'étude porte sur un terrain d'environ 1,5 ha, à l'ouest du village de Wihr-en-Plaine, sur la commune de Horbourg-Wihr. Aujourd'hui propriété privée, cet espace est constitué de prés et de vergers et d'un étang à l'arrière d'une maison de maître. Les sources d'archives les plus anciennes signalent l'existence d'un château à la fin du XIV^e siècle. Un précis historique rédigé en 1890 par le pasteur Herrensneider propose de placer le château à cet emplacement sur la base de la toponymie (Schlossgarten – Burggarten), relevée sur des cartes anciennes (**fig. 1**) et des sources historiques **[1]**. Le creusement d'un nouvel étang par le propriétaire en 1993 met au jour une vingtaine de blocs de grès dont certains portant de singulières inscriptions non déchiffrées **[2]** (**fig. 2**). La collecte du mobilier céramique au pied de la berge du nouvel étang par M. Fuchs et l'association

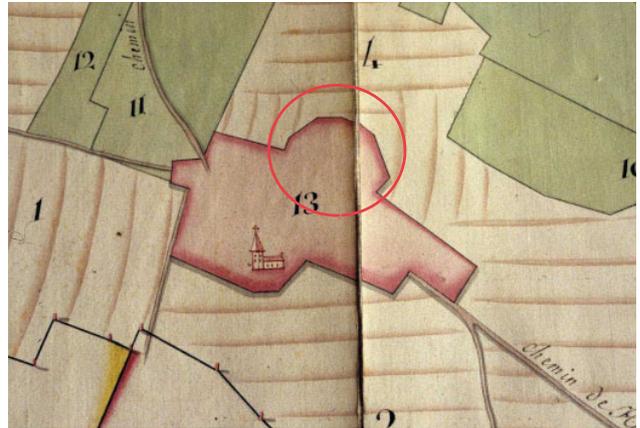


Figure 1 : extrait du plan d'arpentage de la commune de Wihr-en-Plaine (1760), le cercle rouge met en évidence une excroissance en demi-cercle à l'emplacement du site (Archives Départementales du Haut-Rhin, cliché M. Fuchs).

[1] HERRENSCHNEIDER 2016, p. 55-56.

[2] FUCHS 1996, p. 213.

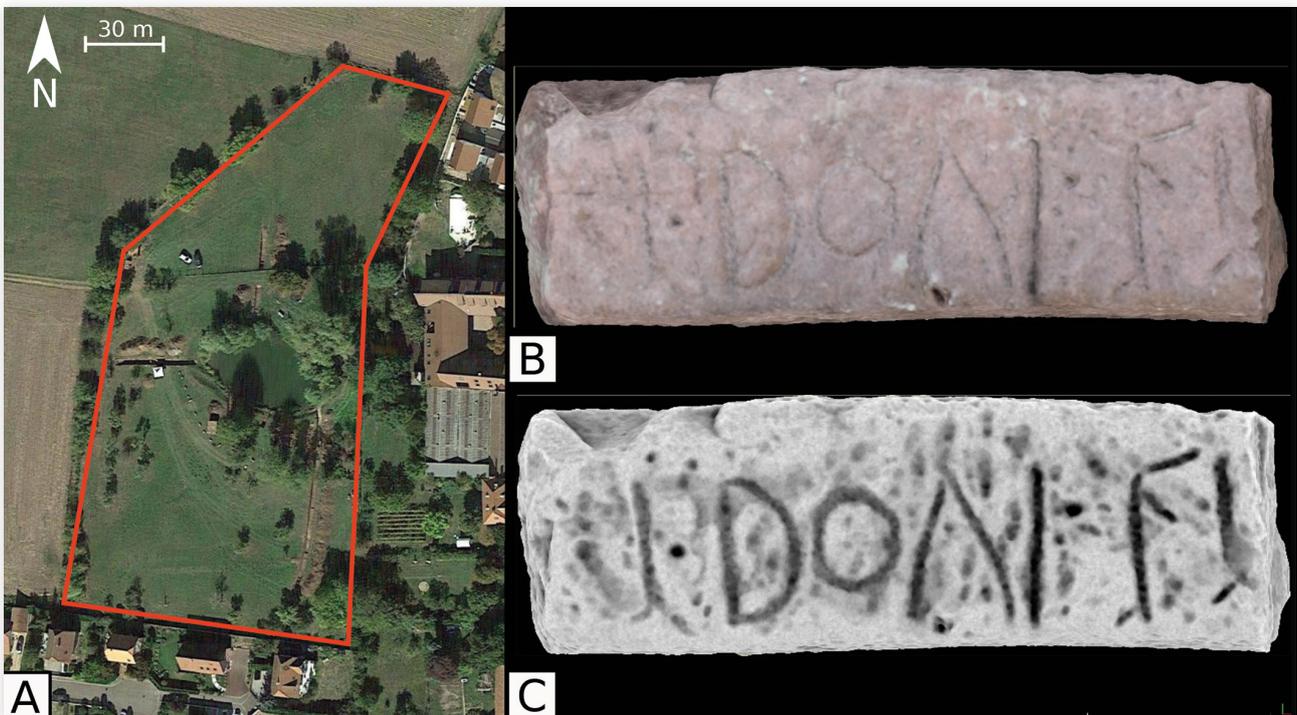


Figure 2

A. Délimitation en rouge du site d'étude sur image satellite Google Earth du 04/10/2018 ;

B. Modélisation 3D (photogrammétrie) du bloc gradin n°6 ;

C. Image du même bloc après un post-traitement PCV (M. Koehl - INSA 2017).

ARCHIHW confirme une phase d'abandon au début de l'époque moderne. Ces investigations menées entre 1994 et 1998 tendent à indiquer la présence d'un château (probablement détruit au XVII^e siècle) réutilisant des blocs plus anciens mais dont la datation remontant à l'Antiquité n'était pas établie [3]. Afin de caractériser les contrastes potentiels de résistivité électrique apparente et d'aimantation liés à la présence des vestiges des fondations du château, différentes prospections géophysiques ont été menées. En premier lieu, des mesures de résistivité électrique apparente ont été conduites en 2009 [4]. Puis, deux campagnes de prospections magnétiques ont été réalisées en 2017 : la première pour mesurer le pseudo-gradient vertical [5] et une seconde pour mesurer l'intensité du champ total [6]. Les prospections électriques ont révélé notamment deux anomalies de résistivité électrique apparente parallèles et formant un arc de cercle. L'anomalie interne de cet arc de cercle est longue d'une centaine de mètres tandis que l'externe est longue d'une trentaine de mètres (fig. 3). L'ensemble a été en premier lieu interprété comme des éléments d'un fossé et d'une enceinte liés au château médiéval. En 2017-2018 les blocs de grès ont fait l'objet d'une modélisation 3D par M. Koehl (INSA-Strasbourg). Sur la base de ces modèles numériques, S. Blin (ENS/CNRS - UMR 8546 AOROC) a proposé en 2018 d'interpréter ces

blocs en tant qu'éléments de gradins gallo-romains. Cette interprétation a conduit M. Fuchs à formuler l'hypothèse que les arcs de cercles observés en prospection correspondent à des éléments d'un édifice de spectacle antique sur lequel un château médiéval aurait été bâti [7]. Cette hypothèse s'accorde avec les données archéologiques, géophysiques et topographiques du lieu ainsi que sa situation en périphérie d'une importante agglomération

[3] Les collectes de mobilier céramique ont été réalisées à intervalles irréguliers au fil des années, au pied de la berge de l'étang, lors des basses eaux de la nappe phréatique et après les périodes de dégel qui érodent régulièrement le dépotoir. Le mobilier ainsi collecté a fait l'objet d'une première étude céramologique en 2017 par Elise Arnold, puis une étude complémentaire et de synthèse par Jérôme Kraft en 2019 (Archéologie Alsace). Ces éléments seront intégrés en 2020 au rapport global des opérations : FUCHS (dir.), à paraître.

[4] Mesures réalisées dans le cadre d'une intervention du Pôle d'Archéologie Interdépartemental Rhénan (PAIR).

[5] Mesures réalisées dans le cadre d'une intervention d'Archéologie Alsace (qui a remplacé le PAIR).

[6] Mesures réalisées dans le cadre d'une intervention de l'UMR 7516 IPGS (CNRS/Unistra).

[7] FUCHS (dir.), à paraître. Cette hypothèse a été présentée au Service Régional de l'Archéologie, et assortie d'une demande d'autorisation de sondage. L'ensemble des données archéologiques et géophysiques collectées depuis 1993 fera l'objet d'un rapport de synthèse, à paraître en 2020, et d'un article, à paraître en 2021.

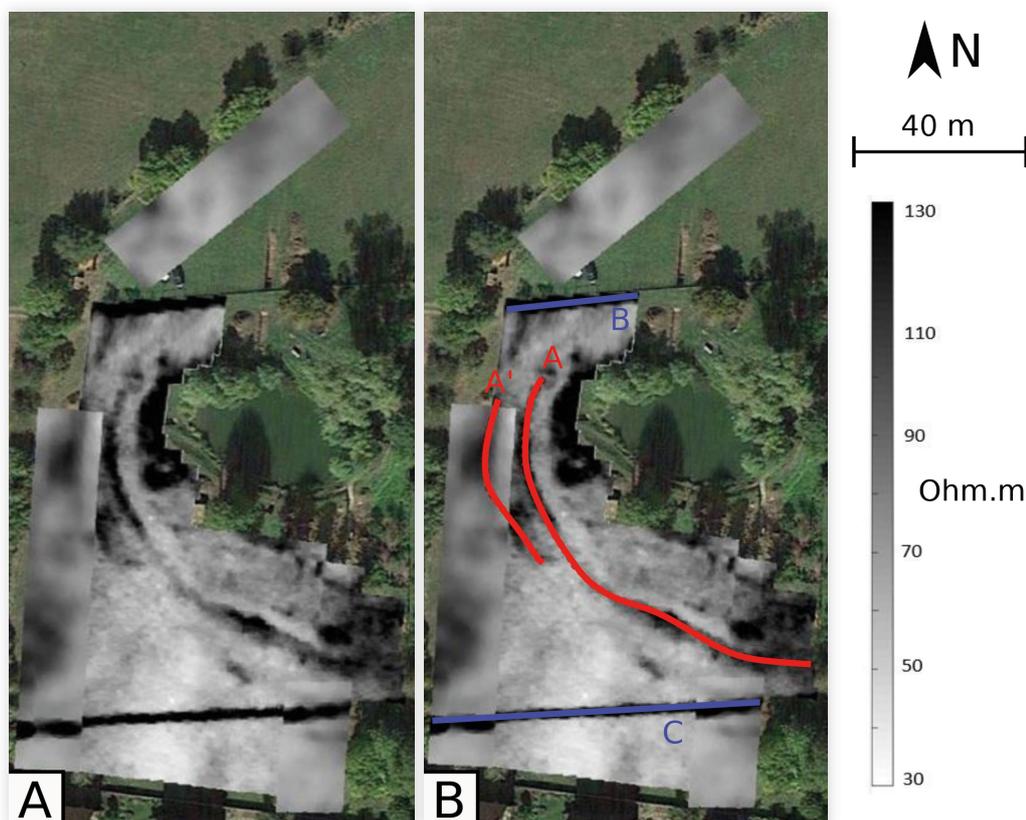


Figure 3

A. combinaison des cartes de la résistivité électrique apparente intégrant 0,5 m de profondeur calculées à partir des données de 2009 et de 2018 à travers différentes méthodes d'interprétation ;

B. même image avec mise en évidence en rouge des anomalies de résistivité apparentes A et A' interprétées comme des éléments en pierre et en bleu les anomalies B et C interprétées comme des structures modernes.

antique (*vicus* de Horbourg). C'est dans ce contexte et afin d'explorer cette hypothèse qu'ont été organisées en septembre-octobre 2018 des prospections géophysiques complémentaires [8] assorties d'une série de tranchées de sondages.

Différentes méthodes géophysiques ont été testées pour évaluer tout d'abord si ces dernières permettent de repérer les vestiges archéologiques suspectés sur ce site. Les techniques utilisées se basent sur les contrastes de différents paramètres physiques que les vestiges peuvent présenter avec leur encaissant : des contrastes d'aimantation pour les méthodes magnétiques, de résistivité électrique apparente pour la méthode électrique et de permittivité diélectrique pour la méthode électromagnétique à haute fréquence (radar). L'étude du site de Kreuzfeld en 2008 et 2012, situé à environ 1 km au sud-ouest, permet de préciser le contexte géologique de la zone : un sol limoneux post-antique repose sur une nappe argileuse de débordement. La campagne de prospection magnétique complétant cette étude archéologique a permis la détection d'habitats antiques, du fait du contraste d'aimantation entre l'encaissant et les matériaux constituant le bâti [9]. Un contexte similaire est alors attendu sur notre site d'étude. Les résultats concluants ont été utilisés pour guider des sondages afin de comprendre la répartition à grande échelle de l'enceinte du château médiéval et du théâtre gallo-romain supposé.

MÉTHODES MISES EN ŒUVRE

Quatre méthodes différentes de prospection géophysique ont donc été mises en œuvre sur le site : la méthode magnétique dans deux configurations (différence de composante verticale et champ total), une méthode électrique et une méthode électromagnétique à haute fréquence (radar). Les méthodes électrique et magnétique ont été utilisées de manière extensive, couvrant toute la zone accessible. En la quasi absence d'informations antérieures aux prospections, il a été jugé pertinent d'utiliser ces techniques de cartographie étendues. Bien que le contexte géologique ne soit pas favorable, la méthode radar a été utilisée en complément à titre expérimental, en réalisant des profils

perpendiculaires aux anomalies dévoilées par les méthodes électrique et magnétique afin de renforcer ou non l'hypothèse de la présence de structures.

MÉTHODES MAGNÉTIQUES

Les mesures magnétiques permettent de quantifier et de cartographier les variations spatiales (anomalies) du champ magnétique liées à des variations d'aimantation dans le sous-sol. Les vestiges de murs ou de fondations composés de blocs de grès ou de calcaire dans un encaissant limono-argileux, comme c'est a priori le cas sur le site d'après l'étude réalisée à Kreuzfeld [10], peuvent être à l'origine d'anomalies mesurables en surface.

Pour la mesure magnétique du champ total, l'appareil de mesure utilisé est un dispositif mis au point par l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) et utilisant des magnétomètres trois composantes [11]. Ce type de dispositif permet la mesure multi-capteurs et de compenser les effets de l'équipement avec un niveau de précision final similaire à celui de magnétomètres scalaires [12]. Dans l'objectif d'affiner la carte de l'anomalie de l'intensité du champ total réalisée en 2017, des mesures complémentaires de plus haute résolution ont été réalisées en septembre 2018 : l'écartement entre les capteurs et la hauteur des mesures sont réduits (de 0,5 m à 0,11 m pour l'écartement inter-capteurs et de 0,8 m à 0,3 m pour la hauteur des mesures). L'appareil est muni de 5 magnétomètres ainsi que d'un dispositif GNSS différentiel permettant un géoréférencement des données avec une précision d'environ 0,05 m.

La mesure de la différence de la composante verticale du champ magnétique terrestre (pseudo-gradient vertical) a été réalisée avec l'appareil MXPDA de *Sensys* dans le cadre des mesures de 2017. Le système est muni de 5 gradiomètres fluxgate espacés de 0,5 m, chaque gradiomètre comprenant une sonde verticale à chaque extrémité qui permet l'enregistrement direct de la différence de l'intensité de la composante verticale du champ magnétique sur ces 0,65 m.

MÉTHODE ÉLECTRIQUE

La méthode électrique permet de mesurer les variations spatiales de résistivité électrique

[8] Pour plus de détails sur l'aspect complémentaire des différentes méthodes géophysiques, voir par exemple WATTERS 2009.

[9] SIMON 2012.

[10] *Ibid.*

[11] GAVAZZI *et al.* 2016.

[12] GAVAZZI *et al.* 2019.

apparente. D'après le contexte géo-archéologique décrit en début d'article, on s'attend à des vestiges de fondations ou de murs constitués de blocs de grès ou de calcaire qui donc, peuvent présenter des contrastes de résistivité électrique par rapport à l'encaissant limono-argileux. La résistivité apparente a été mesurée avec l'appareil RM85 développé par *Geoscan*. Il est muni de 4 électrodes mobiles espacées de 0,5 m et reliées à deux autres électrodes fixes (situées à une distance suffisamment éloignée des mobiles pour être considérées à une distance infinie). Cette installation permet une mesure en mode pôle-pôle, adaptée au contexte archéologique [13]. Ce dispositif permet de réaliser trois cartes des contrastes de résistivité apparente à trois profondeurs (0,5 m, 1 m et 1,5 m) en fonction de l'écartement inter-électrodes. L'appareil est déplacé tous les mètres et six mesures sont faites à chaque fois : trois mesures pour la carte de résistivité apparente intégrant 0,5 m de profondeur, deux pour celle intégrant 1 m de profondeur et une pour celle intégrant 1,5 m de profondeur. L'acquisition a été réalisée en deux temps : une première campagne en 2009, puis des mesures complémentaires en 2018. Le protocole d'acquisition des données est le même d'une prospection à l'autre. En revanche, les paramètres d'interpolation peuvent différer entre les données de 2009 et celles de 2018. En effet, pour les données de 2009 seules les cartes finales ont été utilisées dans le cadre de l'étude, sans connaître les paramètres exacts de l'interpolation, autres que le fait que le traitement des données a été fait à l'aide de *WuMapPy* [14]. Pour les données de 2018, l'interpolation a été réalisée à l'aide de l'extension *Archaeological Geophysics Toolbox* (AGT) pour QGIS [15]. Une moyenne mobile prenant en compte les données dans un cercle de 1,5m de rayon est calculée à chaque point de mesure. À chaque moyenne mobile de résistivité apparente calculée, une teinte de couleur est associée pour remplir le cercle.

MÉTHODE RADAR

Le principe de la méthode est l'émission d'une onde électromagnétique à une haute fréquence, c'est-à-dire une onde radar. L'onde se réfléchit au niveau d'interfaces où des contrastes de permittivité diélectrique sont présents, ce qui peut être le cas lorsqu'une fondation ou un mur est présent à faible profondeur (quelques dizaines de centimètres au plus) au milieu d'un encaissant limono-argileux. En effet, les ondes radar sont atténuées trop rapidement dans ce genre de contexte

pour espérer pénétrer plus profondément. Les mesures radar ont été réalisées en 2018 en suivant 8 profils avec l'antenne 250 MHz X3M développée par *Mala*. Plusieurs traitements sont effectués sur les données brutes : décalage du premier train de réflecteur, filtre passe-haut, amplification du signal en le multipliant par l'inverse de son enveloppe, filtre passe bande (180MHz - 260 MHz), filtrage des réflecteurs plats et égalisateur d'énergie.

SONDAGES

Des tranchées de sondage ont été réalisées au mois d'octobre 2018 ; trois sondages selon un principe de recoupement perpendiculaire de l'anomalie curviligne la plus étendue, au sud, à l'ouest et au nord, ainsi que huit sondages complémentaires plus limités. Des profils radars ont été réalisés selon le même principe de recoupement, avant la réalisation des tranchées. Les tranchées de sondage ont été réalisées à la pelle mécanique équipée d'un godet de curage, jusqu'à atteindre le substrat [16].

RÉSULTATS

MÉTHODE ÉLECTRIQUE

La carte de résistivité apparente intégrant une profondeur de 0,5 m (**fig. 3**) révèle une anomalie allongée formant un arc de cercle long d'une centaine de mètre (anomalie A). Ce contraste varie entre 10 et 90 ohm.m avec l'encaissant. Dans la partie ouest, sur un peu moins de la moitié de la longueur, une deuxième anomalie (anomalie A') similaire et parallèle apparaît (**fig. 3**). L'intensité et la forme de ces anomalies suggèrent la présence de structures en pierre potentiellement maçonnées dans l'encaissant limono-argileux. La variation de l'intensité de ces anomalies alors que l'encaissant est a priori le même pourrait s'expliquer par une différence d'état de conservation ou de démantèlement des structures, les parties avec le plus fort contraste correspondant aux parties les mieux conservées. Au vu du contexte archéologique, il pourrait s'agir aussi bien d'éléments du théâtre gallo-romain que du château médiéval.

[13] MARTINAUD 1990.

[14] Pour plus de détails sur le logiciel voir MARTY *et al.* 2015.

[15] Pour plus de détails sur l'extension, voir HULIN, SIMON & HATAMI 2017.

[16] FUCHS (dir.), à paraître.

Deux anomalies (> 130 ohm.m), rectilignes orientées est-ouest, présumées de la présence de structures anthropiques au nord et au sud de la carte de résistivité apparente (**fig. 3**). Un chemin couramment emprunté par des véhicules, où le sol est tassé, est responsable du contraste de résistivité apparente au nord (anomalie B). La comparaison de la carte de résistivité électrique avec le cadastre des années 1950 démontre que le contraste au sud est dû à la présence d'une allée aujourd'hui disparue (anomalie C).

Les différences de signal pour les mêmes anomalies entre les résultats de 2009 et 2018, notamment pour l'anomalie C, peuvent s'expliquer par deux facteurs. Le décalage spatial s'explique par les imprécisions du positionnement (positionnement relatif sur profil, puis 4 coins géoréférencés au GNSS différentiel), tandis que les variations d'intensité et d'étalement peuvent s'expliquer par des variations de flux hydriques entre les deux périodes d'acquisition. Les cartes de la résistivité apparente intégrant 1 m et 1,5 m ne sont pas montrées ici car les anomalies A et A' y sont visibles mais de façon moins résolutive que sur la carte intégrant 0,5 m, contrairement à l'anomalie C qui disparaît. Ce qui

permet simplement de dire que les anomalies A et A' correspondent à des structures qui ne sont pas superficielles et à faible enfouissement.

MÉTHODES MAGNÉTIQUES

Les cartes de l'anomalie de l'intensité du champ magnétique total à haute résolution (**fig. 4**) et de la différence de la composante verticale (pseudo gradient) du champ magnétique (**fig. 5**) révèlent une anomalie allongée formant un arc de cercle long d'une trentaine de mètres. Ce contraste d'aimantation génère une anomalie d'une amplitude d'environ 40 nT [17] sur la carte du champ total et d'au maximum 15 nT sur la carte du pseudo-gradient. L'analyse de cette anomalie est similaire à celle faite pour les anomalies de résistivité électrique : l'intensité ainsi que la forme suggèrent la présence d'élément du théâtre romain ou du château médiéval. Cependant, même si les deux anomalies sont superposées, elles ne sont pas de la même longueur : le contraste d'aimantation est moins étendu que le contraste de résistivité électrique, ce qui suggère des sources différentes entre l'anomalie de résistivité électrique et l'anomalie magnétique. Quelques anomalies ponctuelles de fortes amplitudes sont présentes sur les cartes de l'anomalie de l'intensité du champ total et du pseudo gradient magnétique vertical (**fig. 5**). Elles sont probablement dues à des éléments métalliques d'époque contemporaine.

[17] L'unité utilisée pour la mesure de l'intensité du champ magnétique est le nano Tesla, noté nT. Pour la mesure du pseudo-gradient, l'unité est toujours le nT, bien qu'il s'agisse alors d'une différence d'intensité.

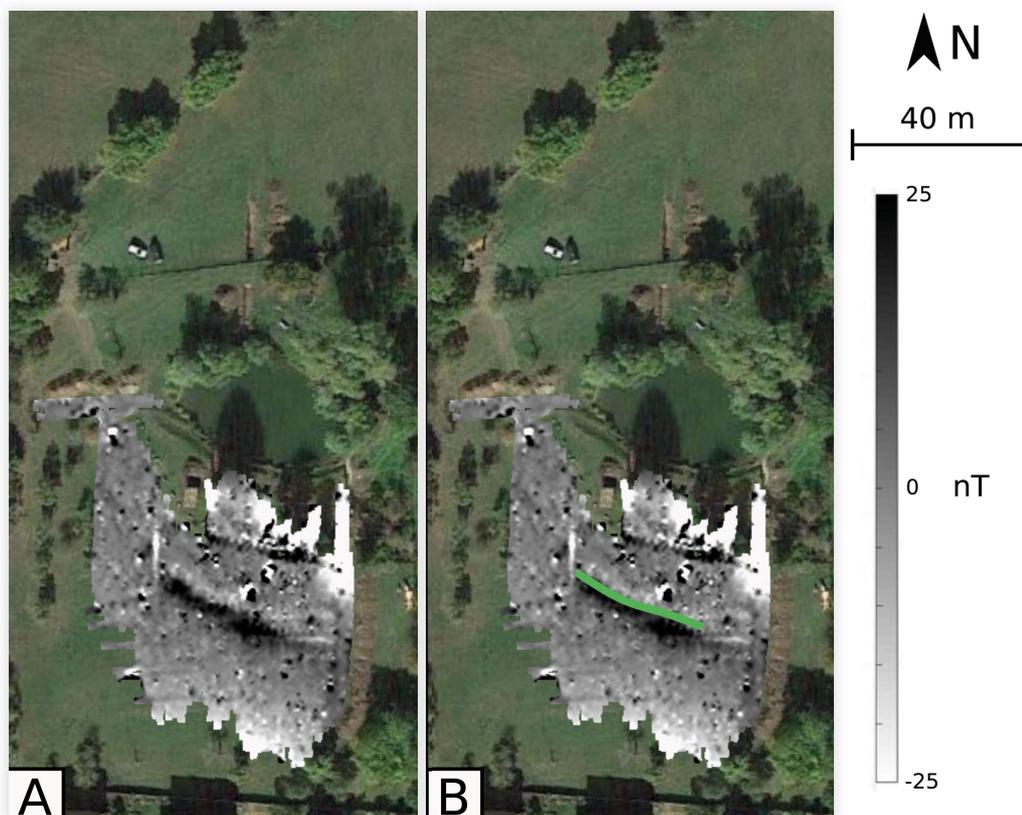


Figure 4
A. Carte de l'anomalie de l'intensité du champ magnétique acquise en 2018 ;
B. même image avec mise en évidence en vert de l'anomalie interprétée comme témoin d'une structure archéologique.

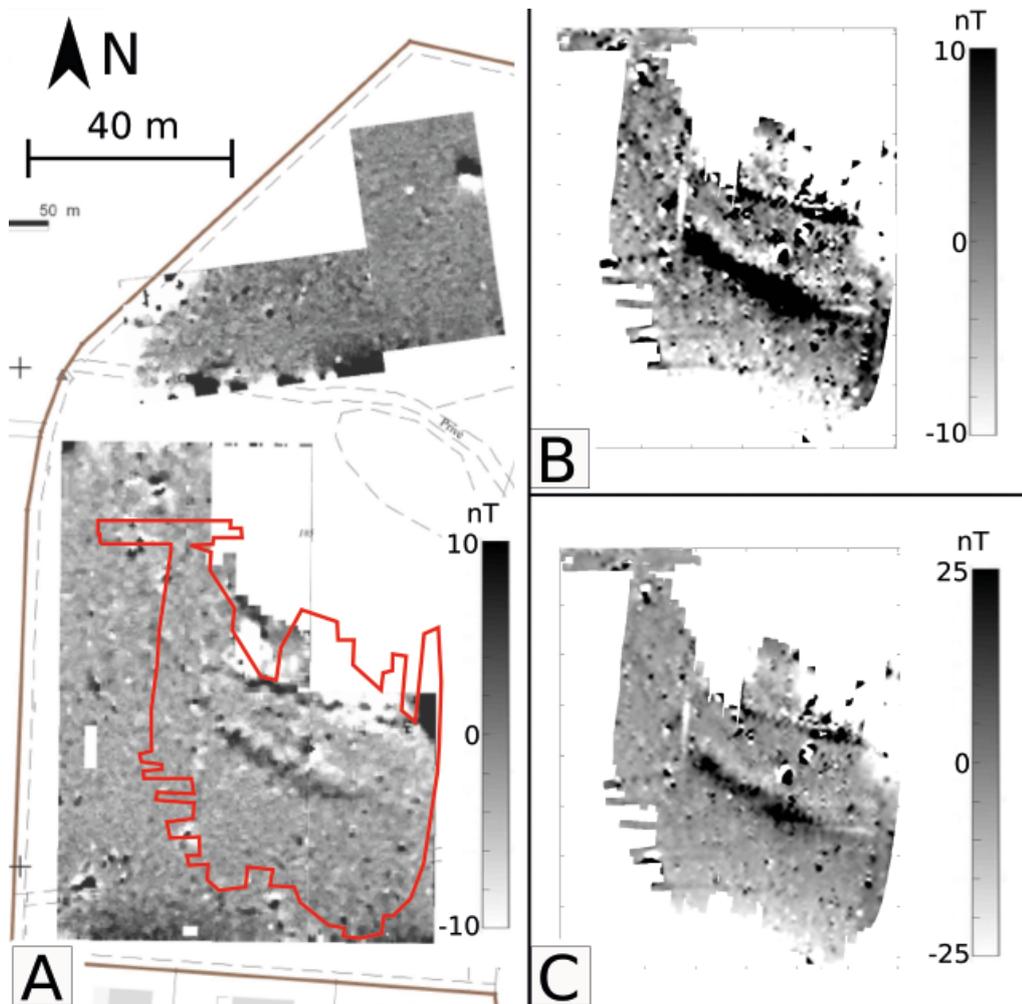


Figure 5

A. Carte du pseudo-gradient vertical du champ magnétique, échelle de couleur de -10 à 10 nT, le trait rouge délimite la zone présentée en B et C, modifié d'après un document interne d'Archéologie Alsace (Florian Basoge, 2017) ;

B. Carte de l'anomalie de l'intensité magnétique mesurée en 2018, échelle de couleur de -10 à 10 nT ;

C. Carte de l'anomalie de l'intensité magnétique mesurée en 2018, échelle de couleur de -25 à 25 nT.

MÉTHODE RADAR

Les résultats du profil n°1 (**fig. 6**) montrent un premier groupe de réflecteurs subhorizontaux et continu aux environs du quinzième mètre. C'est l'endroit où l'anomalie électrique A recoupe le profil 1. Une forte concentration de réflecteurs discontinus

est constatée sur les quinze derniers mètres du profil. La profondeur maximale de pénétration de l'onde radar (**fig. 6**) est de 0,6 m sur le profil n°1. Elle est calculée en prenant en compte une vitesse de propagation de l'onde de 0,03 m/ns, trouvée avec la méthode de modélisation d'hyperboles.

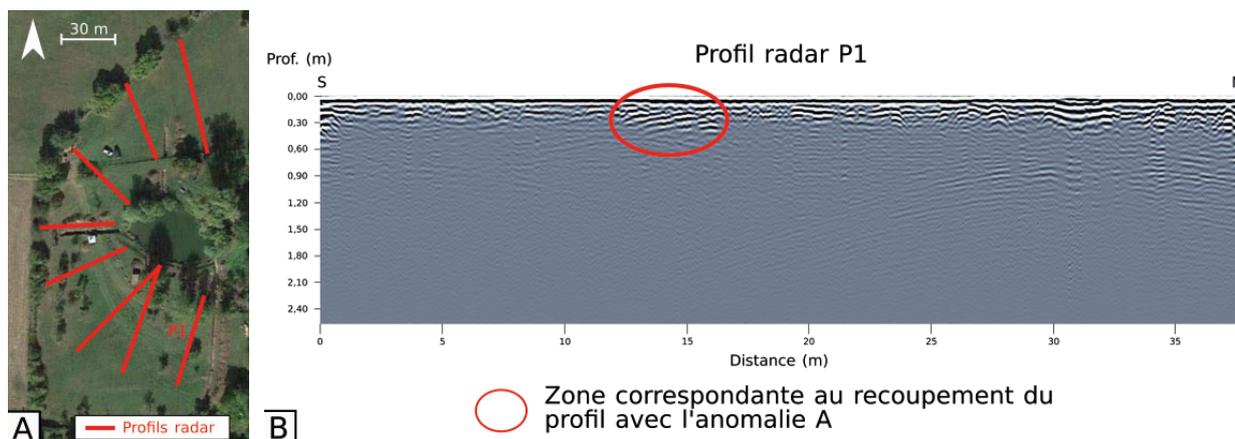


Figure 6

A. Positionnement des profils radar sur fond d'image satellite Google Earth (2018) et indication du profil P1 ;

B. Profil radar P1 et positionnement de la zone qui correspond au recoupement du profil avec l'anomalie A identifiée lors de la prospection électrique.

Les 7 autres profils présentent la même profondeur d'investigation. Sur tous les profils, si l'on peut noter des groupes de réflecteurs au niveau des recoupements avec les anomalies identifiées par les autres méthodes, on remarque également d'autres groupes de réflecteurs qui correspondent vraisemblablement à des hétérogénéités non archéologiques de très proche surface. Au vu de cette observation et de la faible profondeur de pénétration, il a été décidé par la suite d'utiliser le radar seulement pour vérifier si un groupe de réflecteur est présent au niveau des anomalies identifiées à l'aide des autres méthodes.

LES TRANCHÉES DE SONDAGE

On ne s'intéressera ici qu'aux sondages 1, 2 et 11 car ils permettent de comprendre le lien entre les signaux géophysiques de surface et les structures archéologiques présentes dans le sous-sol (**fig. 7**). Le sondage 1 a été réalisé perpendiculairement aux anomalies A et C. Le sondage 2 a été réalisé perpendiculairement aux anomalies A et A'. Le sondage 11 a été réalisé en ciblant une anomalie magnétique d'intensité particulièrement forte. Pour les profils 1 et 2, un profil radar suivant la même implantation a été mesuré en amont de la fouille.

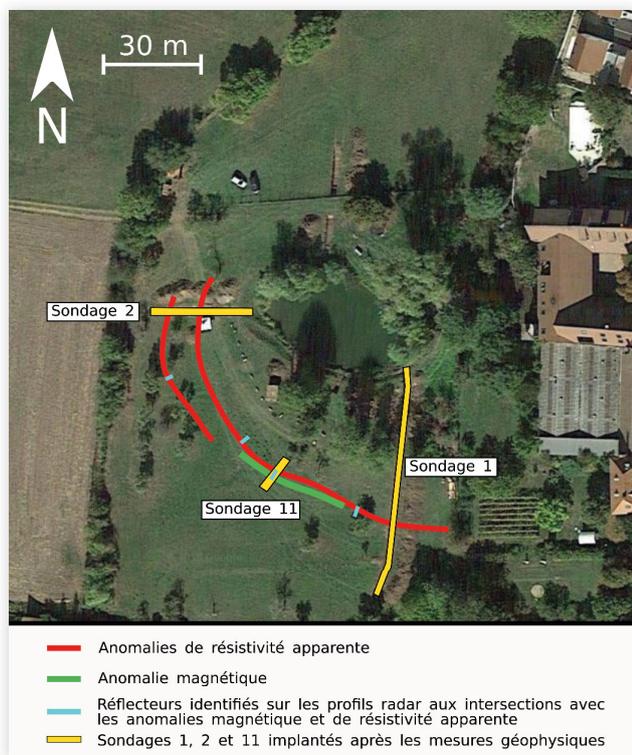


Figure 7
Carte d'implantation des sondages 1, 2 et 11 par rapport aux interprétations géophysiques. Fond de carte satellite issu de Google Earth (cliché 2018).

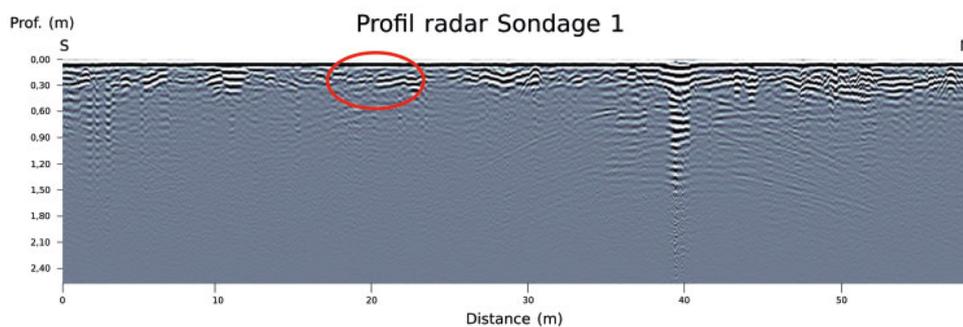
Le sondage 1 (**fig. 8**) met en évidence au niveau de l'anomalie A des indices très ténus d'une fondation pillée et bordée par un fossé comblé par les matériaux de la fondation (moellons calcaires). On note également un groupe de réflecteurs associés sur le profil radar correspondant.

Le sondage 2 (**fig. 9**) met en évidence les restes d'une fondation pillée mais présentant encore une forte concentration de moellons à l'emplacement de l'anomalie curviligne A. Ce sondage montre également que l'anomalie électrique A' correspond au rejet du gravier issu du creusement du fossé, épousant ainsi également une forme curviligne et parallèle à la structure. Un groupe de réflecteurs est également présent à cet endroit sur le profil radar.

Enfin, le sondage 11 (**fig. 10**) met en évidence, en sus des restes de fondation au niveau de l'anomalie A, une concentration importante de tuiles et de briques en terre cuite dans le remplissage du fossé au niveau de l'anomalie magnétique. Un groupe de réflecteurs est présent à cet endroit sur le profil radar.

Au final, ces trois sondages permettent d'interpréter l'anomalie A comme l'association des restes d'une fondation d'une structure bâtie et d'un fossé associé aujourd'hui comblé. Le contraste de résistivité provenant probablement du contraste entre les blocs de la fondation et du comblement du fossé avec l'encaissant. De façon similaire, l'anomalie A' témoigne du contraste entre des déblais de creusement du fossé et l'encaissant. L'anomalie magnétique quant à elle traduit une zone où le comblement du fossé montre une forte concentration en éléments en terre cuite. Les réflecteurs observés au radar correspondent probablement également aux blocs lorsque l'enfouissement est inférieur à 0,6 m.

On peut alors interpréter les résultats géophysiques et des sondages de la façon suivante : la fondation est interprétée comme les vestiges du mur de soutènement du talus du théâtre, réutilisé en qualité de rempart du château médiéval et auquel a été ajouté un fossé comme un élément défensif complémentaire. Lors de la démolition du château, le fossé se retrouve partiellement comblé dont une partie par des matériaux de construction en terre cuite (tuiles et briques) qui se caractérisent par un contraste d'aimantation important avec l'encaissant. Les matériaux en pierre de calcaire et de grès ont ensuite fait l'objet eux-mêmes de récupération, ne laissant que la marque de fondations « fantômes » avec quelques débris. Ce phénomène de recyclage de matériaux est fréquent en plaine d'Alsace, où la pierre est rare et doit être importée de carrières relativement éloignées.



A  Zone correspondante au recoupement du profil radar avec l'anomalie A

Berme Ouest du sondage 1 au niveau de l'anomalie A



B  Fossé  Fondations

Figure 8

A. Profil radar mesuré au niveau du sondage 1 avant la fouille et positionnement du recoupement avec l'anomalie A ;

B. Photographie (H. Reiller, 2018) et interprétations de la berme Ouest du sondage 1 au niveau de l'intersection avec l'anomalie A.

DISCUSSIONS

Les campagnes de prospections électrique, magnétique et radar apportent des informations relatives aux contrastes du sous-sol qui permettent de comprendre la disposition de l'enceinte du château médiéval qui se surimpose sur la fondation antique. Cependant, aucun vestige de théâtre antique se distinguant de la reprise médiévale n'est spécifiquement imagé avec les méthodes géophysiques. Par ailleurs, aucun nouveau bloc d'architecture en grès qui indiquerait la présence de gradins n'a été retrouvé dans les sondages. Selon l'hypothèse de la présence d'un théâtre antique initial, on peut restituer le principe suivant : une *orchestra* bordée de gradins en pierre, sur un ou deux rangs, puis un talus en terre (*cavea*), supportant des bancs-gradins en bois, le talus étant lui-même ceinturé d'un mur de soutènement. Cette hypothèse est confortée par le fait que les blocs gradins ont été exclusivement mis au jour lors des travaux de creusement de l'étang en 1993 dans la zone centrale, formant un

demi-cercle. Dès lors, le talus de la *cavea* ayant été arasé, cet emplacement ne livre pas d'indice particulier. Dans une telle configuration, les prospections et sondages qui ont eu lieu au niveau de la butte, elle-même construite avec l'encaissant, ne présentent pas de contraste de résistivité électrique ou d'aimantation avec d'indices suffisants pour être mesurables.

Les matériaux constituant la fondation médiévale se manifestent par un contraste de résistivité apparente avec l'encaissant alors qu'ils n'entraînent aucune anomalie magnétique mesurable avec les techniques employées. Le contraste d'aimantation entre les pierres de calcaire et de grès et l'encaissant semble trop faible pour induire une perturbation du champ magnétique mesurable. Dans l'optique d'un élargissement de la zone de prospection avec pour objectif la détection du château, il est alors plutôt recommandé d'utiliser la méthode électrique.

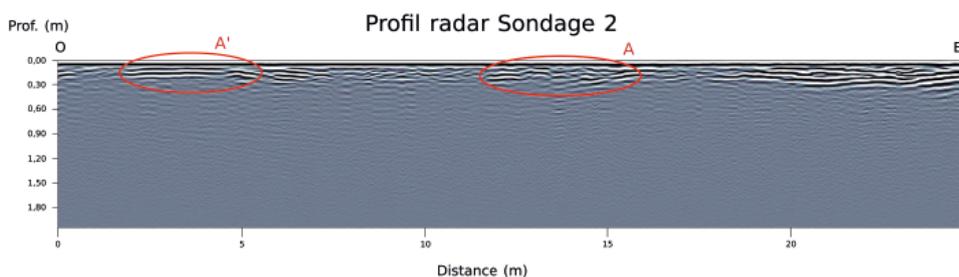
Au niveau des sondages effectués, les vestiges du château médiéval commencent à apparaître dans les 50 premiers centimètres de profondeur, ce qui en fait

des structures peu profondes a priori faciles à détecter. Cependant, l'encaissant de nature limono-argileuse complique, comme attendu, l'utilisation de la méthode radar. En effet, ce type de terrain généralement caractérisé comme conducteur, n'autorise ici une profondeur de pénétration des ondes radar hautes fréquences que de 0,4 m au maximum ; sa mise en œuvre permet néanmoins de repérer des vestiges lorsque les pierres constituant l'aplomb de la fondation sont situées dans les premiers centimètres. Les trois sondages montrent effectivement une cohérence des signaux radar avec la présence des vestiges de l'enceinte du château médiéval. Il paraît, malgré tout, peu pertinent d'étendre la prospection radar. En effet, étant donné l'état de conservation de la structure à imager, il est possible que la profondeur de son aplomb varie de plusieurs dizaines de centimètres sur le site d'étude. Par ailleurs, seuls 4 groupes de réflecteurs correspondant aux vestiges ont été relevés sur les 8 profils réalisés. De plus, la fin des profils est souvent caractérisée par une forte concentration de réflecteurs ponctuels et discontinus, empêchant toute analyse de vestiges de bâti.

L'absence d'homogénéité de la répartition des tuiles et briques en terre cuite dans le fossé peut être interprétée comme résultant des aléas des démolitions des superstructures des bâtiments du château.

Les deux cartes magnétiques permettent de réaliser la même interprétation : l'anomalie A est visible, sur une longueur de 30 mètres, que ce soit sur la carte du champ magnétique total ou du gradient magnétique vertical. En revanche, l'amplitude de l'anomalie sur la carte du champ total est d'environ 40 nT alors que sur la carte du gradient vertical elle n'est que d'environ 15 nT. Cette différence vient des méthodes de mesure. Ici la mesure de l'intensité du champ total semble être plus appropriée au contexte puisqu'elle permet de repérer des contrastes d'aimantations plus faibles ou des éléments à plus grande profondeur que la mesure du pseudo-gradient vertical.

Les prospections électrique et radar n'ont donné aucun résultat en termes d'interprétation archéologique au nord du site d'étude. La carte électrique à cet endroit n'est pas complète, mais il est envisageable d'étendre la prospection. La mesure électrique multi profondeur n'a pas donné de résultats



A  Zones correspondantes aux recoupements du profil radar avec les anomalies A et A'

Photographie du sondage 2 au niveau du recoupement avec l'anomalie A



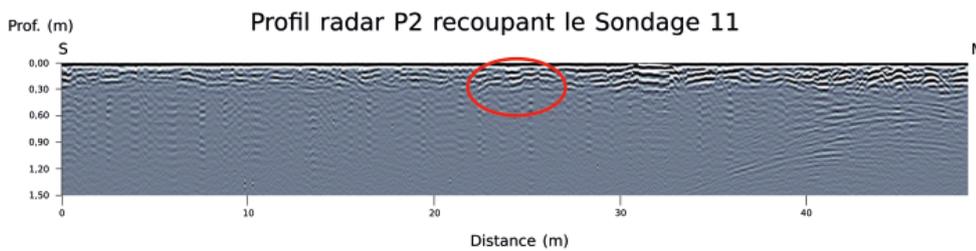
B

Fondations Fossé

Figure 9

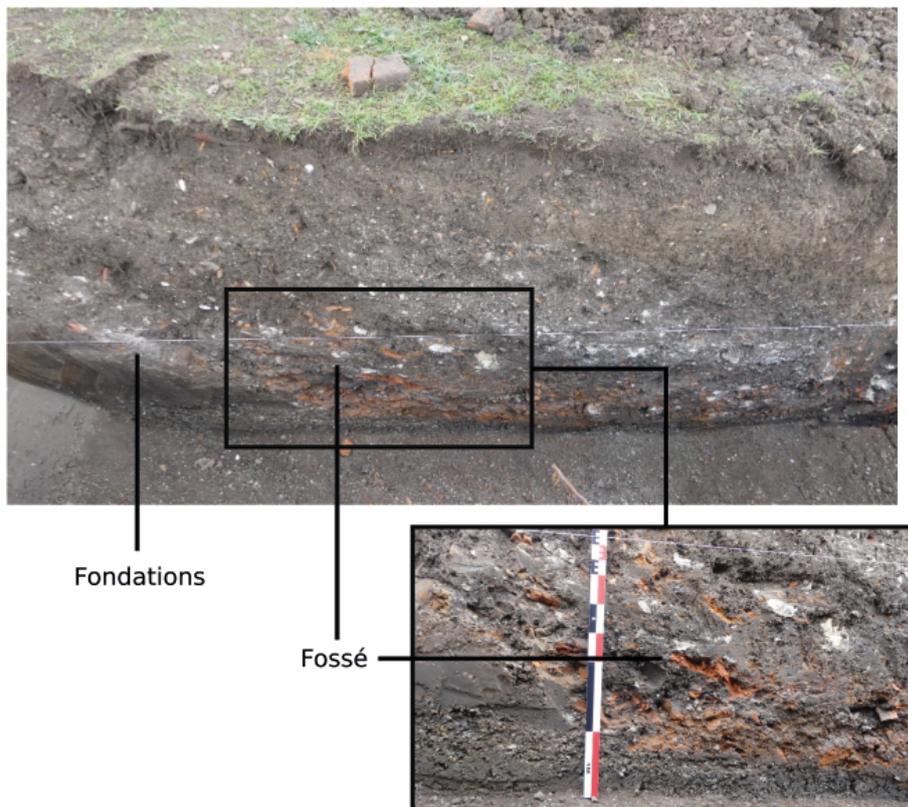
A. Profil radar mesuré au niveau du sondage 2 avant la fouille et positionnement du recoupement avec les anomalies A et A' ;

B. Photographie du sondage 2 au niveau du recoupement avec l'anomalie A (H. Reiller, 2018) et interprétations.



A  Zone correspondante au recouplement du profil radar avec l'anomalie A et l'anomalie magnétique

Berme Est du sondage 11 au niveau de l'anomalie A



B

Figure 10

A. Profil radar P2 recoupant le sondage 11 avant la fouille et positionnement du recouplement avec l'anomalie A et l'anomalie magnétique ;

B. Photographie du sondage 11 au niveau du recouplement avec l'anomalie A et l'anomalie magnétique (H. Reiller, 2018) et interprétations.

particuliers pour les structures étudiées : les résistivités apparentes à 1 m et 1,5 m intègrent des volumes trop importants pour être pertinents. En revanche, les trois profils radars réalisés n'ont montré aucun réflecteur dans cette zone, ce qui peut s'expliquer soit par l'absence de structures dans un état similaire à la partie sud, soit par une plus grande profondeur d'enfouissement. Il pourrait également être envisagé de réaliser une prospection magnétique dans la zone nord ; à savoir des mesures de champ total dans les mêmes conditions que la prospection au sud (capteurs resserrés à quelques centimètres du sol). Il serait aussi intéressant de réaliser quelques profils de tomographie de résistivité électrique afin de mieux comprendre la répartition en profondeur des structures identifiées et des différents niveaux constituant l'encaissant.

CONCLUSIONS

Cette approche expérimentale a permis de mettre en œuvre plusieurs méthodes de prospection géophysique assorties de vérifications archéologiques de terrain par la réalisation des tranchées de sondages. Si la méthode électrique est celle qui a livré le plus d'indices de structures anthropiques, la méthode magnétique a livré des indices complémentaires. Les deux méthodes permettent de caractériser des contrastes d'éléments de démolitions différents, apportant alors des résultats complémentaires pour l'interprétation. Les perturbations liées à la récupération de matériaux à plusieurs époques sur le site n'ont pas été propices à des signatures précises et aisément interprétables, l'état de conservation étant très mauvais.

Du point de vue de l'archéologie, ces investigations ont permis d'étayer l'hypothèse d'une succession d'un édifice de spectacle antique puis d'un château médiéval, sans toutefois apporter de preuves irréfutables mais plutôt un raisonnable faisceau d'indices. Il ne reste quasiment rien du théâtre, ses matériaux ayant été récupérés et la zone centrale ayant été détruite en 1993 par le creusement du nouvel étang. Le château semble avoir été implanté directement sur le talus du théâtre, mais il a lui-même été détruit et a fait l'objet de récupération de matériaux. Hormis

la présence d'un dépotoir de la fin du XVI^e - début du XVII^e siècle, très peu de mobilier archéologique a été découvert, rendant la datation de ces phases chronologiques très peu aisée. Ce site, aujourd'hui non menacé, présente l'intérêt d'être préservé et aisément accessible. Il est envisageable d'y tester de nouvelles méthodes ou protocoles et d'en faire la vérification à l'aide de sondages. Toutefois, pour une bonne compréhension archéologique et spatiale, il serait nécessaire de procéder à un décapage extensif dans un cadre d'archéologie programmée. ■

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier François-Xavier Simon et Florian Basoge (Archéologie Alsace) qui ont conduit respectivement les mesures électriques en 2009 et les mesures du gradient magnétique en 2017. Ils remercient M. Mathieu Koehl (INSA Strasbourg) pour la photogrammétrie et la modélisation de l'ensemble des blocs. Ils remercient également Séverine Blin (ENS/CNRS - UMR 8546 AOROC), pour son regard d'expert en architecture antique, qui a permis d'avancer, en mars 2018, l'hypothèse d'interprétation des blocs de grès comme des gradins provenant d'un édifice de spectacle. Leur reconnaissance va à l'équipe de bénévoles de l'association ARCHIHW, qui œuvrent depuis longtemps sur ce site (prospections, sondages, moulages, débroussaillage) et ont prêté leurs concours aux levés géophysiques. Ils remercient également chaleureusement les propriétaires, MM. Thomas et Nicolas Hirth et Olivier Nicolas pour la bienveillance constante dont ils ont fait preuve depuis 1993 pour autoriser les différentes recherches, archéologiques et géophysiques. Enfin, les auteurs tiennent à remercier les deux évaluateurs anonymes pour leurs commentaires et suggestions qui ont permis d'améliorer la qualité de l'article.

BIBLIOGRAPHIE

- FUCHS, Matthieu, 1996**, « Catalogue des collections lapidaires », dans Matthieu Fuchs (dir.), *Horbourg-Wihr. À la lumière de l'archéologie. Histoire et nouveauté. Mélanges offerts à Charles Bonnet*, Actes 2 d'Archihw, Horbourg-Wihr, 1996, p. 155-214.
- FUCHS, Matthieu (dir.), à paraître**, *Rapport de sondages archéologiques 2018*, Arrêté Préfectoral SRA Grand Est n°2018/A 313 portant autorisation de sondage archéologique - opération n° 017132.
- GAVAZZI, Bruno, LE MAIRE, Pauline, MUNSCHY, Marc & DECHAMP, Aline, 2016**, « Fluxgate vector magnetometers: A multisensor device for ground, UAV, and airborne magnetic surveys », *The Leading Edge* 35/9, p. 795-797, DOI: <https://dx.doi.org/10.1190/tle35090795.1>.
- GAVAZZI, Bruno, LE MAIRE, Pauline, MERCIER DE LÉPINAY, Jeanne, CALOU, Paul & MUNSCHY, Marc, 2019**, « Fluxgate three-component magnetometers for cost-effective ground, UAV and airborne magnetic surveys for industrial and academic geoscience applications and comparison with current industrial standards through case studies », *Geomechanics for Energy and the Environment* 20, article 100117, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gete.2019.03.002>.
- HERRENSCHNEIDER, Emile-Alphonse, 2016**, *Versuch einer Ortsgeschichte von Weier auf'm Land*, Colmar, 1890 ; *Il était une fois Wihr-en-Plaine*, Horbourg-Wihr, 2016 (trad française de l'éd. originale allemande de 1890, complétée et illustrée par Charles Beck).
- HULIN, Guillaume, SIMON, François-Xavier & HATAMI, Nariman, 2017**, « AGT – Archaeological Geophysics Toolbox for QGIS », *ISAP News* 51, p. 7-8.
- MARTINAUD, Michel, 1990**, « Intérêts du dispositif bipôle C-P en prospection électrique non-mécanisée », *Revue Archéométrie* 14, p. 5-16.
- MARTY, Philippe, DARRAS, Lionel, TABBAGH, Jeanne, BENECH, Christophe, SIMON, François-Xavier & THIESSON, Julien, 2015**, « WuMapPy, an open-source software for geophysical prospection data processing », *11th Conference for Archaeological Prospection*, Warszawa, p. 563-566.
- SIMON, François-Xavier, 2012**, *L'apport de l'outil géophysique pour la reconnaissance et la caractérisation des sites en archéologie préventive, méthodes et perspectives : exemples en Alsace*, Thèse de doctorat, Université Paris 6.
- WATTERS, Meg, 2009**, « The complementary nature of geophysical survey methods », in CAMPANA, Stefano & PIRO, Salvatore (dir.), *Seeing the Unseen, Geophysics and Landscape Archaeology*, p. 183-199.

DE NOUVELLES PERSPECTIVES POUR LES APPLICATIONS DES MÉTHODES ÉLECTROMAGNÉTIQUES BASSE FRÉQUENCE EN ARCHÉOLOGIE

François-Xavier SIMON^{1,2}, Julien GUILLEMOTEAU³, Guillaume HULIN^{1,4},
Joachim RIMPOT¹, Julien THIESSON⁴, Alain TABBAGH⁴

¹ Inrap, Direction Scientifique et Technique

² Université Bourgogne Franche-Comté, CNRS, UMR 6249 Chrono-Environnement

³ Université de Potsdam, Institut des Sciences de la Terre et Environnementales

⁴ Sorbonne Université, CNRS, EPHE, UMR 7619 Metis

RÉSUMÉ

La méthode électromagnétique basse fréquence (ou EMI pour ElectroMagnetic Induction), située à la croisée des méthodes magnétique, électrique et radar, offre de nombreuses possibilités de développement mais subit également d'importantes contraintes techniques. Malgré des développements instrumentaux initiés dans les années 60, son utilisation a longtemps été limitée en archéologie à la cartographie de la conductivité électrique apparente et/ou de la susceptibilité magnétique soit sur des surfaces restreintes soit avec des stratégies à large maille. Depuis la fin des années 2000, du fait de leur application en science du sol, les méthodes EMI se sont plus largement diffusées. Les appareils mono-fréquence et mono-récepteur ont ouvert la voie à des appareils multi-récepteurs et multi-fréquences avec des perspectives très larges en termes de caractérisation spatiale 3D des structures cartographiées comme d'analyse des propriétés physiques des sols. Le développement de systèmes tractés et automatisés a permis à cette méthode de trouver une place dans l'archéologie du paysage. Ce progrès technique, qui s'est traduit par une quantité importante de données, a prévalu sur un travail théorique approfondi illustré aujourd'hui par l'inversion de données et l'analyse des sensibilités aux différentes propriétés géophysiques qui ouvrent de larges perspectives. Nous évoquerons les limites instrumentales auxquelles ces applications doivent faire face mais sont souvent négligées par les utilisateurs de ces méthodes. Nous présenterons également le résultat de modélisations 1D et 3D.

MOTS-CLÉS

Prospection électromagnétique, inversion, susceptibilité magnétique complexe, conductivité électrique, permittivité diélectrique.

The low-frequency electromagnetic method (or EMI for ElectroMagnetic Induction), at the crossroads of the magnetic, electrical and GPR methods, offers many possibilities of development but is also limited by important technical constraints. In spite of instrumental developments initiated during the sixties, their use has long been limited in archaeology to the mapping of apparent electrical conductivity and/or magnetic susceptibility over restricted areas or with wide mesh sampling strategies. Since the end of the 2000s, due to their application in soil science, EMI methods have been widely diffused. Multi-coils and multi-frequency systems have replaced single-frequency and single-receiver devices, then opening up new perspectives in terms of 3D spatial characterization of buried features but also in terms of soil properties analysis. The development of towed systems has allowed application to landscape archaeology. This technical advance, which has been expressed in terms of amount of measurement, has prevailed over in-depth theoretical work nowadays illustrated by data inversion and analyses of sensitivity to the different geophysical properties. These two specific points, however, open up the soundness perspectives to future applications. We will discuss the instrumental limitations to which these applications face and which are often neglected by practitioners. We will also present the results of 1D and 3D modelling.

KEYWORDS

Electromagnetic survey, inversion, complex magnetic susceptibility, electrical conductivity, dielectric permittivity.

Article accepté après évaluation par deux experts selon le principe du double anonymat

Les méthodes électromagnétiques basse fréquence (<100kHz) ont très tôt trouvé leur place parmi les techniques pouvant être mises en œuvre pour la prospection archéologique. En effet, dès la fin des années 40, il a été démontré que les amas de tuiles et de terres cuites étaient à même de perturber les appareils électromagnétiques destinés à la détection de métaux [1]. Dès les années 60, des prototypes ont été construits et mis en œuvre sur le terrain [2]. Cependant, ce n'est que dans les années 70 qu'on a pu disposer d'appareils fréquentiels de type Slingram adaptés à la prospection archéologique [3]. Ces appareils à bobines, ou dipôle-dipôle sont aujourd'hui appelés EMI (pour ElectroMagnetic Induction). Ceux-ci ont connu un très fort développement dans les applications en agronomie pour la mesure de la conductivité électrique des sols [4]. Ils se sont avérés très robustes et relativement faciles d'utilisation mais seules quelques équipes spécialisées dans les méthodes électromagnétiques les ont mis en œuvre sur des sites archéologiques où ils permettent une cartographie simultanée de la conductivité électrique et de la susceptibilité magnétique [5].

Afin d'évaluer la pertinence et la nouveauté des approches actuellement développées avec les appareils électromagnétiques basse fréquence, il faut revenir brièvement (I) sur les principes physiques qui servent de base dans l'interprétation du signal électromagnétique, (II) sur les caractéristiques des propriétés géophysiques mesurées et leur liens avec les matériaux présents sur un site archéologique et (III) prendre en compte les facteurs techniques et électroniques qui contraignent la mise en œuvre des appareils sur le terrain.

Malgré ces contraintes, les méthodes électromagnétiques permettent aujourd'hui de s'intéresser à de nouvelles thématiques, dépassant largement une mise en œuvre orientée vers la seule cartographie de la conductivité électrique apparente des sols, plus simple à mesurer en pratique. Ces développements s'articulent autour de deux axes de recherche avec, d'une part la caractérisation multipropriété des sols, amorcée dès les années 70 et reposant aujourd'hui sur la disponibilité d'appareils multi-fréquences stables, et

d'autre part la restitution 3D des objets cartographiés rendue possible par la commercialisation d'appareils comportant plusieurs bobines réceptrices permettant les mesures à plusieurs profondeurs. Cet article, loin de se vouloir exhaustif sur ces questions, a pour ambition de situer les potentialités et développements futurs concernant les méthodes électromagnétiques. Ces développements font actuellement l'objet du projet ArchEM soutenu par la Direction Scientifique et Technique de l'Inrap en collaboration étroite avec les Universités de Potsdam et de Ghent ainsi qu'avec le laboratoire Metis (Sorbonne Université).

RAPPEL THÉORIQUE

Le fonctionnement des appareils électromagnétiques à basse fréquence est fondé sur l'émission d'un champ électromagnétique primaire qui se diffuse dans l'air et le sol. Dans le sol, ce champ induit une réponse, à l'origine d'un champ électromagnétique secondaire. Le signal mesuré par la ou les bobines de réception est la somme de ce champ primaire et de ce champ secondaire. Il dépend des caractéristiques géométriques (espacement entre les bobines émettrice et réceptrice, hauteur des bobines au-dessus du sol, orientation des bobines) et de la fréquence utilisée. Le champ secondaire est gouverné par les propriétés électromagnétiques du sol au nombre de trois : la conductivité électrique, la susceptibilité magnétique, la permittivité diélectrique. Le signal mesuré est séparé en deux parties, l'une synchrone avec le champ primaire appelée partie en phase et l'autre décalée d'un quart de période dénommée partie en quadrature.

LES PROPRIÉTÉS GÉOPHYSIQUES MESURÉES

La conductivité électrique, dans un sol, représente la capacité d'un corps à laisser passer le courant électrique. La conductivité électrique rencontrée dans les sols et les roches présente une large gamme de valeurs s'échelonnant de 0,1 à 1000 mS.m⁻¹. Elle caractérise le déplacement des charges électriques (en majorité

[1] SCOLLAR *et al.* 1990.

[2] COLANI & AITKEN 1966 ; HOWELL 1966.

[3] PARCHAS & TABBAGH 1978.

[4] DOOLITTLE *et al.* 2014.

des ions en solution dans les matériaux qui nous intéressent). Les paramètres qui influencent la conductivité électrique d'un matériau sont la teneur en argile, la porosité, la teneur en eau, la salinité et la température. La permittivité diélectrique, dans un sol, rend compte du déplacement des ions, limité à l'échelle microscopique (sur les feuillets d'argile ou dans les pores) et des rotations des molécules polarisées (eau).

Ces deux propriétés, en l'absence de variation de température ou de salinité des sols, permettent une discrimination claire des différents ensembles sédimentaires. On pourra prendre comme exemple de structure mettant en jeu des contrastes pertinents la présence d'un lit de gravier dans des alluvions fines. Les structures archéologiques entraînent elles aussi quasi-systématiquement des modifications spatiales des deux premiers paramètres électriques évoqués précédemment et leur mesure est donc primordiale pour la cartographie des sites archéologiques.

La susceptibilité magnétique, quant à elle, représente la capacité d'un corps à s'aimanter sous l'action d'un champ magnétique externe. Elle est depuis longtemps reconnue comme étant un marqueur fort de l'anthropisation des sols. Les phénomènes de chauffe (incendie de bâtiment, zone foyère, essartage), le taux de matière organique, les activités liées au travail du fer (présence de scories ou de battitures) sont autant de facteurs qui expliquent l'augmentation de la susceptibilité magnétique. Ils ont pour point commun de modifier la teneur et la composition des oxydes et hydroxydes de fer dans le sol, favorisant la formation de grains de magnétite ou de maghémite, principaux porteurs du signal magnétique. La variabilité observée pour cette propriété marque très bien les structures de chauffe ou les structures comblées avec des matériaux issus d'un sol superficiel (fosses, fossés, etc.). Cet enrichissement en oxydes magnétiques peut également trouver son origine dans des phénomènes purement naturels. La pédogenèse elle-même induit des phénomènes d'oxydo-réduction, donc des changements de susceptibilité magnétique dont l'importance est fonction des substrats en place. En milieu sédimentaire il est probable qu'une structure comblée par des horizons de sol superficiel présente une susceptibilité magnétique plus élevée que l'encaissant. La mesure de ce paramètre présente le plus souvent un retard par rapport au champ primaire appliqué. Ce retard oblige à considérer la susceptibilité comme une grandeur complexe comprenant une composante en phase et une composante en quadrature. On parle alors de susceptibilité en quadrature ou de viscosité magnétique [6]. Elle est d'abord dépendante de la taille et du type de grains d'oxydes de fer ferrimagnétiques. Dans certains cas (grains d'oxyde de petite

taille et n'interagissant pas entre eux [7]) la viscosité magnétique est constante quelle que soit la fréquence de mesure. Ceci a été vérifié pour les sols à l'exception des sites de production de fer ou en présence de substrats volcaniques. La viscosité magnétique est forte pour les petits grains mono-domaine (10 à 30 nm), faible pour les gros grains mono-domaine (1 µm) et à nouveau forte pour les gros grains multi-domaines (10 µm et plus).

L'évaluation conjointe de la viscosité magnétique et de la susceptibilité magnétique en phase permet donc d'estimer le niveau de pédogenèse, d'identifier l'incidence d'une chauffe ou la présence d'éléments métalliques ou volcaniques par la quantité et la taille des grains magnétiques présents. Elle est donc d'une importance considérable pour les applications en archéologie.

INTERPRÉTATION DU SIGNAL ÉLECTROMAGNÉTIQUE

À partir des équations de Maxwell il est possible de prédire et donc d'interpréter le signal électromagnétique. L'interprétation part en général de plusieurs approximations qui prennent en compte toutes les propriétés et le degré d'exactitude que l'on souhaite atteindre. Néanmoins, les caractéristiques de certains appareils ou les contextes pédologiques et géologiques peuvent rendre l'exploitation de certaines propriétés superflue [8].

Le premier critère à prendre en compte pour l'interprétation est le nombre d'induction. Il permet de considérer que l'intensité du champ secondaire en quadrature est, en première approximation, proportionnelle à la conductivité dans le cas où la conductivité électrique est inférieure à 100 mS.m⁻¹, la fréquence d'émission inférieure à 20 kHz et l'écartement des bobines inférieur à 2 m (cas du très faible nombre d'induction). Cette approximation [9] est très utilisée en science du sol mais la solution sans approximation [10], tient compte de tous les paramètres [11] et permet la détermination de la conductivité électrique apparente dans tous les cas (milieu salé, fréquence de mesure plus élevée, grand écart entre les bobines) quelle que soit la configuration de bobines employée.

[5] TABBAGH 1986a.

[6] DABAS & SKINNER 1993 ; MC NEILL 2013.

[7] NEEL 1949.

[8] SIMON *et al.* 2020.

[9] MC NEILL 1980.

[10] WARD & HOHMANN 1988 ; HUANG *et al.* 2000.

[11] THIESSON *et al.* 2014 ; GUILLEMOTEAU *et al.* 2016.

Cette hypothèse du très faible nombre d'induction permet également de relier directement le signal électromagnétique en phase à la seule susceptibilité magnétique. Sa mesure vient compléter et préciser ce qui peut être fait avec la méthode magnétique (très largement mise en œuvre dans le cadre de l'archéologie) où les anomalies mesurées ne permettent pas de discriminer la nature de l'aimantation ni de définir précisément la profondeur des structures. Les appareils EMI permettent quant à eux d'isoler la partie induite de l'aimantation et de mieux cerner la profondeur des structures.

Pour interpréter rigoureusement le signal en phase il est cependant nécessaire d'en soustraire l'effet de la conductivité électrique [12]. Cet effet est intrinsèquement pris en compte [13], lorsque l'on détermine simultanément conductivité et susceptibilité apparentes, par l'inversion jointe ou séquentielle des signaux en phase et quadrature.

Enfin, toujours à partir de l'interprétation jointe du signal en phase et en quadrature, mais en utilisant plusieurs fréquences, il est possible de déterminer la permittivité diélectrique apparente et la viscosité magnétique apparente [14]. Ce point est important car la permittivité diélectrique ne peut être négligée

pour les plus hautes fréquences ou dans certains contextes [15] et la viscosité magnétique peut fausser considérablement l'estimation de la conductivité électrique à partir du signal en quadrature [16].

INSTRUMENTATION

Le déploiement de ces instruments sur le terrain peut se faire de deux manières : soit un portage manuel soit un portage sur chariot ou luge (fig. 1). Le premier type de portage n'est à privilégier que pour les grands écartements car les petites variations de hauteur liées à la marche de l'utilisateur peuvent entraîner un bruit considérable sur les mesures réalisées avec de petits écartements. Ceci est particulièrement vrai pour la

[12] KLOSE *et al.* 2018.

[13] HUANG *et al.* 2000 ; GUILLEMOTEAU *et al.* 2016 ; SIMON *et al.* 2020.

[14] SIMON *et al.* 2020.

[15] BENECH *et al.* 2016b ; KESSOURI *et al.* 2015 ; SIMON *et al.* 2019.

[16] SIMON *et al.* 2015.



Figure 1

Présentation des différents systèmes d'acquisition. a. EM31-Geonics sur chariot – b. GEM2-Geophex en portage manuel – c. CMD Explorer-GF Instrument sur luge – d. GEM2-Geophex sur luge (crédit photo : Inrap).

mesure de la susceptibilité magnétique. Néanmoins l'emploi d'un chariot ou d'une luge implique soit un terrain particulièrement plat et régulier qui permet un déplacement optimal de l'appareil, soit un système, souvent lourd, qui absorbe les irrégularités du terrain mais qui nécessite alors la traction par un véhicule motorisé. Ces solutions de portage sur chariot ou luge peuvent considérablement réduire le bruit lors de l'acquisition des mesures.

Si les premiers prototypes Slingram EMI « portables », ou « à structure rigide », sont apparus dans les années 70, il existe désormais de nombreux appareils. Ces instruments peuvent être classés en trois catégories : les appareils mono-récepteur/mono-fréquence, les appareils mono-récepteur/multi-fréquences et les appareils multi-récepteurs/mono-fréquence. Il n'existe actuellement pas encore d'appareils multi-récepteurs/multi-fréquences.

L'orientation des bobines d'émission et de réception influe sur la profondeur d'investigation de l'appareil ainsi que sur sa sensibilité [17]. Les configurations les plus utilisées sont celles où les bobines sont dans un même plan (vertical ou horizontal) mais on trouve également chez certains constructeurs la configuration perpendiculaire.

Les appareils mono-récepteur/mono-fréquence ont assuré la première phase du développement dans les problématiques de très proche surface [18]. Le plus répandu est l'EM31 (Geonics Ltd) car il est particulièrement robuste et très bien adapté aux problématiques de caractérisation des formations superficielles sur les 6 premiers mètres.

Les appareils multi-écartements ou multi-configurations (CMD-Gf Instruments), DualEM-Dualem inc., EM38-MK2-Geonics Ltd) sont des appareils mono-fréquence. Ils permettent une mesure de la susceptibilité magnétique et de la conductivité électrique pour plusieurs profondeurs d'investigation.

Les appareils multi-fréquences sont tous en mode coplanaire (GEM2 Geophex, EMP400 GSSI, Nemfis Russian Academy of Sciences Siberian branch) et permettent la mesure simultanée de deux à trois des propriétés géophysiques en jeu mais ne disposent que d'un seul écartement de bobines donc qu'une seule profondeur d'investigation.

Les contraintes instrumentales qui caractérisent ces instruments ont largement limité le recours aux appareils EMI au cours des 50 dernières années. Les appareils EMI avec de grands écartements et des fréquences

relativement basses (type EM31) se sont avérés particulièrement stables et robustes mais plus adaptés à la caractérisation du contexte géologique qu'à celle des structures archéologiques. Pour la mesure du signal en phase deux problèmes doivent être pris en compte : la dérive instrumentale et la détermination du zéro instrumental.

LA DÉRIVE INSTRUMENTALE

La dérive instrumentale résulte de déformations thermiques et mécaniques au cours de la prospection qui ont pour conséquence de faire varier le signal au cours du temps. Cette dérive instrumentale est surtout significative pour les petits écartements et sur le signal en phase. La dynamique du signal lié à la conductivité électrique est souvent plus forte que celle de la susceptibilité magnétique, le rapport signal/bruit est alors plus élevé ce qui réduit l'impact d'une éventuelle dérive. Certains appareils, comme le GEM2, possèdent une bobine auxiliaire permettant l'annulation du champ primaire ce qui limite aussi la dérive. Ce système s'avère assez efficace mais a pour conséquence d'entraîner une modification du comportement et de la sensibilité de l'appareil. Il existe des protocoles de mesure permettant de corriger ces effets de dérive [19] qui peuvent s'avérer particulièrement efficaces mais qui nécessitent un mode d'acquisition rigoureux et contraignant sur le terrain. L'usage de ce type de protocole est néanmoins à encourager.

LA DÉTERMINATION DU ZÉRO INSTRUMENTAL (OFFSET)

Une autre caractéristique fortement contraignante pour les appareils électromagnétique basse fréquence est la détermination du zéro instrumental [20]. Les différents appareils actuellement disponibles sur le marché ont des comportements variables quant à ce zéro instrumental. En quadrature la plupart des appareils présentent une bonne stabilité de la valeur de décalage du zéro (DualEM, CMD). En phase aucun des appareils actuellement sur le marché ne présente une bonne stabilité. Pour les appareils multi-fréquences cet offset instrumental est particulièrement important et dépend de la technologie utilisée. Tout comme pour la dérive instrumentale il existe des solutions d'étalement qui permettent d'évaluer correctement ce décalage du zéro instrumental. Ces solutions peuvent s'avérer assez contraignantes et nécessitent dans certains cas le recours à des contrôles par d'autres

[17] TABBAGH 1986b.

[18] DOOLITTLE & BREVIK 2014.

[19] GRELLIER *et al.* 2013 ; DELEFORTRIE 2014.

[20] LAVOUE *et al.* 2010 ; THIESSON *et al.* 2014.

méthodes géophysiques (sondage ou panneau électrique par exemple). Néanmoins, il faut considérer l'étape d'étalonnage comme un prérequis indispensable à la mise en œuvre de cette méthode pour des mesures ayant pour but d'évaluer d'autres propriétés que la conductivité électrique, comme cela est le cas pour la prospection archéologique.

LES PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENTS

Bien que certains travaux traitent des problèmes d'offset, de dérive ou d'acquisition, la plupart d'entre eux s'orientent autour de deux axes. Le premier concerne la mise en évidence la plus exhaustive possible des différentes propriétés géophysiques des sols influençant les mesures EMI, le second axe est orienté sur les méthodes d'inversion des données pour remonter à ces propriétés. Ces deux axes intéressent l'archéologie avec, selon les cas, une influence directe sur les dynamiques de recherche chrono-culturelles (caractérisation de la viscosité magnétique et occupation des sols par exemple).

CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS GÉOPHYSIQUES :

Caractérisation des propriétés magnétiques complexes

La possibilité de s'intéresser aux propriétés magnétiques complexes des sols rend l'utilisation des appareils électromagnétiques particulièrement attractive dans le cas de l'archéologie.

La cartographie de la viscosité magnétique par l'information sur la taille des grains qu'elle fournit permet de préciser la nature des matériaux. On pourra ainsi discriminer une structure ou un sol lié à la chauffe (susceptibilité élevée, viscosité moyenne), d'un sol ayant subi une forte pédogenèse (susceptibilité moyenne, viscosité élevée), d'un substrat basaltique ou encore de particules métalliques (susceptibilité élevée, viscosité faible).

Pour déterminer les valeurs de susceptibilité magnétique complexe il

faut des fréquences basses afin que l'intensité des réponses dues à la conductivité électrique ne soit pas trop dominante. Cette détermination repose aussi sur le fait que la profondeur d'investigation associée à la conductivité électrique varie peu quelle que soit la fréquence de mesure. Cependant si on s'éloigne du très faible nombre d'induction cette assertion est de moins en moins justifiée. Cette technique a été mise en œuvre avec l'EMP400 sur le site de Lieu-Dieu (Puy-de-Dôme) [21]. Ce site a fait l'objet d'une cartographie électromagnétique en 2014 dans le but de restituer l'organisation des murs d'une villa gallo-romaine. Les cartes de susceptibilité ont permis de reconnaître de nombreuses anomalies correspondant aux murs du bâtiment antique. Les mesures de viscosité ont permis d'aller plus loin puisqu'une discrimination entre pédogenèse, structure ayant subi une chauffe (ici des terres cuites architecturales et du béton de tuileau), et roche basaltique a pu être établie (fig. 2).

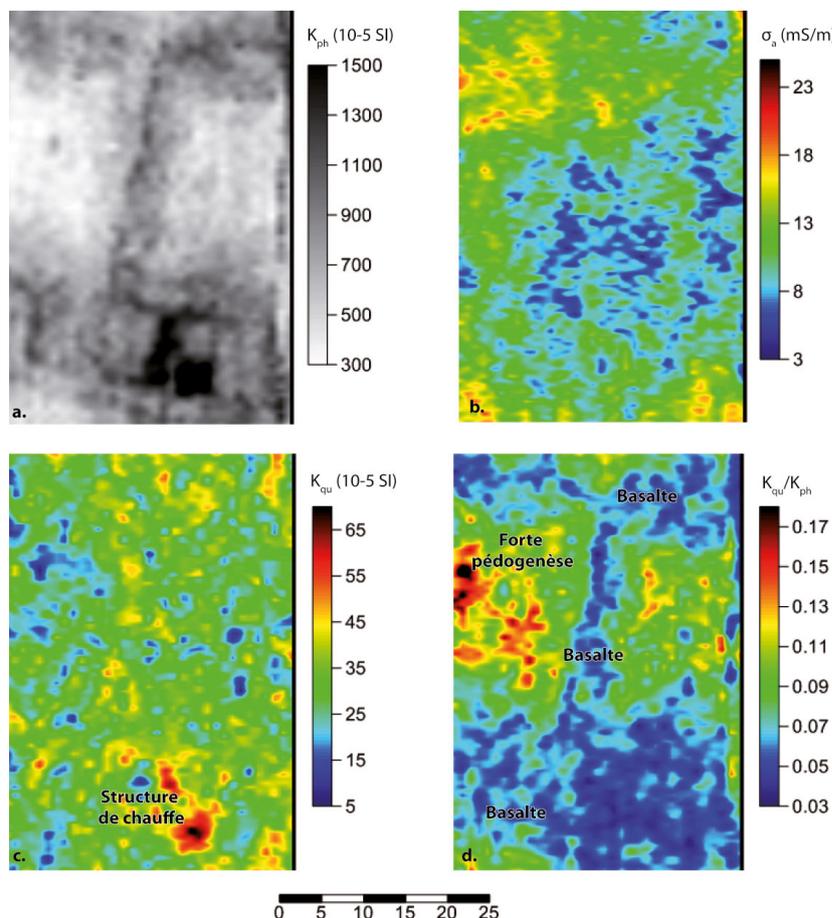


Figure 2

Cartes obtenues avec l'EMP400 en mode VCP sur le site de Lieu-Dieu (Puy-de-Dôme). **a.** Carte de susceptibilité magnétique apparente (15 kHz) – **b.** Carte de conductivité électrique apparente (15 kHz) – **c.** Carte de viscosité magnétique apparente – **d.** Carte du rapport de viscosité magnétique sur la susceptibilité magnétique, représentative de la taille des grains en jeu dans le signal magnétique.

[21] SIMON *et al.* 2015.

Caractérisation de la permittivité diélectrique

Il a été observé pour les mesures aux plus hautes fréquences (proches de 90 kHz) et dans l'hypothèse d'un terrain homogène que la prise en compte des effets de la conductivité ne suffisait pas pour déterminer la susceptibilité magnétique à partir du signal en phase [22]. Pour des valeurs relativement élevées de la permittivité diélectrique, il existe une contribution significative de celle-ci sur le signal en phase, même si la fréquence de mesure reste peu élevée [23]. Il est, en l'état actuel des connaissances, encore difficile de préciser la gamme de valeurs pouvant être attendue pour la permittivité, mais elle s'échelonne entre 10 et 100000 et est fortement dépendante de la fréquence de mesure [24]. La cartographie de cette propriété repose actuellement sur un étalonnage de l'appareil de mesure très rigoureux avec des fréquences de mesures élevées. Actuellement seul le GEM2 permet de disposer de fréquences de cet ordre mais l'estimation de la permittivité peut être mise en défaut par les inexactitudes de l'étalonnage de l'appareil.

La figure 3 présente les résultats de la caractérisation de la conductivité électrique et de la permittivité diélectrique (à partir du signal en phase) sur le diagnostic de Marliens (Côte-d'Or), effectué en 2017 sous la responsabilité de Didier Lamotte (Inrap). Sur ce secteur les valeurs de susceptibilité magnétique sont très faibles comme cela a pu être observé aux plus basses fréquences ; la différence observée entre le signal en phase et celui en quadrature aux plus hautes fréquences peut donc trouver son origine ailleurs que dans la conductivité électrique. Il reste néanmoins à travailler sur les phénomènes à l'origine de la permittivité apparente pour pouvoir préciser à quoi sont dues les variations observées.

MÉTHODE D'IMAGERIE (OU INVERSION DES DONNÉES)

La commercialisation des appareils multi-récepteurs a également entraîné un regain d'intérêt pour l'inversion des données électromagnétiques 1D comme 3D. Le terme d'inversion est utilisé en

géophysique lorsqu'à partir des données mesurées on cherche à retrouver un modèle de sous-sol (c'est-à-dire la géométrie des structures en place et les propriétés géophysiques du matériau qui les constitue) qui reproduit le mieux possible les données mesurées. On s'est d'abord intéressé à la conductivité électrique, plus facile à mesurer et investiguée par une communauté scientifique plus large, mais également à la susceptibilité magnétique qui, dans certains contextes (roches basaltiques, structures archéologiques), s'avère très pertinente pour la caractérisation des vestiges archéologiques voire des remplissages sédimentaires (granite, roche basaltique).

Inversion des données électriques

La thématique de l'inversion 1D (variation selon la verticale) des données de conductivité électrique apparente dépasse largement le cadre de la prospection archéologique, puisqu'elle intéresse l'étude des sols

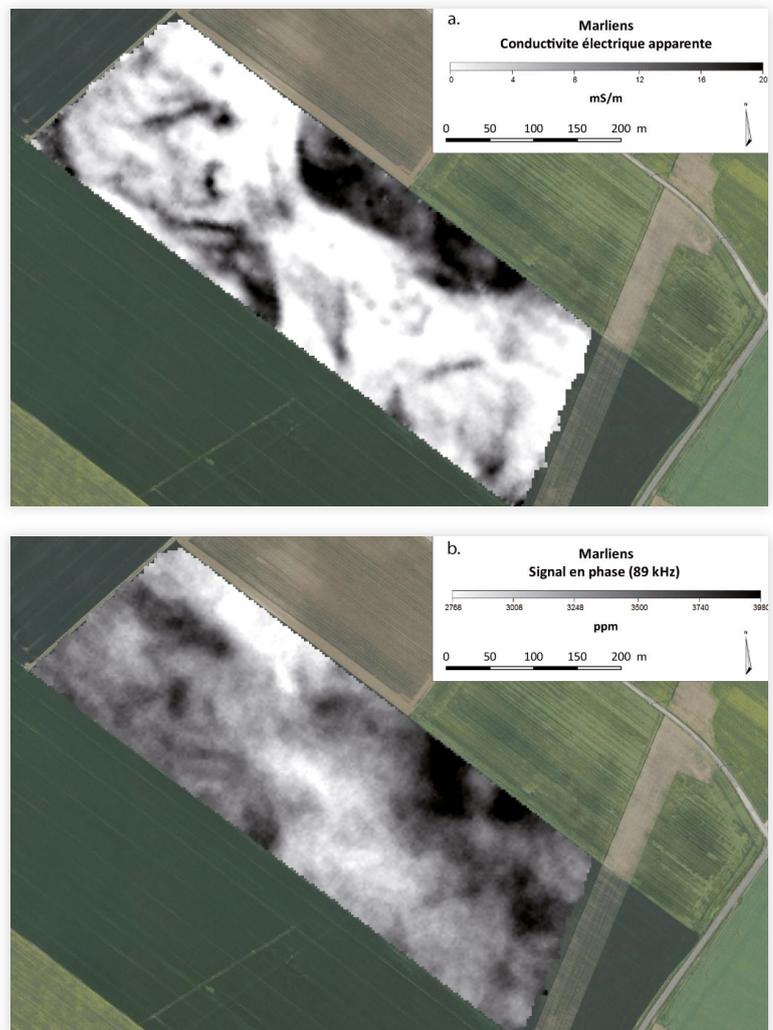


Figure 3

a. Carte de la conductivité apparente à 89 kHz GEM2 en mode HCP en mS/m – b. Carte de l'effet de la permittivité diélectrique apparente sur le signal en phase à 89 kHz GEM2 en mode HCP (en ppm).

[22] SIMON *et al.* 2019.

[23] BENECH *et al.* 2016a.

[24] KESSOURI 2012.

au sens large, où la variabilité verticale est l'une des bases de la taxonomie des sols [25]. De nombreuses équipes travaillent sur ces problèmes et proposent des solutions d'inversion [26], avec ou sans contraintes latérales. La stabilité des appareils multi-récepteurs, en ce qui concerne la conductivité électrique, permet une inversion de données sans étalonnage bien que celui-ci soit fortement recommandé, surtout dans le cas où les dynamiques de la conductivité électrique sont relativement faibles. L'inversion 1D de la conductivité électrique ne pose actuellement plus de problème majeur, plusieurs solutions ont été proposées et se sont avérées efficaces [27]. Néanmoins l'inversion 1D fait fi des effets 3D, particulièrement précieux lorsque l'on s'intéresse à des cibles archéologiques. Pour les études de sol, ce problème ne se pose pas puisque l'on peut considérer que la plus grande partie des variations latérales n'est pas trop brutale ou reste relativement localisée [28]. Pour l'archéologie le problème est plus complexe : les variations dans les trois dimensions peuvent être abruptes ; l'intérêt de l'inversion 1D est alors plus limité. Malheureusement les solutions existantes pour l'inversion 3D se caractérisent par des temps de calcul longs et ne permettent pas de traiter l'ensemble d'un jeu de données du fait des limitations en mémoire-machine. La plupart des instruments utilisés en archéologie fonctionnent dans un régime d'induction EM pour lequel la conductivité du milieu et la fréquence ont une faible influence sur la profondeur d'investigation. Dans ce cas, on peut s'appuyer sur des hypothèses simplificatrices comme l'approximation de Born où l'influence des structures 3D sur elles-mêmes est négligée [29]. Cette approximation permet d'utiliser une méthode de modélisation dans le domaine spectral qui, par son faible coût de calcul, rend l'interprétation 3D possible sur de grandes surfaces. Le modèle 3D obtenu permet de caractériser les limites géométriques des cibles avec une plus grande précision que les cartes de données apparentes et permet aussi de conforter ou d'infirmer *a priori* sur certaines des caractéristiques des objets cartographiés [30]. Cette approche fonctionne bien pour la caractérisation de structures présentant des contrastes de conductivité relativement faibles (ex. : ondulation de l'épaisseur de sol, fondations et autres matériaux de construction), tels ceux souvent

rencontrés en archéologie. Elle reste néanmoins limitée en présence de forts contrastes positifs de conductivité électrique (ex. pour des objets métalliques).

Inversion de données magnétiques

Les appareils multi-récepteurs permettent la cartographie simultanée à plusieurs profondeurs de la susceptibilité magnétique. Dans ce cas, l'étalonnage peut avoir un impact considérable sur les mesures et donc sur le résultat de l'inversion des données [31]. Là encore des solutions 1D et 3D existent [32]. Quelle que soit la solution envisagée, l'inversion des données de susceptibilité nécessite une estimation préalable de la conductivité électrique des sols et de sa distribution. Il faut donc avoir recours aux inversions exposées précédemment avant toute inversion de la susceptibilité magnétique. Dans certains cas, la susceptibilité magnétique s'avère être un meilleur indicateur des variations du milieu, comme cela a par exemple été le cas sur l'*oppidum* de Corent où une cuvette d'argile qui prend place dans un substrat basaltique a été cartographiée. Le substrat basaltique étant altéré, on observe un gradient progressif de la conductivité entre le comblement argileux de la cuvette et le substrat. La susceptibilité du basalte et celle de l'argile sont en revanche beaucoup plus contrastées [33]. Les mesures de susceptibilité magnétique permettent également une inversion 3D plus simple à mettre en œuvre. Des solutions qui permettent de réaliser une inversion 3D des données de susceptibilité magnétique, dite linéaire, avec des temps de calcul relativement courts ont récemment été proposées [34]. Elles permettent d'obtenir des résultats très satisfaisants avec une reconnaissance en 3D des variations de la susceptibilité magnétique. De fait ces solutions sont particulièrement adaptées aux problématiques archéologiques. Elles ont été mises en œuvre sur la villa de Lieu-Dieu [35] où l'on cherchait à cartographier le plan exact d'une villa gallo-romaine dont plusieurs bâtiments avaient été repérés par photographie aérienne. En plus de fournir une information sur la profondeur des structures dans le sol, cette solution permet également de mieux contraindre la forme et l'organisation spatiale des structures archéologiques. Il résulte de ces cartes un modèle 3D (fig. 4) possédant

[25] HENDRICKX *et al.* 2002.

[26] TRIANTAFILIS *et al.* 2013.

[27] GUERIN *et al.* 1996.

[28] GUILLEMOTEAU *et al.* 2016.

[29] GUILLEMOTEAU & TRONICKE 2016 ; GUILLEMOTEAU *et al.* 2017.

[30] BENECH *et al.* 2016b.

[31] DELEFORTRIE *et al.* 2019.

[32] GUILLEMOTEAU *et al.* 2016 ; THIESSON *et al.* 2017.

[33] GUILLEMOTEAU *et al.* 2016.

[34] THIESSON *et al.* 2017 ; GUILLEMOTEAU *et al.* 2019.

[35] GUILLEMOTEAU *et al.* 2019.

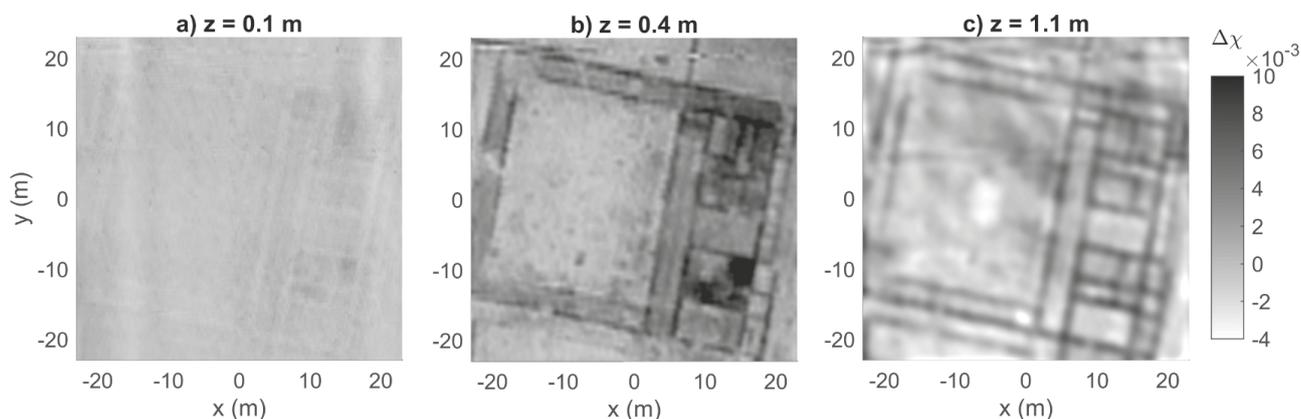


Figure 4

La méthode 3D multi-channel deconvolution (MCD) produit un modèle 3D de contrastes de susceptibilité avec une résolution latérale et verticale de 5 cm. Ici, nous montrons 3 coupes horizontales du modèle résultant à **a.** 0.1 m - **b.** 0.4 m - **c.** 1.1 m de profondeur [36].

une meilleure définition latérale que les simples cartes de propriétés apparentes pour lesquelles les anomalies montrent souvent des déformations marquées (notamment pour les configurations des bobines horizontales coplanaires et perpendiculaires), ce qui empêche une lecture optimale des objets cartographiés.

CONCLUSION

L'effort initié dans les années 70 et confirmé par de nombreux travaux réalisés ces dernières années sur les données acquises avec les appareils électromagnétiques a permis de replacer la méthode EMI comme une méthode de choix dans la cartographie des vestiges archéologiques. Si elle permet dans la plupart des cas une cartographie moins résolue spatialement qu'avec d'autres méthodes (prospection magnétique, électrique ou radar), elle a l'avantage de permettre de couvrir rapidement de grandes surfaces et de fournir des résultats de plus en plus pertinents. Sa capacité à mesurer différentes propriétés géophysiques permet de s'affranchir des difficultés associées à certains contextes géologiques. Ses limites comme ses pratiques évoluent. Le gain de résolution spatiale et l'augmentation du rapport signal/bruit observés avec les systèmes sur chariot ou luge, ainsi que le gain de résolution apporté par les récents travaux

d'inversion 3D invitent à un changement de pratique dans la mise en œuvre de ces méthodes. Le recours aux corrections de dérives instrumentales et d'étalement doit également être généralisé, car il est le fondement *sine qua non* de tous traitements et évolutions méthodologiques. Les récents développements méritent désormais d'être mis en œuvre en routine. La multiplication des cas d'étude permettra sans nul doute de continuer à affiner notre compréhension de l'origine du signal électromagnétique que la multitude de facteurs impliqués rend quelques fois difficile à cerner. L'ensemble de ces avancées ne doit pas être négligé car la grande variabilité des contextes sédimentaires et archéologiques conduira à préconiser un type d'emploi et/ou d'analyse mettant en œuvre la prospection électromagnétique basse fréquence. Le développement d'une nouvelle gamme d'appareils combinant systèmes multi-fréquences et multi-récepteurs permettrait également de combiner ces différentes approches et de proposer une caractérisation des sols multidimensionnelle et multipropriétés, susceptible d'intéresser tout particulièrement la reconnaissance et la caractérisation des sites archéologiques. ■

[36] GUILLEMOTEAU *et al.* 2019.

BIBLIOGRAPHIE

- BENECH, Christophe, LOMBARD, Pierre, REJIBA, Faycal & TABBAGH, Alain, 2016a**, « Demonstrating the contribution of dielectric permittivity to the in-phase EMI response of soils: example of an archaeological site in Bahrain. », *Near Surface Geophysics* 14/4, p. 337-340.
- BENECH, Christophe, DABAS, Michel, SIMON, François-Xavier, TABBAGH, Alain & THIESSON, Julien, 2016b**, « Joint interpretation of shallow EMI resistivity and magnetic (susceptibility measurements using rapid 1D/3D inversion », *Geophysics* 81/2, p. E65-E74.
- COLANI, C. & AITKEN, Martin James, 1966**, « A new type of locating device. II-Field trials », *Archaeometry* 9, p. 9-19.
- DABAS, Michel & SKINNER, John, 1993**, « Time domain magnetization of soils (VRM), experimental relationship to quadrature susceptibility », *Geophysics* 58, p. 326-333.
- DELEFORTRIE, Samuel, DE SMEDT, Philippe, SAEY, Timoty, VAN DE VIJVER, Elen & VAN MEIRVENNE, Marc, 2014**, « An efficient calibration procedure for correction of drift in EMI survey data », *Journal of Applied Geophysics* 110, p. 115-125.
- DELEFORTRIE, Samuel, HANSSENS, Daan, SAEY, Timoty, VAN DE VIJVER, Elen, SMETRYNS, Marte, BOBE, Christin & DE SMEDT, Philippe, 2019**, « Validating land-based FDEM data and derived conductivity maps; Assessment of signal calibration, signal attenuation and the impact of heterogeneity », *Journal of Applied Geophysics* 164, p. 179-190.
- DOOLITTLE, James A. & BREVIK, Erik, 2014**, « The use of electromagnetic induction techniques in soils studies », *Geoderma* 223-225, p. 33-45.
- GRELLIER, Séraphine, FLORSCH, Nicolas, CAMERLYNCK, Christian, JANEAU, Jean-Louis, PODWOJEWSKI, Pascal & LORENTZ, Simon A., 2013**, « The use of Slingram EM38 data for topsoil and subsoil geoelectrical characterization with a Bayesian inversion », *Geoderma*, 200, p. 140-155.
- LAVOUÉ, François, VAN DER KRUK, Jan, RINGS, J., ANDRÉ, F., MOGHADAS, Davood, HUISMAN, Johan Alexander, LAMBOT, Sébastien, WEIHERMÜLLER, Lutz, VANDERBORGHT, Jan, & VEREECKEN, Harry, 2010**, « Electromagnetic induction calibration using electrical conductivity modeling based on electrical resistivity tomography », *Near Surface Geophysics* 8, p. 3- 11.
- GUERIN, Roger, MEHENI, Youcef, RAKOTONDROSOA, Gérard & TABBAGH Alain, 1996**, « Interpretation of Slingram conductivity mapping in near-surface geophysics: using a single parameter fitting with 1D model », *Geophysical Prospecting* 44, p. 233-249.
- GUILLEMOTEAU, Julien, SIMON, François-Xavier, LUCK, Erika & TRONICKE, Jens, 2016**, « 1D sequential inversion of portable multi-configuration electromagnetic induction data », *Near Surface Geophysics* 14, p. 411-420.
- GUILLEMOTEAU, Julien & TRONICKE, Jens, 2016**, « Evaluation of a rapid hybrid spectral-spatial domain 3D forward-modeling approach for loop-loop electromagnetic induction quadrature data acquired in low-induction-number environments », *Geophysics* 81/6, p. E447-E458.
- GUILLEMOTEAU, Julien, CHRISTENSEN, Niels Boie, JACOBSEN, Bo Holm & TRONICKE, Jens, 2017**, « Fast 3D multichannel deconvolution of electromagnetic induction loop-loop apparent conductivity data sets acquired at low induction numbers », *Geophysics* 82/6, p. E357-E369.
- GUILLEMOTEAU, Julien, SIMON, François-Xavier, HULIN, Guillaume, DOUSTEYSSIER, Bertrand, DACKO, Marion & TRONICKE, Jens, 2019**, « 3-D imaging of subsurface magnetic permeability/susceptibility with portable frequency domain electromagnetic sensors for near surface exploration », *Geophysical Journal International* 219/3, p. 1773-1785.
- HENDRICKX, Jan M.H., BORCHERS, Brian, CORWIN, Dennis L., LESCH, Scott M., HILGENDORF, Alex C., SCHLUE, J., 2002**, « Inversion of Soil Conductivity Profiles from Electromagnetic Induction Measurements: Theory and Experimental Verification », *Soil Science Society of America Journal* 66, p. 673-685.
- HOWELL, Mark, 1966**, « A soil conductivity meter », *Achaeometry* 9, p. 20-23.
- HUANG, Hoaping, WON, I.J., 2000**, « Conductivity and susceptibility mapping using broadband electromagnetic sensors », *Journal of Environmental & Engineering Geophysics* 5/4, p. 31-41.
- KESSOURI, Pauline, 2012**, « Mesure simultanée aux fréquences moyennes et cartographie de la permittivité diélectrique et de la conductivité électrique du sol », Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6.
- KESSOURI, Pauline, FLAGEUL, Sébastien, VITALE, Quentin, BUVAT, Solène, REJIBA, Fayçal & TABBAGH, Alain, 2016**, « Medium-frequency electromagnetic device to measure electric conductivity and dielectric permittivity of soils », *Geophysics* 81/1, p. IJF-Z7.
- KLOSE, Tim, GUILLEMOTEAU, Julien, SIMON, François-Xavier & TRONICKE, Jens, 2018**, « Toward subsurface magnetic permeability imaging with electromagnetic induction sensors: Sensitivity computation and reconstruction of measured data », *Geophysics* 83/5, p. E335-E345.
- MCNEILL, John Duncan, 1980**, « Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers », *Geonics Limited*, TN-6.

- MCNEILL, John Duncan, 2013**, « The magnetic susceptibility of soils is definitely complex ». *Geonics Limited Technical Note* TN-36.
- NEEL, Louis, 1949**, « Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec application aux terres cuites », *Annales de géophysique* 5, p. 99-136.
- SCOLLAR, Irwin, TABBAGH, Alain, HESSE, Albert & HERZOG, Irmela, 1990**, *Archaeological prospecting and remote sensing*, Cambridge – New York – Port Chester, 674 p.
- SIMON, François-Xavier, SARRIS, Apostolos, THIESSON, Julien & TABBAGH, Alain, 2015**, « Mapping of quadrature magnetic susceptibility/magnetic viscosity of soils by using multi-frequency EMI », *Journal of Applied Geophysics* 120, p. 36-47.
- SIMON, François-Xavier, TABBAGH, Alain, DONATI, Jamieson & SARRIS, Apostolos, 2019**, « Permittivity mapping in the VLF-LF range using a multi-frequency EMI device: first tests in archaeological prospecting », *Near Surface Geophysics* 17/1, p. 27-41.
- SIMON, François-Xavier, PAREILH-PEYROUX, Mathias, BUVAT, Solène, MAYORAL, Alfredo, LABAZUY, Philippe, KELFOUN, Karim & TABBAGH, Alain, 2020**, « Quantifying multiple electromagnetic properties in EMI surveys: a case study of hydromorphic soils in a volcanic context – the Lac du Puy (France) », *Geoderma* 361, 114084.
- TABBAGH, Alain, 1986a**, « Applications and advantages of the Slingram electromagnetic method for archaeological prospecting », *Geophysics* 51/3, p. 576-584.
- TABBAGH, Alain, 1986b**, « What is the best coil orientation in the Slingram electromagnetic prospecting method? », *Archaeometry* 28/2, p. 185-196.
- THIESSON, Julien, KESSOURI, Pauline, SCHAMPER, Cyril & TABBAGH, Alain, 2014**, « Calibration of frequency-domain electromagnetic devices used in near-surface surveying », *Near Surface Geophysics* 12, p. 481-491.
- THIESSON, Julien, TABBAGH, Alain, SIMON, François-Xavier & DABAS, Michel, 2017**, « 3D linear inversion of magnetic susceptibility data acquired by frequency domain EMI », *Journal of Applied Geophysics* 136, p. 165-177.
- TITE, Michael & MULLINS, Christopher, 1970**, « Electromagnetic prospecting on archaeological sites using a soil conductivity meter », *Archaeometry* 12, p. 97-104.
- TRIANAFILIS, John, MONTEIRO SANTOS, Fernando A., 2013**, « Electromagnetic conductivity imaging (EMCI) of soil using a DUALEM-421 and inversion modelling software (EM4Soil) », *Geoderma* 211-212, p. 28-38.
- WARD, Stanley H. & HOHMANN, Gerald W., 1988**, « Electromagnetic theory for geophysical applications », dans Misac N. Nabighian & John D. Corbett (éd.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Volume 1, *Theory*, Tulsa, Oklahoma, p. 130-311.

APPORT DES PROSPECTIONS MAGNÉTIQUES HAUTE RÉOLUTION À LA COMPRÉHENSION D'UN HABITAT PROTOHISTORIQUE : L'EXEMPLE DU SITE DE HAUTEUR FORTIFIÉ DU MAIMONT

Rémy WASSONG^{1,*}, Bruno GAVAZZI^{2,**}

¹ Chercheur associé, UMR 7044 Archimède, Université de Strasbourg

² Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) ; UMR 7516 ; Université de Strasbourg/EOST, CNRS

* remy.wassong@hotmail.fr

** bgavazzi@unistra.fr

RÉSUMÉ

Dans le cadre des recherches archéologiques sur le site du Maimont, situé à cheval sur les communes de Niedersteinbach (Bas-Rhin, France) et Schönau (Rheinland Pfalz, Allemagne), plusieurs campagnes de mesures magnétiques ont eu lieu. Ces dernières avaient plusieurs objectifs : 1 - l'identification des aménagements anthropiques anciens (présence de fosses, résidus d'activités liées au feu, terrasses aménagées pour les activités artisanales, traces et plans de bâtiments) ; 2 - l'identification de zones perturbées par une intense activité durant le dernier conflit mondial. Pour cela, une technique de relevé et d'analyse magnétique à haute résolution et adaptée à un environnement accidenté de moyenne montagne et sous couvert forestier a été mise en place. Ainsi, à travers une approche interdisciplinaire et une confrontation des résultats magnétiques aux données archéologiques ont pu être mis en évidence des structures archéologiques souvent réputées peu détectables (trous de poteaux, terrasses) et dans des conditions de mesures difficiles, validant ainsi une nouvelle approche innovante de détection et d'analyse géophysique haute résolution pour l'archéologie.

MOTS-CLÉS

Prospections magnétiques, géophysique, haute résolution, habitat, architecture, protohistoire.

As part of the archaeological study of the site of Maimont, located in both Niedersteinbach (Bas-Rhin, France) and Schönau (Rheinland Pfalz, Germany) municipalities, several magnetic surveys have been conducted to fulfil two objectives. Firstly, to identify traces of ancient anthropogenic constructions (presence of pits, residues of fire-related activities, terraces built for crafting activities, traces and plans of building). Secondly, to identify areas disturbed by intense activity during WW2. To this end, a high-resolution surveying technique well adapted to a rugged topography in a mountainous and forest environment has been applied. Thus, through an interdisciplinary approach and a comparison of the magnetic results with archaeological data, it is possible to highlight archaeological structures that are often considered not easily detectable with magnetic methods (post holes, terraces) and in a difficult surveying environment, thus validating a new innovative approach to high-resolution geophysical detection and analysis for archaeology.

KEYWORDS

Magnetic surveys, geophysics, high resolution, settlement, architecture, protohistory.

Article accepté après évaluation par deux experts selon le principe du double anonymat

INTRODUCTION

Le site du Maimont se situe à la frontière franco-allemande entre les communes de Niedersteinbach (Bas-Rhin) et Schönau (Rheinland-Pfalz), sur l'un des plus hauts sommets (515 m d'altitude) de la Vosgovie, une région montagneuse comportant des vallons profondément encaissés et regroupant les Vosges du Nord et la partie sud du Pfälzerwald (**fig. 1**). De fait, certains sommets, parmi lesquels le Maimont, sont difficilement accessibles. Dans le cas qui nous occupe ici, l'accès au site se fait par un sentier de randonnée qui implique le transport du matériel nécessaire à dos de fouilleurs ou d'ânes et une fouille manuelle dès l'étape du décapage. Cette difficulté d'accès explique en partie le peu de recherches qui a été mené sur le site jusqu'aux fouilles conduites entre 2016 et 2018.

L'habitat du Maimont est fortifié par deux lignes de rempart englobant une superficie de 4 ha en rebord de plateau. Il est connu dès la fin du XIX^e siècle à la suite des travaux de C. Mehlis **[1]**. F. Sprater poursuit les investigations en 1925 **[2]**. Les emplacements des fouilles anciennes ne nous sont malheureusement pas parvenus. De plus, le mobilier issu de ces campagnes est, à ce jour, perdu. Il ressort néanmoins des quelques informations publiées par ces deux auteurs que le site devait être occupé durant l'âge du Bronze, La Tène, la période romaine et le Moyen Âge. Pour obtenir plus de détails il faut ensuite attendre 1996 et la réalisation de travaux forestiers qui viennent éventrer les deux remparts. À la suite de cet événement, Anne-Marie Adam et Stephan Fichtl étudient la coupe réalisée dans ces remparts **[3]**. Ils constatent l'existence de trois états. La découverte d'un fragment de bois calciné lié au premier état du rempart a permis d'obtenir une datation radiocarbone, récemment revue par Anthony Denaire grâce à l'affinement des datations C14 **[4]**. Le maximum de probabilité se situe désormais entre le Hallstatt D2 et La Tène A (entre 546 et 397 calBC).

La reprise des campagnes de fouilles sur le site a lieu en 2016 dans le cadre du programme de recherche sur les enceintes mené par l'équipe IV - AMeR de l'UMR 7044 - Archimède (Université de Strasbourg). Il s'agit alors de caractériser, de préciser la datation et d'évaluer la conservation de cet habitat des Vosges du Nord. Outre le contexte géographique et environnemental particulier dans lequel s'inscrit le site, il faut également mentionner un polémovofaciès très important bien que peu visible en surface. Ce dernier affecte les vestiges archéologiques en profondeur.

Les résultats présentés ici sont issus d'interventions qui ont eu lieu entre 2016 et 2018 : près de 600 m² ont été fouillés et 450 m² ont été prospectés avec une méthode magnétique (**fig. 1**). La première année a consisté en la réalisation de cinq sondages exploratoires de 9 à 21 m² répartis sur l'ensemble du site afin de déterminer l'état de conservation des vestiges. Les deux années suivantes se sont attachées à la réalisation des mesures géophysiques et à l'extension de la fouille des deux zones les plus riches en informations, à savoir une zone artisanale et un quartier d'habitat.

UNE ZONE ARTISANALE ?

Située à mi-pente sur la première terrasse aménagée du site et légèrement affectée par l'activité de la seconde guerre mondiale, la fouille de cette zone a permis de mettre en évidence deux phases d'aménagements de terrasses anthropiques (**fig. 2**). Le substrat a été entaillé à l'exception d'une banquette qui a été laissée en l'état. La phase la plus ancienne de

[1] MEHLIS 1900.

[2] SPRATER 1925.

[3] ADAM & FICHTL 2001.

[4] WASSONG *et al.* 2018a.

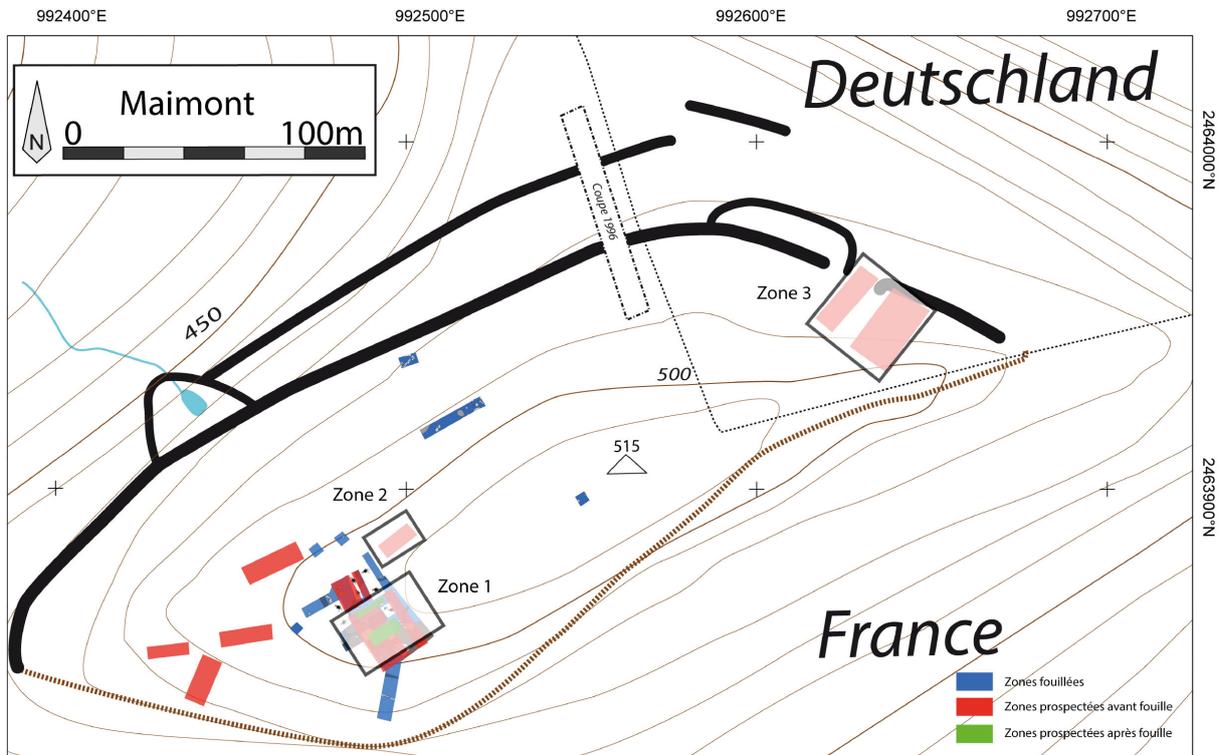
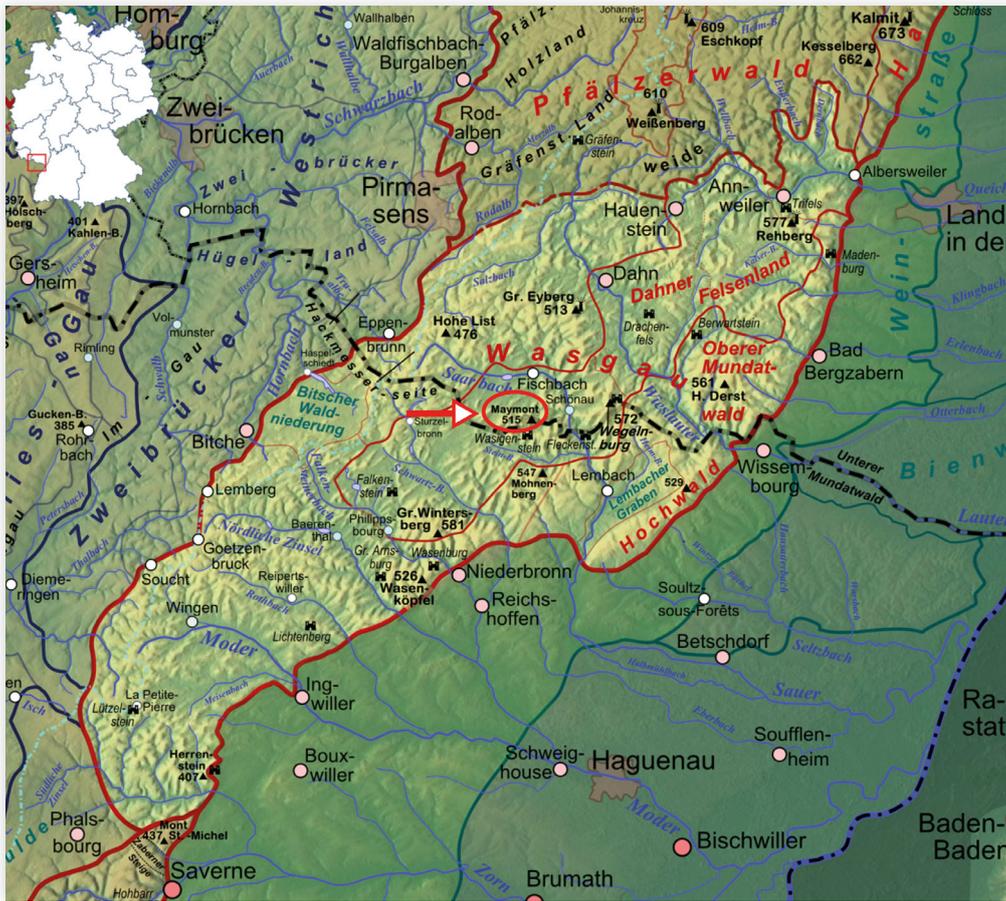


Figure 1
 Emplacement du Maimont (source : <https://maps-for-free.com/>, d'après le Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, modifié par l'auteur) et plan général du site positionnant l'enceinte ainsi que les différents travaux réalisés entre 2016 et 2018 (prospections magnétiques et sondages).

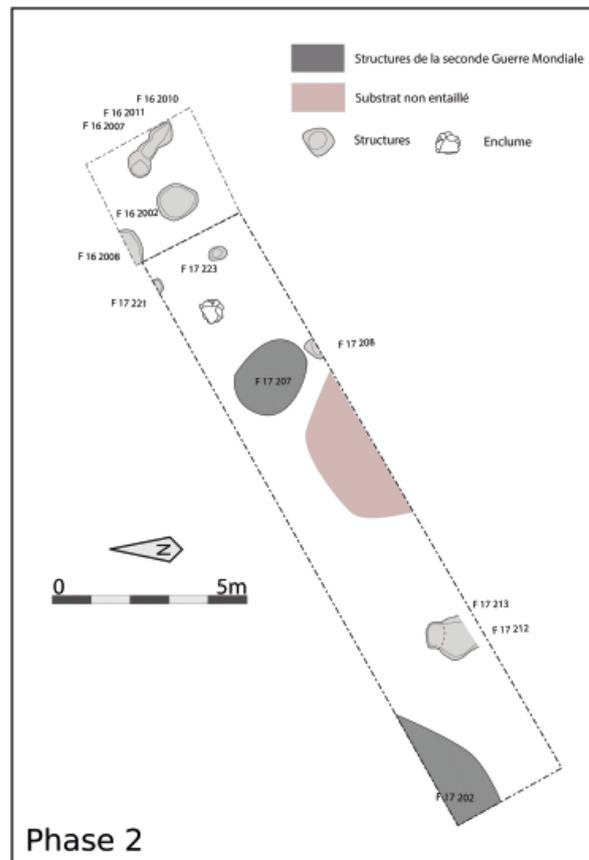
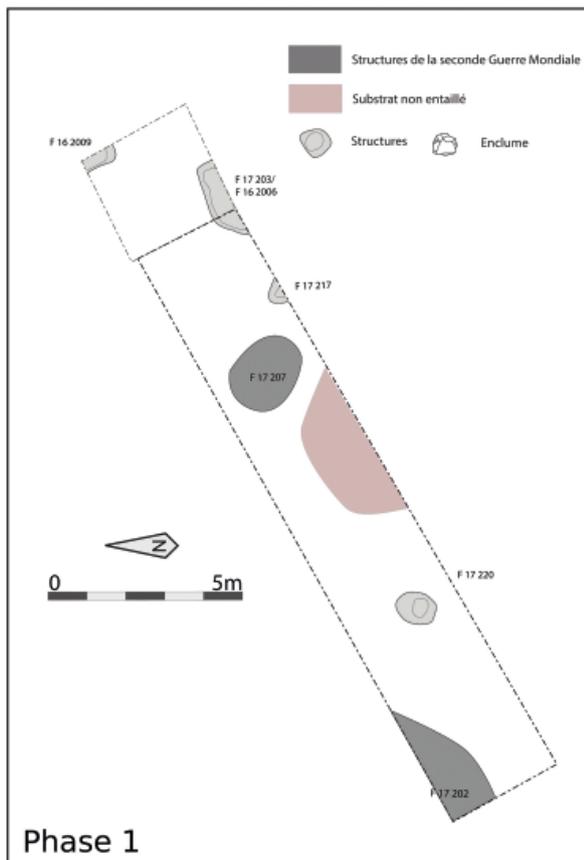
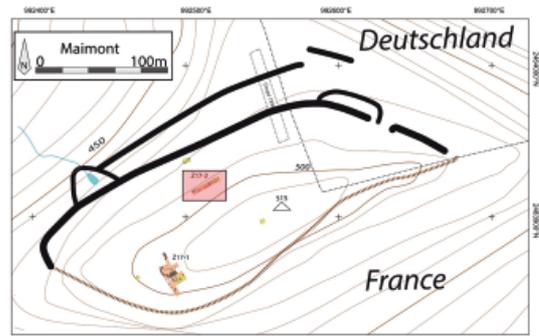
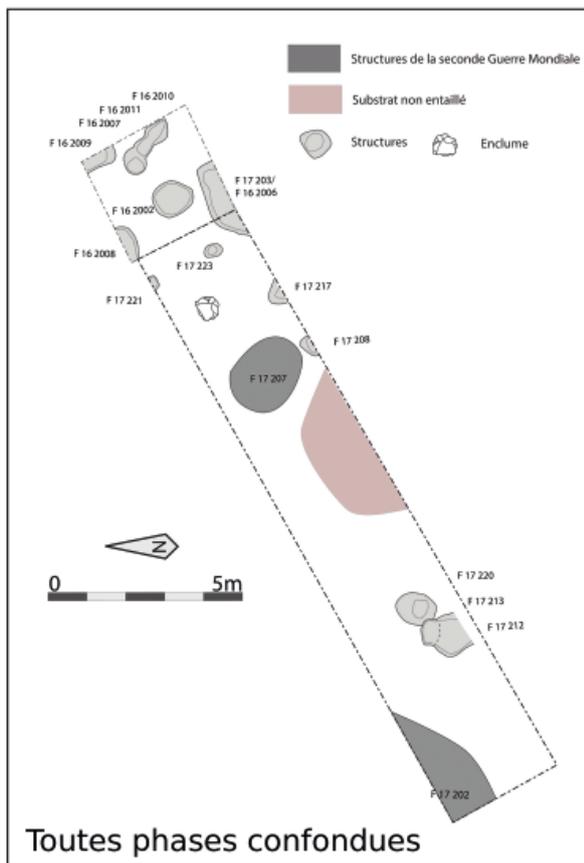


Figure 2

Plans de la zone artisanale de la terrasse T1 toutes phases confondues (en haut) et les phases protohistoriques (état 1 en bas à gauche et état 2 en bas à droite) (WASSONG *et al.* 2018b) et photographie d'une fosse de rejet avant fouille (WASSONG *et al.* 2016).

la terrasse comporte quatre fosses, dont le remplissage est constitué d'un sable noir et de blocs de grès brûlés (**fig. 2**). Par la suite, une recharge de terre est appliquée et une nouvelle terrasse est formée. On y retrouve dix fosses aux comblements similaires à celles de l'état précédent. Celles-ci sont réparties autour d'une plaque de grès de 60 cm de long et de 56 cm de large pour une épaisseur de 15 cm. Elle est fracturée, et des fragments de grès grossiers ont été utilisés afin de stabiliser la pièce sur le sol. Plusieurs fissures et marques de frappe permettent d'identifier cet élément comme une enclume. Une autre enclume avait été découverte dans des niveaux de colluvion en contrebas de la terrasse lors de la campagne de 2016. La découverte de céramiques graphitées dans une fosse du premier état de la terrasse nous permet de dater la première installation d'entre le Hallstatt B2/B3 et le Hallstatt D1 (950 - 550 avant notre ère). Le second état peut, quant à lui, être daté d'entre le Hallstatt B2/B3 et le Hallstatt D (950 - 480 avant notre ère) sur la base de la découverte d'une fusaïole de type Ib1 de la typologie établie par Médard *et al.* en 2017 [5].

Les éléments découverts au sein de cette zone nous ont permis d'émettre l'hypothèse selon laquelle nous sommes ici en présence d'une aire d'activité où le grès était chauffé afin de le rendre plus friable, puis frappé contre une enclume dans le but d'en extraire de l'oxyde de fer et du manganèse également retrouvés dans plusieurs sondages effectués sur le site. Cette étape s'apparente à une étape de grillage afin de nettoyer le minerai et de le préparer pour sa réduction. Cependant la suite de la chaîne opératoire, à savoir la réduction, n'a pas été identifiée lors des fouilles. Globalement le minerai issu des blocs de grès ainsi traité est assez pauvre en fer. Cela soulève plusieurs questionnements : s'agit-il d'un espace de traitement préliminaire du minerai avant de l'envoyer vers un autre secteur, voire un autre site ? La datation assez haute dans l'âge du Fer nous permet de nous demander s'il s'agit d'une phase d'expérimentation avec un minerai que l'on peut aisément récolter sur place. Pour la même raison, il pourrait s'agir d'une activité opportuniste, ou encore faite sous la contrainte du fait, par exemple, d'un accès limité voire impossible à du minerai de bonne qualité. À l'heure actuelle aucun indice nous permet de préciser ces hypothèses.

UN QUARTIER D'HABITAT ?

La présence d'une clairière située juste en dessous du plateau sommital a rendu possible l'exploration d'un quartier d'habitat avec plusieurs plans de bâtiments malheureusement tronqués par l'aménagement de

tranchées durant la Seconde Guerre Mondiale (**fig. 3**). On compte néanmoins, pour la période proto-historique, un plan complet de bâtiment ainsi que deux plans de fond de cabane (**fig. 3**).

Le premier bâtiment, malheureusement incomplet et sur lequel nous reviendrons plus loin, se situe au centre de la zone fouillée. Il présente une orientation sud-ouest/nord-est et mesure 8 m de long pour une largeur connue de 3 m. Il s'agit d'un édifice à chevet anguleux. Le petit côté sud-ouest du bâtiment présente une tranchée de fondation de paroi rectiligne doublée de deux poteaux internes, permettant d'écarter l'hypothèse de la présence d'une abside. Le second bâtiment se situe au nord-ouest de la zone fouillée et se présente sous la forme d'un petit édifice sur quatre poteaux de 2 m de large et 4 m de long. Les poteaux sur les petits côtés sont reliés par des tranchées de fondation de paroi. Ce type d'édifice est généralement interprété comme des bâtiments de stockage, des greniers. La présence de tranchées de fondation de paroi sur les pignons est et ouest, et leur absence sur les longs côtés ne seraient cependant d'aucune utilité pour un édifice de ce type [6]. Enfin, les deux fonds de cabane présentent un plan similaire et mesurent tous deux 4 m de long pour une largeur de 2 m pour la structure la plus septentrionale et de 1,40 m pour la structure la plus méridionale. À l'instar de la plupart des trous de poteaux fouillés, ces structures comportent des marques de tailles sur le pourtour de leurs creusements. Il s'agit de fonds de cabanes de plan rectangulaire à angles arrondis avec des poteaux axiaux situés sur les petits côtés et inclus dans la paroi (type A 1/2 de Kupka [7]).

Ces bâtiments sont des constructions sur poteaux porteurs fortement ancrés dans le substrat qui peut être de deux natures (**fig. 3**). Dans le premier cas, il s'agit de grès massif qui a été percé (certainement non sans difficultés) afin d'y installer les poteaux. Des traces d'impacts ont pu être observées sur le pourtour des structures. Pour certains, les constructeurs ont profité de la présence d'une diaclase dans la roche pour élargir cet espace naturel bien plus simple à tailler. Dans le second cas, le substrat se compose d'un sable rose avec des dalles de grès bien plus faciles à creuser.

[5] MÉDARD *et al.* 2017 ; WASSONG *et al.* 2017.

[6] Cet article n'a pas pour but de développer les questions d'interprétations architecturales plus avant, pour de plus amples informations à ce sujet nous renvoyons le lecteur vers WASSONG 2018.

[7] KUPKA 2011, là encore, pour les questions d'interprétations architecturales voir WASSONG 2018.

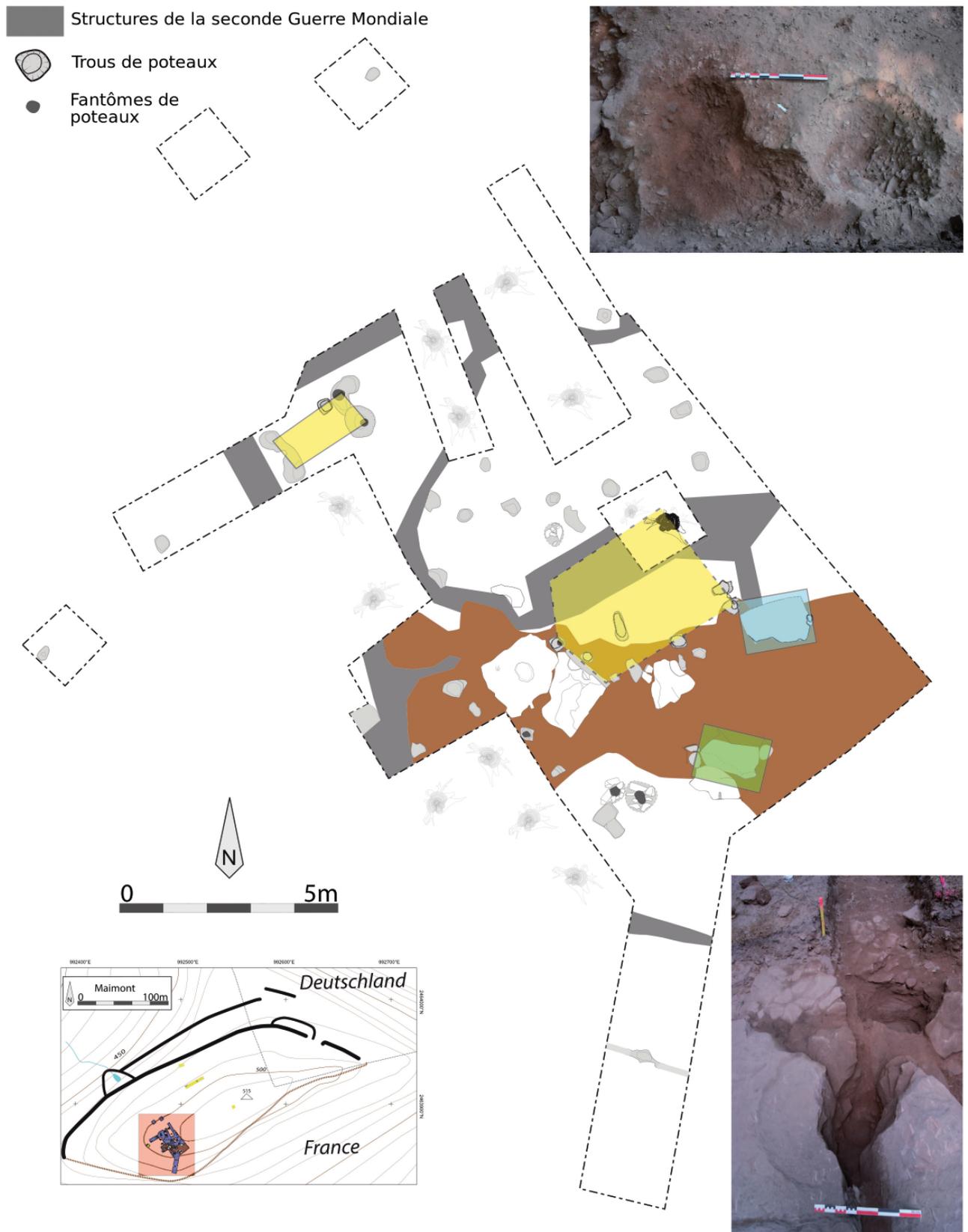


Figure 3
 Plan du quartier d'habitat et photographie de structures creusées dans un substrat de dalles de grès (en haut, sans couleur) et dans le grès massif (en bas, en marron), en couleurs, les emprises théoriques des bâtiments identifiés (WASSONG *et al.* 2018b).

LA PROSPECTION MAGNÉTIQUE HAUTE RÉOLUTION

Durant les campagnes 2017 et 2018, des mesures magnétiques ont été réalisées en parallèle des fouilles avec un objectif double : l'identification d'aménagements anthropiques anciens (fosses, résidus d'activités liées au feu, terrasses aménagées, traces de bâtiments) et l'identification des zones perturbées par l'activité militaire durant le dernier conflit mondial, le tout dans un contexte d'accès et de mesures compliqué du fait de la topographie et du couvert forestier. Si la détection d'éléments métalliques liés aux conflits mondiaux à l'aide du magnétisme est une application courante et ne pose à priori pas de problèmes particuliers [8], la détection d'aménagements anthropiques anciens de la période et du contexte concerné nécessite une réflexion sur les seuils de détection et la méthodologie de la mesure. En effet, on attend des éléments sub-métriques (fosses, trous de poteaux) dans un encaissant gréseux ou des structures en pierres (terrasses) réutilisant potentiellement des matériaux trouvés sur place. Toutes ces structures présentent à priori des contrastes d'aimantation faibles avec leur encaissant. Concernant le seuil de détection, celui-ci peut être analysé simplement en reprenant l'équation d'un champ magnétique dipolaire qui peut s'écrire sous la forme [9]

$$\vec{B} = C \frac{M}{r^3} [3(\widehat{M} \cdot \widehat{r})\widehat{r} - \widehat{M}] ,$$

avec $\vec{M} = M \cdot \widehat{M}$ l'aimantation de la source, $\vec{r} = r \cdot \widehat{r}$ la distance de la source au point d'observation et C une constante. On voit alors que l'intensité du signal mesuré varie linéairement avec le contraste d'aimantation entre la source et l'encaissant mais que le facteur

le plus important est la distance à la source, puisque le signal décroît proportionnellement au cube de la distance. Pour cette étude où la plus grande précision possible est souhaitée, il convient donc de réaliser la mesure au plus proche des sources, et donc au plus proche du sol, avec une haute densité de mesures afin d'éviter des effets d'aliasing. Pour cela deux dispositifs ont été mis en place sur le terrain pour réaliser une mesure selon des profils espacés de 10 cm à environ 20 cm du sol (fig. 4). Ces appareils sont basés sur un développement de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) qui rend possible la mesure de l'intensité du champ magnétique à l'aide de magnétomètres légers à trois composantes, tout en compensant l'effet du dispositif sur la mesure, ce qui permet de concevoir des appareils multi-capteurs compacts et adaptables au terrain [10]. Du fait de la couverture végétale qui empêche un géoréférencement en temps réel à l'aide d'un système GNSS, des carrés de prospections sont implantés et relevés au tachéomètre. Les profils sont opérés à vitesse constante.

RÉSULTATS ET NOUVELLES PROBLÉMATIQUES

Les résultats présentés ici concernent les levées magnétiques effectuées sur trois zones (fig. 4). La zone 1 correspond à une partie du quartier d'habitat fouillé, la zone 2 quant à elle se trouve entre les fouilles de

[8] Voir par exemple BILLINGS 2004 ou MUNSCHY *et al.* 2007.

[9] Dérivée de BLAKELY 1995, p. 75.

[10] GAVAZZI *et al.* 2016 ; GAVAZZI *et al.* 2019.



○ Numériseur développé par l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg

○ Magnétomètres fluxgate à trois composantes Bartington Mag-03MC70

Figure 4
Photographie des dispositifs de mesure et emplacements des zones 1, 2 et 3 mentionnées pour la prospection géomagnétique.

la zone d'artisanat et du quartier d'habitat, à proximité de ce dernier, tandis que la zone 3 se situe plus au nord au niveau d'une interruption du rempart et autour de celle-ci.

LA ZONE 1 (FIG. 5)

Une forte anomalie avec une amplitude de plus de 1000 nT peut être observée au centre de cette zone. Elle correspond à une fosse datant de la Seconde Guerre Mondiale dans laquelle plusieurs douilles de balles, fils de fer barbelés et blocs de ciment de 50 kg ont été découverts lors de la fouille. Cette fosse est entourée d'autres anomalies présentant de fortes amplitudes (entre 200 et 1000 nT) qui sont interprétées comme des pollutions métalliques. L'ensemble forme une surface fortement perturbée où l'identification d'autres structures archéologiques ne semble pas possible (fig. 5). Les prospections magnétiques de ce secteur permettent également de détecter certains trous de poteaux en dehors de la zone perturbée. Les aménagements creusés dans le substrat sableux sont assez facilement identifiables (fig. 5, partie haute). En revanche, l'identification des trous de poteaux dans le grès solide paraît incertaine. En effet, seuls certains des creusements, et seulement parmi ceux les plus massifs, correspondent à des anomalies qui sont par ailleurs d'intensité plus faible que dans le substrat sableux (fig. 5, partie basse). De plus, plusieurs

anomalies, similaires en forme et en intensité à celles qui semblent correspondre à des trous de poteaux, se révèlent ne pas être liées à des creusements. Ce constat pose la question du contraste entre la nature du substrat et du remplissage (généralement constitué de sable remanié et de quelques blocs de grès) qui conduit à différentes possibilités de détection des creusements sur le site. Dans les zones où le substrat correspond à du grès solide l'identification paraît compliquée et perturbée par la moindre présence d'autres sources d'anomalies (tandis que dans les zones à substrat moins dur la plupart des trous de poteaux peuvent être identifiés grâce à un bon contraste encaissant/remplissage).

LA ZONE 2 (FIG. 6)

Dans cette zone on remarque de nombreuses anomalies que l'on classe en deux types. Le premier correspond à des anomalies avec de fortes amplitudes (supérieures à 50 nT) qui sont interprétées comme liées à des pollutions récentes (Seconde Guerre Mondiale). Le deuxième correspond à des anomalies d'intensité plus faible de quelques nT à quelques dizaines de nT qui pourraient être liées à des structures ponctuelles en creux (trous de poteaux). À l'heure actuelle, cette parcelle n'a pas pu faire l'objet d'une fouille afin de confirmer ou d'infirmer ces hypothèses mais l'agencement des anomalies

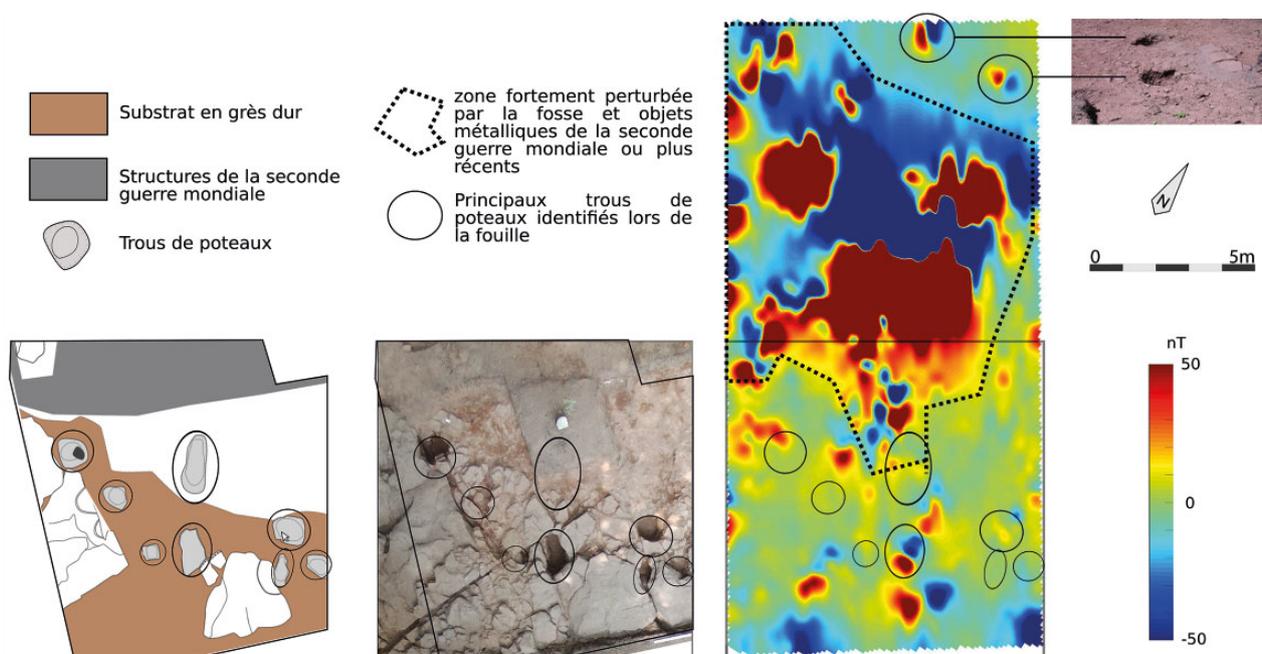


Figure 5
Carte des anomalies magnétiques de la zone 1 et leurs interprétations.

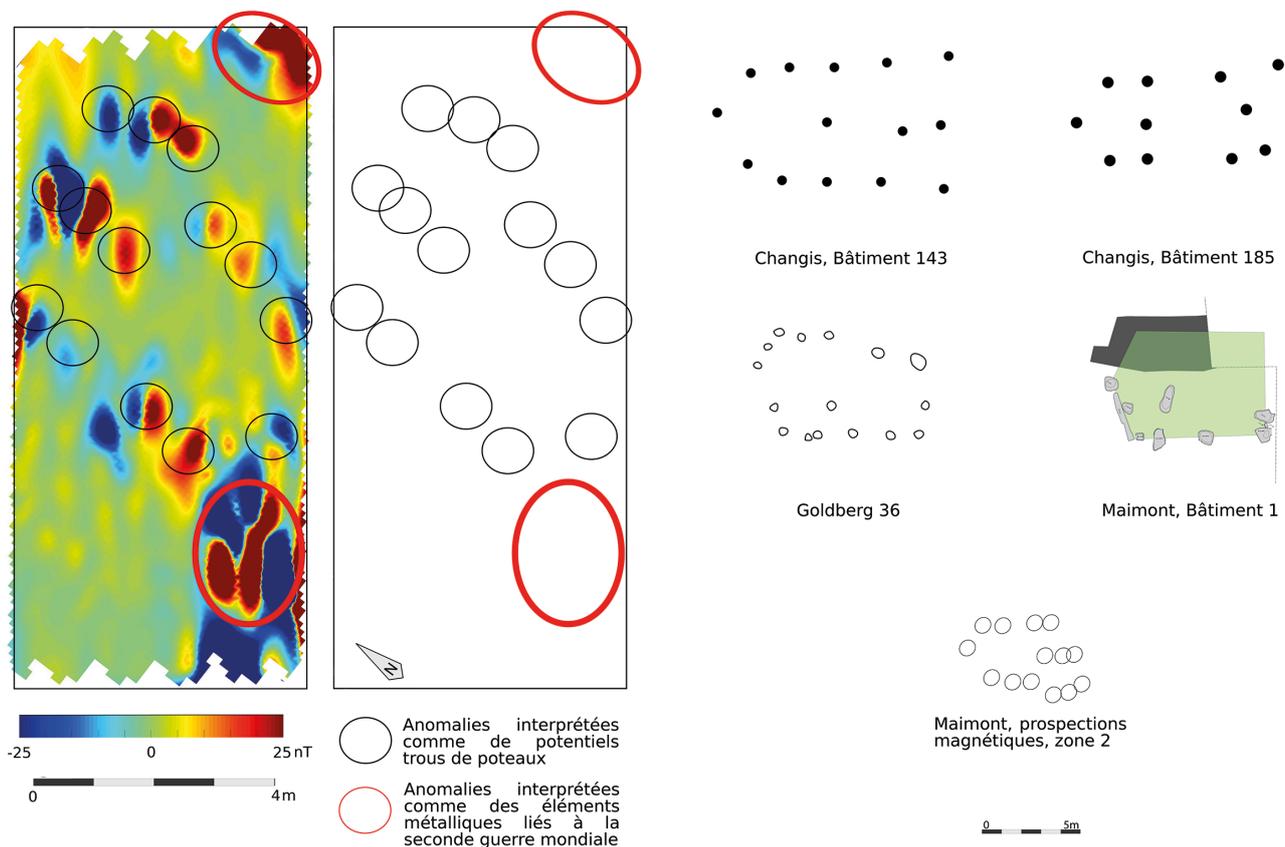


Figure 6

Gauche - Carte des anomalies magnétiques de la zone 2 et leurs interprétations. Droite - Comparaison de plans de bâtiments à chevet triangulaire (LAFARGE *et al.* 2006, PARZINGER 1998, WASSONG *et al.* 2018b) et de l'interprétation de la zone 2.

renforce l'hypothèse de traces de bâtiments. En effet, la forme dessinée par les prospections magnétiques reprend le plan et les dimensions de bâtiments sur poteaux porteurs connus pour la toute fin de l'âge du Bronze et le début de l'âge du Fer (Hallstatt B2/B3 à Hallstatt D1 soit 950 - 550 avant notre ère) et dont un exemplaire a pu être fouillé à moitié sur le site du Maimont [11]. Des plans complets ont pu être étudiés, notamment sur les sites du Goldberg [12] et de Changis-sur-Marne [13] (fig. 6).

LA ZONE 3 (FIG. 7)

La première observation qui peut être faite dans cette zone en comparaison avec les zones précédentes est l'absence d'anomalies de très forte intensité pouvant correspondre à des éléments métalliques de la Seconde Guerre Mondiale. En effet, seul deux anomalies sont interprétées comme liées à des éléments métalliques ponctuels à cause de leur forme (amas de dipôles) et elles présentent des intensités beaucoup plus faibles que les éléments de la zone 2 (une dizaine contre plus de cinquante nT). En l'absence de ces « pollutions » il est possible d'observer a priori des anomalies de plus faible intensité (et donc des contrastes plus faibles)

que dans la zone 2 où elles auraient été masquées. On relève ainsi plusieurs anomalies linéaires : au nord de la zone prospectée, le tracé correspond à la limite intérieure du rempart tandis que dans la partie sud, le tracé linéaire correspond très probablement à la limite de l'aménagement de terrasse anthropique dont une partie a été fouillée lors des campagnes de 2016 et 2017. Les mesures effectuées au niveau de l'interruption du rempart indiquent la présence d'anomalies ponctuelles avec des intensités comprises entre 5 et 10 nT. Ces dernières peuvent correspondre à des trous de poteau, ce qui suppose la présence d'une structure bâtie. Il est fréquent de trouver des édifices de type porche ou tour porche au niveau des interruptions de remparts ou d'enclos durant l'âge du Fer. Il pourrait s'agir d'un modeste dispositif de ce type dans le cas du Maimont, hypothèse qui ne pourrait être confirmée que par la fouille.

[11] WASSONG *et al.* 2018a.

[12] PARZINGER 1998.

[13] LAFARGE 2006.

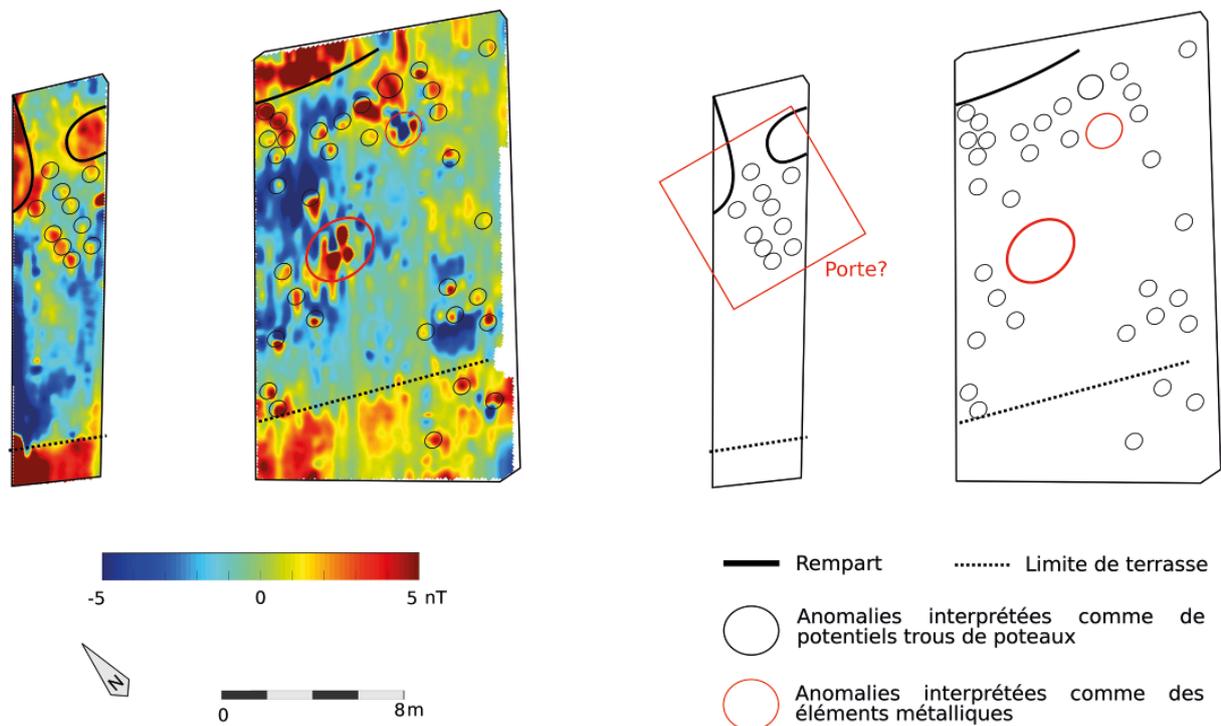


Figure 7
Carte des anomalies magnétiques de la zone 3 et leurs interprétations.

CONCLUSIONS

Ce travail mené sur l'habitat de hauteur fortifié du Maimont met en avant l'importance de l'utilisation d'un matériel géophysique adapté au contexte (ici une mesure du champ total à haute densité à 0,2 m du sol) et aux contraintes de praticabilité du terrain, inhérentes à la fouille des habitats de hauteur fortifiés se situant sous couvert forestier. L'apport d'un tel procédé du point de vue archéologique est très important. Il permet une meilleure définition des problématiques de travail et des emplacements de fouilles à venir. Parallèlement, et tout particulièrement dans le cas

du Maimont, la prospection magnétique nous permet d'écarter les zones à risques à la suite des événements survenus durant la Seconde Guerre Mondiale.

L'approche magnétique permet également une analyse à plus large échelle que celle de la fouille détaillée. Ceci est d'autant plus important quand il est compliqué voire impossible de fouiller de grandes surfaces. La combinaison entre la fouille et les données issues de ces prospections permet une meilleure perception et, à terme, une meilleure compréhension des géométries et de l'agencement des structures bâties, que ce soient des habitations ou des aménagements anthropiques du terrain. ■

- ADAM, Anne-Marie, FICHTL, Stephan, 2001**, « Le Maimont, près de Niederssteinbach, une enceinte fortifiée dans les Vosges du Nord », *Cahiers Alsaciens d'Archéologie d'Art et d'Histoire* 44, p. 5-12.
- BILLINGS, Stephen D, 2004**, « Discrimination and classification of buried unexploded ordnance using magnetometry », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42 (6), p. 1241-1251, DOI : <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.826803>.
- BLAKELY, Richard J, 1995**, *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*, Cambridge University Press.
- GAVAZZI, Bruno, LE MAIRE, Pauline, MUNSCHY, Marc & DECHAMP, Aline, 2016**, « Fluxgate vector magnetometers: A multisensor device for ground, UAV, and airborne magnetic surveys », *The Leading Edge* 35 (9), p. 795-797, DOI: <https://doi.org/10.1190/tle35090795.1>
- GAVAZZI, Bruno, LE MAIRE, Pauline, MERCIER DE LÉPINAY, Jeanne, CALOU, Paul & MUNSCHY, Marc, 2019**, « Fluxgate three-component magnetometers for cost-effective ground, UAV and airborne magnetic surveys for industrial and academic geoscience applications and comparison with current industrial standards through case studies », *Geomechanics for Energy and the Environment* 20, article 100117, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gete.2019.03.002>
- KUPKA, Angelika, 2011**, *Grubenhäuser entlang des norischen und oberpannonischen Donaulimes*, Diplomarbeit, Wien Universität, Historisch-Kulturwissenschaftliche Fakultät BetreuerIn.
- LAFAGE, Françoise, AUXIETTE, Ginette, BRUNET, Paul, MARTIAL, Emmanuelle & MATTERNE, Véronique, 2006**, « Premières tentatives d'interprétation spatiale d'un site rural du Bronze final à Changis-sur-Marne (Seine-et-Marne) » *Bulletin de la Société Préhistorique Française* 103/2, p. 323-377.
- MÉDARD, Fabienne, LANDOLT, Michael, ADAM, Anne-Marie & DUNNING THIERSTEIN, Cynthia, 2017**, « Évolution des fusaïoles du Bronze final à l'âge du Fer dans la vallée du Rhin supérieur et sur le Plateau suisse : premiers résultats », dans S. Marion, S. Deffressigne, J. Kaurin & G. Bataille (dir.), *Production et proto-industrialisation aux âges du Fer, perspectives sociales et environnementales, Actes du 39^{ème} colloque international de l'AFEAF, Nancy 2015*, Bordeaux.
- MEHLIS, Christian, 1900**, « Über vorgeschichtliche Befestigungen in den Nordvogesen und im Hartgebirge », *Korrespondenzblatt des Gesamtvereins der deutschen Geschichts- und Altertumsvereine*.
- MUNSCHY, Marc, BOULANGER, Daniel, ULRICH, Patrice & BOUIFLANE, Mustapha, 2007**, « Magnetic mapping for the detection and characterization of UXO: Use of multi-sensor fluxgate 3-axis magnetometers and methods of interpretation », *Journal of Applied Geophysics* 61, p. 168-183, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2006.06.004>
- PARZINGER, Herrmann, 1998**, *Der Goldberg, die Metallzeitliche Beiedlung*, Mainz am Rhein.
- SCHUSSMANN, Markus, 2012**, *Siedlungshierarchien und Zentralisierungsprozesse in der Südlichen Frankenalb zwischendem 9. und 4. Jh. v. Chr.*, Rahden/Westf. (Berliner Archäologische Forschungen, 11).
- SPRATER, Friedrich, 1928**, *Die Urgeschichte der Pfalz, Veröffentlichungen der Pfälzischen Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften*, Band V, Speyer.
- WASSONG, Rémy (dir.), BARBAU, Clémentine, JODRY, Florent & ROTH-ZEHNER, Muriel, 2016**, *L'habitat de hauteur fortifié du Maimont (Niedersteinbach, Bas-Rhin/Schönau, Pfalz)*, Rapport de fouilles programmées.
- WASSONG, Rémy (dir.), BARBAU, Clémentine, FONTANILLE, Arnaud, GAVAZZI, Bruno, JODRY, Florent, TROMMENSCHLAGER, Ludovic & ZEMLIC, Mégane, 2017**, *L'habitat de hauteur fortifié du Maimont (Niedersteinbach, Bas-Rhin/Schönau, Pfalz)*, Rapport de fouilles programmées.
- WASSONG, Rémy (dir.), BARBAU, Clémentine, JODRY, Florent, ROTH-ZEHNER, Muriel, avec la col. de DENAIRE, Anthony & FONTANILLE, Arnaud, 2018a**, « Der Maimont. Alte und neue Forschungen auf eine grenzübergreifende befestigte Höhensiedlung der Eisen- und Römerzeit », dans M. Koch, J. Wiethold & A. Zeeb-Lanz (dir.), *Archäologie in der Grossregion. Archäologentage Otzenhausen 4, Internationales Symposium zur Archäologie in der Grossregion in der Europäischen Akademie Otzenhausen*, 23.-26. März 2017, Otzenhausen, p. 65-78.
- WASSONG, Rémy (dir.), FONTANILLE, Arnaud, GAVAZZI, Bruno, JODRY, Florent, SCHOLTUS, Lizzie & TROMMENSCHLAGER, Ludovic, 2018b**, *L'habitat de hauteur fortifié du Maimont (Niedersteinbach, Bas-Rhin/Schönau, Pfalz)*, Rapport de fouilles programmées.