Amender les sols cultivés avec des fumiers et déchets domestiques : une origine multimillénaire pour un enjeu majeur du développement durable

Monica Aguilera[1], Marie Balasse[2], Sébastien Lepetz[2] et Véronique Zech-Matterne[2]

[1] Departament de Producció Vegetal i Ciència Forestal – AGROTECNIO Center, Universitat de Lleida, Avda

[2] UMR 7209 « Archéozoologie, archéobotanique : sociétés, pratiques, environnements », CNRS / MNHN / Sorbonne Universités, Paris

Résumé : Depuis les débuts de l'agriculture, un des grands défis des systèmes agricoles a été d'assurer l'équilibre alimentaire de populations en expansion constante, quels que soient les moyens de production et les retombées nuisibles pour l'environnement. Cette surexploitation des ressources naturelles a entraîné une diminution de la qualité et de la fertilité des sols de culture. Ainsi, pour contrer l'épuisement d'éléments nutritifs et la détérioration de la structure du sol, des apports d'éléments minéraux et matières organiques se révélaient nécessaires.

L'utilisation importante des engrais minéraux au cours du XX^{e} siècle a laissé place aujourd'hui à l'emploi de matières fertilisantes d'origine résiduaire (Mafor), majoritairement des fumiers d'élevage. Bien que l'incorporation de ces fertilisants ait contribué au développement des cultures, en améliorant notablement le rendement et la qualité de la production, l'usage excessif d'engrais a eu comme conséquence la dégradation et la contamination des sols et des eaux. Dès 2012, une réflexion a été engagée en France sur une utilisation raisonnée des Mafor en agriculture, nourrie par une expertise scientifique collective sur ses effets agronomiques et environnementaux, et sur les contraintes économiques et sociales qui en découlent.

Cette problématique n'est pas nouvelle. Les indices archéologiques montrent que la préoccupation de corriger les déséquilibres nutritionnels du sol remonte à des époques très anciennes. Les traces de pratiques d'amendement des parcelles cultivées sont déjà perceptibles pour des champs fossiles du Néolithique moyen. Diverses méthodologies ont été utilisées pour identifier l'apport de fumier dès les débuts de l'agriculture et durant les millénaires suivants : tessons erratiques de céramique, analyse de biomarqueurs d'anciens sols arables, identification de signatures de matières fécales dans les sols. Plus particulièrement, au sein des disciplines de l'archéobotanique (étude des restes archéologiques de plantes) ont été mises en œuvre différentes techniques pour identifier des indices probants des stratégies développées par les agriculteurs du passé pour faire front au défi du maintien et de la bonification des sols.

1 Introduction

L'agriculture, entendue comme la gestion des écosystèmes afin d'assurer les besoins alimentaires de la population, est née il y a plus de 10 000 ans au Proche-Orient (Croissant fertile) [1]. Les plantes cultivées et les pratiques agricoles ont diffusé en Europe avec le mode de vie néolithique à partir du début du VII^{e} millénaire avant J.-C. pour atteindre les marges nord-occidentales de l'Europe continentale deux millénaires plus tard, les îles britanniques un millénaire plus tard encore. La progression fut lente, mais régulière. Les raisons qui poussèrent les sociétés de chasseurs-cueilleurs mésolithiques à inventer/adopter une économie de production sont encore débattues ; il est possible que la croissance démographique humaine ait joué un rôle dans la promotion d'un mode de subsistance assurant une plus grande régularité dans la disponibilité des ressources [2, 3].

Dans l'Europe industrielle, l'intensification des activités agricoles visant à augmenter les rendements potentiels des cultures et un gain de stabilité en matière de production a eu pour conséquences une surexploitation des ressources naturelles, associée à une dégradation importante des sols et des eaux (dégradation de l'humus, pollution des eaux, des sols, de l'air, érosion de la biodiversité). Ce système est aujourd'hui questionné, en raison de ses effets potentiels sur la santé humaine, à la fois celle des agriculteurs et des consommateurs [4, 5]. L'appauvrissement des terres relatif à une exploitation trop longue ou trop intensive peut entraîner des déséquilibres dans la capacité des sols à apporter les nutriments nécessaires au métabolisme et au développement des plantes cultivées et donc, menacer l'intégrité des systèmes agricoles. Dans la recherche agronomique actuelle, le maintien de la fertilité du milieu est une préoccupation majeure, car il conditionne sur le long terme la durabilité des systèmes de culture. Mais la durabilité d'un système agraire repose non seulement sur des facteurs pédologiques, mais aussi économiques, agronomiques et culturels.

Les bonnes pratiques de gestion des cultures et les techniques adéquates de restauration des sols sont donc primordiales afin d'éviter de compromettre la durabilité d'une agriculture. Ce constat a incité la France à s'engager depuis 2010 dans une réforme agraire ayant pour objectif de mieux gérer les ressources, tout en limitant les risques de contamination des eaux et du sol par les pratiques agricoles. Le programme d'action national vise notamment l'épandage de fertilisants. Fin 2012, les ministères français en charge de l'agriculture et de l'écologie ont commandé à l'Inra, au CNRS et à Irstea une expertise scientifique collective sur les effets agronomiques et environnementaux, ainsi que les contraintes économiques et sociales, de l'usage des matières fertilisantes d'origine résiduaires (Mafor) en agriculture. L'objectif était d'enrichir la réflexion sur les critères de mise à disposition des Mafor, et sur les règles encadrant leur application en agriculture et sylviculture. Les résultats de cette expertise ont été consignés dans un rapport final en octobre 2014, mis à disposition sous la forme d'un document électronique (http ://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Expertises/Toutes-les-actualites/Expertise-Mafor-effluents-boues-et-dechets-organiques). Un des chapitres finaux de l'expertise, évoquant l'historique de l'utilisation des Mafor dans les systèmes de production agricoles la qualifie d'« aussi vieille que l'agriculture elle-même » [6] (p. 853). Si cette idée semble avoir trouvé toute légitimité dans le sens commun,

sa légitimité scientifique peut aujourd'hui être appréciée par l'archéologie dans une approche archéobotanique, que sont venus compléter plus récemment la biogéochimie isotopique et les biomarqueurs moléculaires.

2 Un enjeu majeur du développement durable

2.1 Pourquoi faut-il fertiliser les sols ?

Le sol est le principal milieu nutritif pour les plantes. Elles y puisent des éléments qui ne retournent pas au sol lorsque la plante est prélevée par l'agriculture. La production agricole végétale s'accompagne donc d'une perte, qu'il faut compenser si l'on veut assurer sa pérennité [7]. Aux pertes occasionnées par le prélèvement des plantes s'ajoutent les effets de battance, de ruissellement et d'érosion superficielle. La terre enrichie en nutriments et en matière organique disparaît, de sorte que les stocks doivent être impérativement renouvelés, à intervalles rapprochés, souvent annuels.

Fertiliser un sol consiste à y apporter des éléments minéraux nécessaires à la nutrition des végétaux. Les principaux sont les éléments majeurs : calcium (Ca), azote (N), phosphore (P), potassium (K), magnésium (Mg), mais aussi des oligo-éléments tels que fer, cuivre, zinc, manganèse... Outre ces éléments chimiques, il est primordial d'enrichir le sol en matière organique, déterminant majeur de sa fertilité [8, 9]. En effet, la seule présence d'éléments nutritifs ne garantit pas aux végétaux une croissance optimale. Encore faut-il que ces éléments soient assimilables et régulièrement disponibles. La bonne décomposition et incorporation de la matière organique joue ainsi un rôle primordial dans la cohésion et l'organisation des particules qui composent la structure d'un sol :

- la matière organique (M.O.) influe sur les propriétés physiques des sols (porosité, stabilité de la structure, capacités de rétention en eau). Une structure aérée mais cohérente favorise un bon travail du sol, le développement racinaire, le maintien d'une faune riche et active et une meilleure cohésion de la matrice sédimentaire, qui acquiert ainsi une résistance accrue vis-à-vis des risques d'érosion ;
- la M.O. influe également sur les propriétés chimiques du sol (capacité du sol à fixer les éléments nutritifs pour les plantes) et fournit une part importante de l'azote provenant de sa minéralisation. Le complexe argilo-humique, ou CAH, désigne l'association des argiles à la matière organique, appelée aussi l'humus. Ce rôle est à la fois structurel et métabolique. Sous l'effet stabilisateur du calcium, les cations du sol – ses éléments nutritifs – à charge (+), s'associent aux argiles à forte charge (-) sous forme d'agrégats. Ces agrégats constituent autant d'éléments-réservoir pour les nutriments qui, sous cette forme, sont beaucoup moins susceptibles d'être éliminés par lessivage. Ils sont donc disponibles plus longtemps pour les cultures et, qui plus est, la formation de nombreux agrégats améliore la structure du sol [10] ;
- enfin, la M.O. conditionne les propriétés biologiques des sols (abondance, diversité, activité des micro-organismes, principaux acteurs du fonctionnement du sol). La faune du sol entretient sa porosité, assure l'humification des matières organiques et la minéralisation des nutriments, rendus ainsi assimilables.

Elle participe également de la fixation de l'azote atmosphérique, par réduction enzymatique de N2 (azote moléculaire) en NH3 (azote ammoniacal), processus que les Fabacées effectuent de manière indirecte en symbiose avec des bactéries associées à la rhizosphère de leurs racines mycorhizées.

2.2 L'invention des engrais minéraux

En Europe les agronomes de la fin du XVIII^{e} siècle sont convaincus de la nécessité de l'emploi des engrais, et le XIX^{e} siècle voit les premiers travaux d'analyse scientifique pour une rationalisation de la fertilisation [7]. En 1840, J. Liebig expose pour la première fois dans un traité de chimie agricole la théorie de la nutrition minérale des plantes et exprime deux lois fondamentales de l'agronomie : la loi de restitution, suivant laquelle le maintien du rendement des cultures exige une restitution au sol des éléments chimiques qui ont été prélevés par les plantes ; la loi du minimum, suivant laquelle le rendement des cultures est conditionné par l'élément fertilisant présent en la plus faible teneur dans le sol. L'importance de l'azote, du phosphore et du potassium est vite reconnue et la production industrielle d'engrais chimiques débute dès la seconde moitié du XIX^{e} siècle [7]. C'est au XX^{e} siècle que sont mises en œuvre les solutions apportées par les agronomes du siècle précédent. En France, l'augmentation de la consommation des engrais chimiques est prodigieuse dans la première moitié du XX^{e} siècle et l'usage des engrais azotés de synthèse se généralise après la seconde guerre mondiale. L'après-guerre voit enfin une profonde modification des fondements théoriques de la fertilisation : il s'agit désormais de créer dans les sols les conditions optimales de nutrition pour les plantes. On manie désormais dans la pratique générale la notion de pH, celle d'échange cationique, on connaît bien mieux la minéralogie des argiles et la chimie organique, tandis que la pédologie permet une définition et un inventaire des sols pour un ajustement de l'usage des fertilisants [11].

2.3 Le recours aux matières fertilisantes d'origine résiduaire

Si le recours aux engrais minéraux est allé croissant au cours du XX^{e} siècle, plus récemment la dégradation des taux de matière organique des sols, la raréfaction des ressources minières et l'accroissement du coût de fabrication des engrais azotés de synthèse, ont amené à réorienter les pratiques de fertilisation vers l'emploi de matières fertilisantes d'origine résiduaire (les Mafor) [9]. Ces Mafor sont très majoritairement des effluents d'élevage, mais également des matières issues de l'industrie agro-alimentaire, des déchets verts, déchets ménagers et compost urbains, des boues d'épuration urbaines [12].

L'utilisation des Mafor dans les systèmes de production agricoles n'est pas nouvelle. La pratique de l'utilisation par les paysans de fumiers et lisiers autoproduits par leur propre élevage ou les élevages locaux est très ancienne (voir ci-dessous). Les « auteurs » latins comme Pline l'Ancien (I^{er} siècle après J.-C.), Columelle (I^{er} siècle après J.-C.) et Palladius (V^{e} siècle après J.-C.) font référence dans leurs traités d'agriculture à l'apport de matières organiques dans les champs et comparent la qualité de différents engrais (Pline, *Nat. Hist.*, XVII, 4, 1 ; Columelle, *De re rustica*, II, 13-15 ; Palladius, *De re rustica*, X, 1). Ils détaillent les opérations d'apprêt (Caton, *Agr.*, 37, 3 et 39, 1), le matériel nécessaire au maniement, le transport (Varron, *R.*, 1, 19, 3), le stockage, les

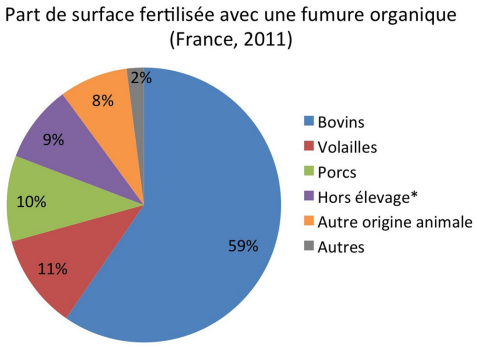


FIGURE 1 – Part de surface fertilisée avec une fumure organique selon l'origine de l'effluent (France, 2011). En 2011, les apports organiques ont concerné un quart de la sole des grandes cultures (* hors élevage = effluents de l'industrie betteravière, composts urbains, boues d'épuration urbaines et industrielles). Source Agreste – Enquête sur les pratiques culturales, 2011.

modes et les précautions d'utilisation de ce fumier (voir par exemple Columelle, *Rust.*, VIII, 3, 8, ou XII, 18, 3). Les résidus de curages de fossés, de caniveaux et de latrines ont également fortement été mis à contribution durant l'Antiquité et le Moyen Âge [13, 14, 15]. Dès l'époque romaine, dans les centres urbains, les excréments et fumiers animaux font l'objet d'une gestion rationnelle [16] (pp. 169-171). Ce fumier, le *stercus*, constituait une matière première précieuse, dont les propriétaires immobiliers tiraient un revenu. Pour les villes romaines, il s'agissait d'ailleurs plus d'une denrée que d'un déchet [17]. Il trouve sa place dans des structures dédiées, et peut être soigneusement récupéré pour amender les parcelles cultivées, comme le montre l'exemple de la ville de York, au Royaume-Uni [18]. À la fin de l'époque médiévale, la charge de vidanger les latrines est dévolue à des professionnels, comme les « maîtres fifis » parisiens [19]. Dès le XVIII^{e} siècle, une utilisation massive de matières en provenance des villes et de résidus industriels s'opère en Angleterre [20]. Au XIX^{e} et jusqu'au début du XX^{e} siècle à Paris, les déchets organiques urbains (déchets ménagers, boues d'épuration, crottin de cheval et curage des fosses d'aisance) sont réutilisés pour la fertilisation de l'agriculture périurbaine [21, 6].

Aujourd'hui, si cette orientation prend à nouveau de l'ampleur, c'est qu'elle est notamment dictée par les incitations à réintroduire une mixité agriculture-élevage et, dans un contexte d'urbanisation mondiale, qu'elle se soucie, dans les relations fonctionnelles entre la ville et l'agriculture intra- ou périurbaine, de récupération et de valorisation des déchets urbains par l'agriculture. En ce sens l'agriculture urbaine rend un service écosystémique à la ville, en absorbant ses déchets [6].

2.4 Les pistes de recherche actuelles sur l'usage des Mafor en agriculture

Les pistes de recherche actuelles sur l'usage des Mafor en agriculture ont pour objectifs principaux de préciser leur valeur fertilisante et leur impact sur les sols ; de déterminer l'influence de leur épandage sur la santé des plantes cultivées et sur le développement des plantes adventices ; d'identifier des risques environnementaux et sanitaires (notamment la contamination chimique et par des agents pathogènes, la dissémination de l'antibiorésistance). Ces pistes impliquent notamment le développement d'outils d'aide à la gestion de l'épandage, ainsi qu'une réflexion sur la chaîne globale de production des matières fertilisantes depuis l'alimentation du bétail (pour exemple, les nouvelles recommandations actuelles sur l'alimentation porcine, visant à diminuer les teneurs en cuivre et en zinc des déjections) [22, 23, 24].

3 Une problématique très ancienne : les indices archéologiques

L'amendement des sols cultivés avec des déchets domestiques est suspecté de longue date par les archéologues. La découverte de mobilier archéologique hors site, notamment de tessons de céramique fortement fragmentés et roulés (dont les bords ont été abrasés par l'usure) ainsi que de restes carbonisés, est considérée depuis les années 1970 comme un témoin des épandages agraires. Ceux-ci ont été relevés dans des champs fossiles datés du Néolithique moyen (IV^{e} millénaire avant J.-C. [25]) et de l'âge du Bronze [26]. Depuis, les cartographies de mobilier découvert hors site (fragments de poterie isolés de structures d'habitat) ont été utilisées pour tenter de restituer spatialement les parcelles amendées [27, 28, 29, 30].

D'autres méthodes ont été développées dans le même temps, visant à identifier des signatures de matières fécales ou à déterminer de quels animaux les fumiers pouvaient être issus [31, 32, 33]. Elles font appel aux traces moléculaires laissées par les apports organiques, notamment fécaux, mais aussi à la micromorphologie et l'archéopédologie [34]. Parallèlement, l'analyse conjointe des isotopes stables et des biomarqueurs multimoléculaires de la couche arable préhistorique a révélé des indices d'amélioration des propriétés nutritives des sols agricoles [35]. Une valeur élevée de $\delta^{15}N$ peut être une indication de l'apport de fumier, mais c'est grâce à l'analyse de biomarqueurs stéroïdes (stérols, stanols et stanones) et acides biliaires que la source des matières fécales pourra être différenciée [36, 37].

Au sein des habitats, la cartographie du phosphore a permis dans certains cas favorables de repérer les étables et les fosses à fumier, comme à La Chapelle-Saint-Nicolas à Saint-Brice-sous-Forêt dans le Val-d'Oise [38]. D'autres exemples sont connus dans le nord de la France pour les âges des métaux et l'époque romaine [39, 40, 41].

L'épandage de fumier et de déchets domestiques comme engrais peut également être mis en évidence par l'aspect des semences et des racines préservées dans les couches archéologiques. La fouille, sur une surface d'environ 3,5 ha, d'un niveau daté de l'âge du Bronze final, à Potterne dans le Wiltshire, a ainsi conduit à interpréter ce site comme un espace anciennement cultivé. Cette hypothèse a été émise en raison de la miné-

ralisation des restes végétaux qu'il contenait. Ce processus par lequel du phosphate de calcium se substitue à la matière organique intervient en présence de concentrations d'excréments ou de fumiers [42]. Les espèces végétales identifiées grâce à leurs semences minéralisées appartenaient à la flore sauvage qui se développe dans des terrains enrichis en fumier animal. 64 genres / espèces considérés comme adventices des champs cultivés ont été distingués [26].

Certains silos et fosses datés des périodes laténienne et romaine ont livré des ensembles importants de semences de plantes sauvages préservées par minéralisation. Comme dans le cas du site de Potterne, les plantes identifiées ne correspondaient pas à des espèces domestiques, dont les fruits ou les graines auraient pu être consommés, mais à des plantes sauvages relevant de la flore des espaces cultivés ou des prairies. Un silo daté des III^{e}-II^{e} siècle avant J.-C. (st. 4312) du site de Gonesse « ZAC Tulipes nord II » dans le Val-d'Oise [1] a par exemple livré 671 semences minéralisées sur un total de 1014 spécimens, soit 66 % de l'ensemble. Les espèces impliquées correspondaient à des adventices des cultures ou des terres mises en jachère, comme *Anagallis arvensis, Chenopodium gr. polyspermum, Eleocharis palustris, Fallopia convolvulus, Fumaria officinalis, Galium spec., Papaver rhoeas/dubium, Ranunculus, Rumex, Sambucus ebulus, Solanum nigrum, Stachys et Urtica urens* (Zech-Matterne et Derreumaux *in* [43]). Des indices plus probants ont été observés pour le site de « La Grande Fosse » à Épiais-lès-Louvres [2], toujours dans le Val-d'Oise, car ici les séries minéralisées sont associées à une fosse accolée à un bâtiment (st. 3) interprété comme une étable, datée de la première moitié du IV^{e} siècle après J.-C. [41]. À la base de cette fosse (st. 5107) a été observé un niveau verdâtre qui a livré 331 semences minéralisées pour seulement 7 restes carbonisés, ces derniers associés à des espèces domestiques. Le reste du spectre se compose d'espèces croissant dans les champs et les prairies, comme *Anagallis arvensis, Anthemis, Ballota nigra, Chenopodium, Daucus carota, Eleocharis palustris, Glechoma hederacea, Linum catharticum, Myosotis, Papaver argemone, P. rhoeas/dubium, différents Polygonum et Poa, Prunella vulgaris, Ranunculus, Reseda lutea, Rumex, Stellaria, Torilis, Urtica dioica.* Dans l'hypothèse où la fosse aurait recueilli des fumiers d'étable, la minéralisation des semences résulterait de l'ingestion d'herbacées sauvages par des animaux pâturant en prairies et dans des zones de friches ou de jachères proches des champs.

4 L'archéobotanique, la carpologie et l'étude des adventices

Ces quelques exemples illustrent la possibilité d'utiliser les études de restes archéologiques de plantes pour aborder la question des amendements. Au sein des disciplines archéobotaniques, la carpologie est celle qui s'intéresse aux fruits et graines. Au cours de l'histoire, plusieurs préoccupations ont dicté les sélections opérées parmi les grandes lignées de céréales : l'acquisition d'un rachis solide afin que le grain demeure dans l'épi sur pied au moment de la récolte, la fragilité des enveloppes qui libèrent le grain dès le battage, les propriétés de réponse à certaines contraintes climatiques et bien sûr les exigences des plantes en matière de nutriments, en raison de l'augmentation de la population et de l'épuisement des sols [44]. Dès le second âge du Fer (V^{e}-I^{er} siècles

1. Fouille de Ph. Granchon, INRAP.
2. Opération dirigée par J. Avinain, INRAP.

avant J.-C.) on constate en France septentrionale l'essor massif de la culture des blés nus, c'est-à-dire des espèces les plus exigeantes en nutriments (figure 2) [45].

Des indices complémentaires en matière de pratiques agricoles sont apportés par les flores des champs cultivés, messicoles et adventices des cultures sarclées, spécifiquement adaptées aux fortes pressions anthropiques qui règnent dans ces milieux. Comme les flores adventices des champs bénéficient des mêmes conditions de croissance que les plantes cultivées, et que les associations d'espèces varient en fonction de la nature des sols et des façons culturales qui leurs sont appliquées, les indications écologiques qu'elles nous fournissent sont révélatrices de certaines pratiques.

Les groupements adventices ont cependant fortement évolué au cours du temps, de sorte que les classifications phytosociologiques actuelles, basées sur l'observation d'espèces caractéristiques, ne reflètent pas les végétations passées [46, 47, 48]. Ainsi la classe de la *Chenopodietea* (végétation des cultures sarclées, anciens potagers et jardins, rudérales) était-elle beaucoup plus abondante dans les champs anciens. En revanche, les caractéristiques anatomiques et biologiques des adventices sont demeurées beaucoup plus stables, ce qui a conduit des archéobotanistes du laboratoire de Sheffield à développer une méthode d'étude fondée sur les « attributs fonctionnels » des espèces, c'est-à-dire les caractères physiologiques qui régulent leurs cycles de vie (FIBS [49]). Ils ont établi leurs référentiels dans des parcelles cultivées de manière non mécanisée, en Grèce dans les Cyclades, en Espagne dans les Asturies, ainsi qu'au Proche et Moyen Orient [50, 51, 52, 53, 54, 55], puis ont appliqué leurs observations à des assemblages carpologiques datés du Néolithique et de l'âge du Bronze [56, 57, 58, 59, 60].

En Europe tempérée, les flores adventices ont, à l'inverse des régions circumméditerranéennes, été fortement impactées par les pratiques agricoles contemporaines. Seules peuvent être mobilisées les données accessibles dans les flores [61, 62, 63, 64] pour analyser les cortèges floristiques liés aux espaces cultivés. Les séries de données carpologiques mobilisables concernent néanmoins plus de 200 sites archéologiques et 140 espèces adventices. En nous inspirant des méthodes décrites plus haut, l'évolution des pratiques agraires, entre l'âge du Bronze final et la fin de la période romaine, en France septentrionale, a pu être appréhendée par l'intermédiaire des flores messicoles, rudérales et prairiales, dont l'évolution a été analysée par phase chronologique d'un siècle environ [65, 66, 67]. Globalement, on observe jusqu'au IV^{e} siècle avant J.-C. des agricultures plutôt intensives qui maintiennent un niveau de fertilité élevé. La localisation des sites en fond de vallée, les dimensions des parcelles et leur localisation autour des habitats sont probablement des éléments qui expliquent cette situation. À la fin des âges des métaux, les implantations topographiques des fermes se diversifient [68, 69] et les spectres d'adventices témoignent de modes d'exploitation qui incorporent aussi des terres moyennement et peu fertiles. Elles sont mises en valeur en y adaptant des espèces plus tolérantes (l'orge, potentiellement le seigle, très localement l'engrain). Les études carpologiques viennent encore s'enrichir du signal biogéochimique (isotopique) préservé dans les graines de céréales, qui peut également informer sur les conditions de culture, notamment l'épandage de fumiers dans les sols. La section suivante en donne les principes de lecture et quelques résultats concernant deux moments forts de

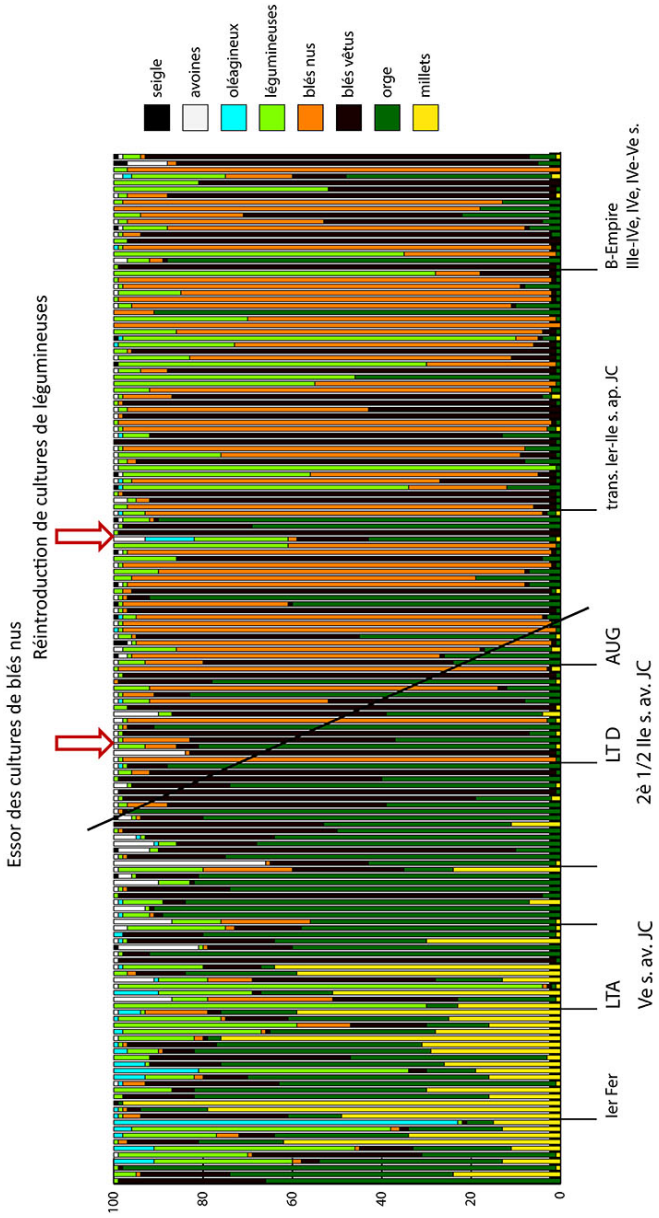


Figure 2 – Évolution des grandes catégories de plantes alimentaires dans les sites de France septentrionale ayant livré plus de cent restes d'espèces domestiques. Les valeurs sont exprimées en pourcentages du NMI, tous contextes confondus. Chaque barre représente un site. Les sites sont ordonnés selon une séquence chronologique continue, mais interchangeables à l'intérieur d'une phase. On observe en orange le développement des cultures de blés nus et en vert clair celui des cultures de légumineuses. Données : F. Toulemonde, J. Wiethold, V. Zech.

l'histoire de l'agriculture céréalière en Europe : d'une part les premiers temps de son installation et de sa diffusion, d'autre part les réorientations rendues nécessaires par l'important essor démographique de la fin de l'âge du Fer, la densification de l'habitat qui s'ensuivit, jusqu'à l'urbanisation bien établie aux débuts des périodes historiques.

5 L'analyse isotopique des graines archéologiques

5.1 Effet de l'usage du fumier sur le $\delta^{15}N$ des céréales

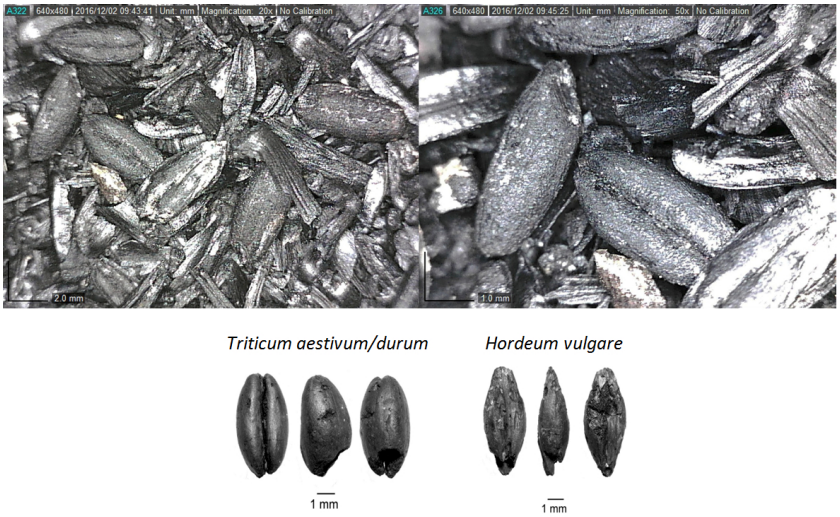


Figure 3 – Exemple de résidu de stock céréalier carbonisé, laissant voir des grains d'amidonnier et leurs enveloppes, détachées des grains du fait de la carbonisation. On retrouve régulièrement en contexte de rejet ou en situation primaire des concentrations de grains qui ont été carbonisés dans l'incendie du bâtiment qui les contenait. Ces produits étant le reflet direct de récoltes et la préservation des restes étant souvent optimale, c'est sur ce type d'assemblages que les analyses isotopiques se sont concentrées. À droite : détail de la précédente. En dessous : graines carbonisés de blé nu (à gauche) et d'orge vêtue (à droite).

Des études expérimentales sur les rendements céréaliers ont été mises en place dès la seconde moitié du XIX^{e} siècle en Europe. Certains de ces terrains expérimentaux ont été maintenus jusqu'à l'heure actuelle et continuent de nourrir la recherche agronomique. Ils fournissent des données uniques pour estimer l'impact des apports de matières organiques à travers les siècles, en plus de constituer un référentiel exceptionnel pour l'interprétation du matériel archéologique. Les champs expérimentaux de Rothamsted (Grande-Bretagne, 1844-présent), Askov (Danemark, 1894-présent) et de Bad Lauchstädt (Allemagne, 1902-présent), notamment, ont livré des séries de grains de céréales soumises à différents régimes de culture et différents taux de fertilisation des sols avec des fumiers animaux. L'analyse biogéochimique de ces grains a montré l'effet marqué de l'usage de fumiers animaux sur la composition isotopique en azote ($\delta^{15}N$) des plantes [70, 71] : l'azote mis à disposition dans le sol par le fumier sous la forme de nitrates est enrichi en ^{15}N par la volatilisation d'ammoniac gazeux qui entraîne une perte préférentielle de l'isotope léger ^{14}N dans l'atmosphère ; les plantes qui utilisent cet azote s'en trouvent enrichies d'autant. Par la suite, la mise en place

d'expérimentations complémentaires sur le court terme, sous différents régimes climatiques (Angleterre, Syrie), ainsi que le développement de recherches en contexte réel dans des systèmes agricoles traditionnels (en Roumanie, Grèce et Espagne), ont permis de préciser les termes de la relation entre l'intensité et la durée de la fumure et le $\delta^{15}N$ des céréales : plus le sol est amendé, plus le $\delta^{15}N$ des plantes augmente. Ceci est valable pour les céréales, qui tirent leurs ressources azotées du sol ; les légumineuses (pois, lentilles notamment), qui utilisent l'azote atmosphérique, ne sont impactées que dans des conditions de fertilisation extrêmement intensives ($<$ 35 tonnes/ha) [39].

Quand bien même la majorité des grains de céréales retrouvés en contexte archéologiques ont été conservés sous forme carbonisée (figure 3), une quantité infime d'azote subsiste, suffisamment pour que soit pratiquée une analyse isotopique. Celle-ci est alors conduite sur des lots d'une dizaine de grains. Les résultats de diverses expérimentations de carbonisation ne s'accordent pas quant à l'effet de la carbonisation sur le $\delta^{15}N$ des grains : certaines études ont conclu à l'absence d'impact [71, 72, 73], tandis que d'autres concluent à un enrichissement significatif mais systématique, donc corrigible. À nouveau, les avis divergent sur l'ampleur de l'enrichissement (de 0,3 à 1 ‰) ; dans tous les cas, cette valeur est d'un ordre de grandeur inférieur à celui que l'on cherche à observer en cas d'usage intensif de fumiers.

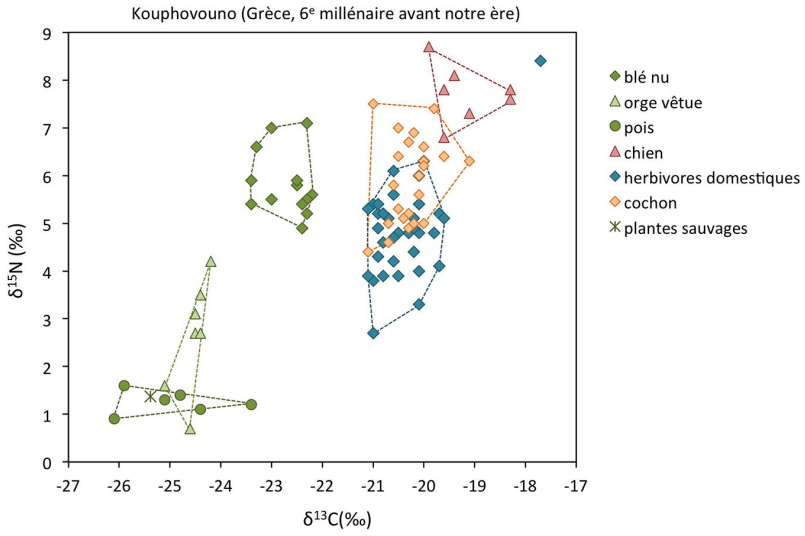


Figure 4 – Compositions isotopiques en carbone ($\delta^{13}C$) et en azote ($\delta^{15}N$) de grains de céréales carbonisés de Kouphovouno et du collagène osseux de restes animaux du même site. Les valeurs de $\delta^{15}N$ des graines ont été corrigées de -1‰ pour compenser l'effet de la carbonisation. Les valeurs de $\delta^{13}C$ et $\delta^{15}N$ moyennes des plantes sauvages sont estimées d'après la moyenne des valeurs mesurées sur les herbivores domestiques (bœuf, mouton, chèvre) (modifié d'après [80]).

Pour l'Europe tempérée, une échelle d'interprétation a été proposée : des valeurs de $\delta^{15}N$ comprises entre 2,5 et 6 ‰ renvoient à un niveau intermédiaire de fertilité, résultant soit de la fertilité naturelle d'un sol dans les premières années de son ex-

ploitation, soit d'un épandage de faible intensité, ou encore de l'effet résiduel d'une histoire d'épandage plus intense. Au delà de 6 ‰, les valeurs de $\delta^{15}N$ reflètent un apport intense et systématique de fumiers [60]. Ces valeurs seuils peuvent en réalité dépendre des conditions climatiques et pédologiques locales. Aussi, pour démontrer qu'une céréale a été cultivée sur un sol fumé, on raisonne par comparaison avec les valeurs de $\delta^{15}N$ des plantes sauvages, autres que les adventices trouvées en association avec les céréales cultivées. Ces plantes sauvages sont rares en contextes archéologiques, aussi leur valeur moyenne de $\delta^{15}N$ est-elle estimée à partir de celles mesurées dans le collagène osseux d'herbivores sauvages qui s'en sont nourris [77].

5.2 Agriculture intensive et usage des fumiers dans le Néolithique européen

Les céréales domestiques et les pratiques agricoles se sont diffusées en Europe, depuis le Proche-Orient, à l'aube du VII^{e} millénaire avant J.-C. Les premiers paysans d'Europe pratiquaient une agriculture de petite échelle, exploitant intensivement des parcelles gérées sur le long terme [78, 56, 79]. On pense aujourd'hui qu'un paramètre clef de la diffusion de l'agriculture à travers les différentes zones climatiques de l'Europe, suivant des gradients longitudinal et latitudinal, a résidé dans une interconnexion forte entre élevage et cultures végétales, et un usage des fumiers pour amender les sols cultivés. Les stratégies ont pu varier à l'échelle régionale. C'est ce qu'a révélé une analyse isotopique systématique de grains de céréales issus de sites néolithiques du début du VI^{e} au III^{e} millénaire avant J.-C., qui a montré aussi une variabilité dans l'usage des fumiers et dans l'intensité de cette pratique selon les sites et selon les céréales au sein même des assemblages [77]. Les résultats de l'analyse des céréales cultivées du site du Néolithique moyen-récent de Kouphovouno (Grèce, VI^{e} millénaire avant J.-C.), illustrent particulièrement bien un usage raisonné des fumiers (figure 4). Dans ce contexte, le blé nu et l'orge vêtue ont tous deux livré des valeurs de $\delta^{15}N$ plus élevées que celle de la végétation locale (estimée d'après la valeur moyenne mesurée sur les os des herbivores domestiques) et tombant dans la gamme attendue pour des cultures amendées. La culture du blé nu, ayant livré des valeurs de $\delta^{15}N$ particulièrement élevées, était pratiquée intensivement sur des parcelles amendées, tandis que l'orge vêtue, peut-être destinée à la constitution de fourrage, a pu être cultivée de manière plus extensive sous un régime de fertilisation moins intense [77, 80].

5.3 Usage du fumier dans des agricultures plus extensives (second âge du fer, époque romaine en Gaule du nord)

Au début du second âge du Fer (V^{e} siècle avant J.-C.), la polyculture intensive qui perdurait depuis l'âge du Bronze cède la place à des systèmes plus extensifs fondés sur la céréaliculture, d'abord axée sur des espèces à grains vêtus telles que l'orge vêtue et les blés amidonnier et épeautre [65]. La fin de l'âge du Fer connaît, en France septentrionale, un essor démographique et une densification de l'habitat sans précédent, qui s'expriment par un pic du nombre d'établissements agricoles nouvellement créés généralisé à l'ensemble des régions [68] (p. 232). Les campagnes sont intensément mises à contribution pour nourrir une population nombreuse et la palynologie enregistre pa-

rallèlement de nouveaux pics de défrichement qui ne concernent plus uniquement les vallées mais toutes les formations végétales (Leroyer *in* [81]), ces défrichements étant liés à la nécessité de mettre en culture de nouvelles parcelles et parallèlement d'offrir aux troupeaux de nouvelles zones de pâturages. À ces évolutions succèdent le développement des oppida et les débuts de l'urbanisation en Gaule du nord, qui entraînent des réorganisations dans les circuits d'approvisionnement, du fait de la concentration d'une partie de la population dans ces habitats groupés, et de son investissement dans des domaines distincts de la production agricole, notamment l'artisanat spécialisé. Le développement dans le Bassin parisien d'agricultures spécifiquement dévolues à la production de céréales faciles à nettoyer, cette fois de type blés nus (blés tendres et blés durs), peut sans doute être interprété comme une réponse à ces nouvelles nécessités. La contrainte technique est très probablement à l'origine de ce phénomène, car dans le sud de la Gaule, où l'urbanisation est plus précoce et où le basculement vers les blés nus s'observe à la transition Fer 1 – Fer 2 (V^{e} siècle avant J.-C.), la circulation de blés vêtus décortiqués précède celle de blés nus [82] (pp. 325 *sq.*). Les agricultures ont dû adapter leurs moyens de production à cette spécialisation à grande échelle, car si les blés nus fournissent des rendements élevés, ceux-ci sont corrélés à des exigences tout aussi développées en termes de préparation du sol et d'amendements. Les questions de fertilisation et de mise en valeur de nouvelles terres agricoles sont donc au cœur de ces évolutions sociales majeures. La conquête romaine qui décime main d'œuvre et campagnes n'a en rien freiné le développement des cultures de blés nus et les a au contraire privilégiées et encore étendues. Les pratiques de bonification des sols n'étaient pas ignorées.

L'équilibre agro-pastoral se manifeste parallèlement par le développement de l'élevage bovin avec des villes de plus en plus en demande de produits alimentaires. L'analyse des dépotoirs domestiques et des abattoirs-boucheries qui se mettent en place à la fin du I^{er} siècle et au début du II^{e} siècle de notre ère, révèle l'importance de cette production bovine. Les établissements ruraux de l'actuel Nord-Pas-de-Calais et Picardie sont de grands pourvoyeurs de viande de bœuf. Cela est vrai en nombre de têtes mais aussi en poids de viande par tête puisque cette époque voit une augmentation très importante de la taille des animaux (les bovins, mais aussi les moutons, les porcs – voir par exemple [83, 84]). Les systèmes de production et de transformation de la viande se voient donc grandement modifiés avec l'amélioration de la taille et la forme des herbivores domestiques. Dans le sud du Bassin parisien, l'élevage semble être différent, avec une proportion beaucoup plus importante de moutons dans les campagnes. L'équilibre surfaces céralières / surface de pâturage s'organise différemment sur le territoire des Gaules en fonction des substrats géomorphologiques et sans doute des cultures agropastorales et alimentaires des occupants de ces territoires.

Un siècle après leur essor, des cultures de légumineuses sont réintroduites dans les systèmes de culture fondés sur les blés nus (figure 2). Était-ce une manière de diversifier les pratiques de bonification des terres, ou bien l'équilibre entre les prélèvements et les apports, via les pratiques d'amendement, devenait-il difficile à maintenir ? Nous avons abordé ces questions par l'intermédiaire d'analyses isotopiques effectuées sur des produits de récolte, de manière à mieux évaluer les potentialités et limites de la fumure aux époques laténiennes et romaines [85].

Des analyses de $\delta^{15}N$ sur grains archéologiques pour les espèces suivantes : blés nus, épeautre, amidonnier et orge vêtue, ont été effectuées sur douze sites du nord de la France (régions Île-de-France et Champagne-Ardenne). Ces occupations couvrent la période qui va du IV^{e} siècle avant J.-C. au V^{e} siècle après J.-C. Les valeurs isotopiques des grains indiquaient pour la région Île-de-France une bonne fertilité des sols, soit naturellement élevée, soit soigneusement entretenue, et des valeurs moyennes à basses pour la région Champagne-Ardenne. Si le $\delta^{15}N$ des grains archéologiques peut être utilisé comme un indicateur de l'état nutritionnel des plantes, reflétant la qualité des sols agricoles ou les pratiques d'amendement, le valeur de $\delta^{15}N$ du collagène d'os d'herbivores sauvages (le cerf, *Cervus elaphus*) a été utilisée comme référence pour estimer la valeur théorique de végétaux qui auraient poussé dans des sols non amendés. Cette démarche a été entreprise pour les sites où les valeurs particulièrement élevées de $\delta^{15}N$ sur grains soulevaient la question de pratiques anthropiques telle que la fumure intensive du sol. La valeur de $\delta^{15}N$ estimée pour des végétaux de sols non amendés (*i.e.* l'alimentation des cerfs) a été comparée aux valeurs mesurées à partir des grains de céréales ; des valeurs significativement plus élevées dans les céréales indiquaient leur mise en culture dans des sols enrichis à l'aide de fumiers animaux.

Pour les sites de Palaiseau (2nde moitié du II^{e} siècle avant J.-C.), Acy-Romance (II^{e} siècle avant J.-C.) et Jouars-Pontchartrain (I^{er}-III^{e} siècle après J.-C.), un total de 31 spécimens adultes de cerf ont été analysés.

Des différences importantes dans les régimes de culture des deux zones d'étude ont été enregistrées. Dans les deux sites de la région Île-de-France (Palaiseau et Jouars-Pontchartrain) les valeurs de $\delta^{15}N$ des céréales sont nettement plus élevées que celles des plantes de sols non amendés, ce qui suggère une utilisation du fumier comme engrais organique pour améliorer la fertilisation. Au contraire, en région Champagne-Ardenne, le $\delta^{15}N$ mesuré sur les céréales du site d'Acy-Romance présente des valeurs semblables à celles estimées pour les plantes sauvages, ce qui signifie que les sols n'ont pas été amendés (figure 5).

Cette approche croisée, la première de ce type réalisée en France, nous permet de constater l'adaptation de chaque système agraire à chaque situation locale. Il est donc nécessaire de reconstruire les pratiques agricoles dans des systèmes considérés à petite échelle, car elles sont très influencées par le contexte local, pédologique ou culturel.

6 Conclusion

L'idée que l'utilisation des engrais naturels dans les systèmes de production agricoles est ancienne semble tenir du bon sens, mais les informations objectives permettant d'une part de l'attester et d'autre part de réfléchir à son origine, sont relativement récentes. On sait qu'ils ont été utilisés dès le VI^{e} millénaire avant notre ère et sans doute avant. Il resterait sans doute à réfléchir sur les processus qui ont conduit à la découverte de leur effet sur les productions agricoles et à la compréhension qu'on pu en avoir les premiers agriculteurs. Si cet aspect de la question restera pendant longtemps encore du domaine de la conjecture, on peut penser que l'utilisation des fumiers s'est probablement développée dans le cadre de systèmes agropastoraux en recherche

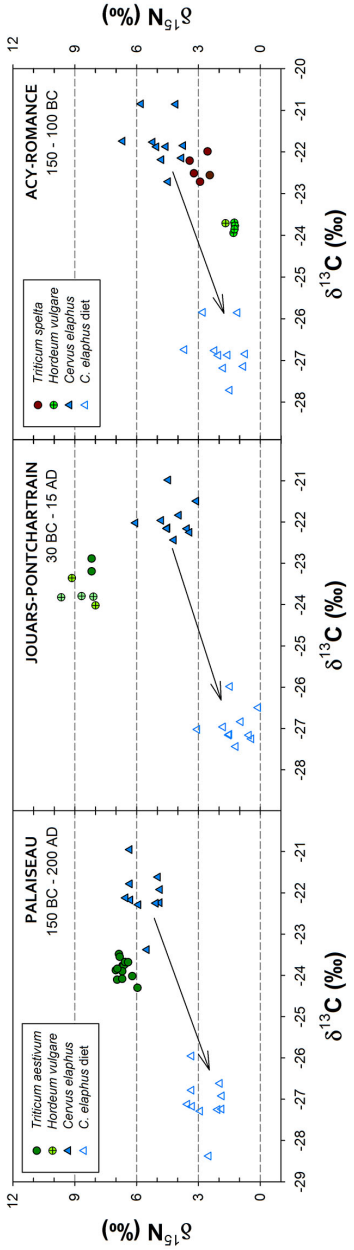


FIGURE 5 – Compositions isotopiques en carbone ($\delta^{13}C$) et en azote ($\delta^{15}N$) de grains de céréales carbonisés (blés nus *Triticum aestivum* et orge vêtue *Hordeum vulgare*) et du collagène osseux de cerf (*Cervus elaphus*) pour les sites de Palaiseau, Jouars-Pontchartrain et Acy-Romance. Les valeurs de $\delta^{13}C$ et $\delta^{15}N$ de l'alimentation des herbivores sauvages (*i.e.* plantes sauvages) ont été estimées d'après les valeurs mesurées sur les cerfs.

constante d'équilibre, entre la volonté d'évacuer les déchets produits par l'élevage suffisamment loin des lieux d'habitation, et la nécessité de bonifier les terres cultivées. Les sources écrites antiques révèlent quant à elles l'intérêt que les Anciens pouvaient y porter et la valorisation pécuniaire qu'ils en tiraient. Avec le développement important des engrais azotés, ce point d'équilibre s'est déplacé, et on constate que, pour des questions économiques et environnementales, le système est encore appelé à se modifier à l'époque actuelle.

En fin de compte, l'archéologie permet de donner une dimension historique à la perception que l'on peut avoir de nos jours de la gestion des Mafor, en permettant d'en décrire certains des enjeux aux périodes anciennes.

Remerciements

L'analyse des pratiques culturales sur les sites d'Île-de-France et de Champagne-Ardenne a été réalisée dans le cadre du programme de recherche RurLand "Rural Landscape in north-eastern Roman Gaul" (ERC-2013-ADG, agreement 338680, dir. Michel Reddé). Nous remercions Sabine Houot d'avoir porté à notre connaissance le rapport final de l'ESCo "Matières fertilisantes d'origine résiduaire".

Sources latines

Pline, *Naturalis Historia*, XVII, 4, 1.

Columelle, *De re rustica* II, 13-15.

Palladius, *De re rustica*, X, 1.

Caton, *De Agricultura*. XXXVII, 3 et XXXIX, 1.

Varron, *De re rustica*, 1, XIX, 3.

Columelle, *De re rustica*, VIII, 3, 8 ou XII, 18, 3.

Références

[1] A. Arranz-Otaeguia, S. Colledge, L. Zapata, L. C., Teira-Mayolini, J.J. Ibáñez, Regional diversity on the timing for the initial appearance of cereal cultivation and domestication in southwest Asia. Proceedings of the National Academy of Sciences. 113 (49), 14001-14006, 2016.

[2] L. Cavalli-Sforza, « The spread of agriculture and nomadic pastoralism : insights from genetics, linguistics and archaeology », dans The Origins and Spread of Agriculture and Pastoralism in Eurasia, eds. D.V. Harris, UCL Press, pp. 51–69, 1996.

[3] M. Zvelebil, « Mesolithic societies and the transition to farming : problems of time, scale and organization », dans Mesolithic Societies of Temperate Eurasia and their Transition to Farming, eds. M. Zvelebil, Cambridge University Press, New York, pp. 167–187, 1986.

[4] D. W. Kolpin, E. M. Thurman, S. M. Linhart, Finding minimal herbicide concentrations in ground water ? Try looking for their degradates. Science of the Total Environment. 248 (2–3), 115–122, 2000.

[5] C. Bedos, P. Cellier, R. Calvet, E. Barriuso, B. Gabrielle, Mass transfer of pesticides into the atmosphere by volatilisation from soils and plants : overview. Agronomy. 22, 21-33, 2002.

[6] C. Aubry, « Insertion des Mafor dans les systèmes techniques de production agricoles – Approche agronomique au niveau de l'exploitation et au niveau du territoire », dans Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier. Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Rapport final de l'ESCo "Matières fertilisantes d'origine résiduaire" – octobre 2014, http ://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Expertises/Toutes-les-actualites/Expertise-Mafor-effluents-boues-et-dechets-organiques, pp. 852-868, site consulté en octobre 2016.

[7] J. Boulaine, Quatre siècles de fertilisation : première partie. Étude et Gestion des Sols. 2-3, 201-208, 1995a.

[8] P. Loveland, J. Webb, Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions : a review. Soil and Tillage Research. 70 (1), 1-18, 2003.

[9] S. Houot, « Effet des apports de Mafor sur les teneurs en matière organique des sols », dans Rapport final de l'ESCo "Matières fertilisantes d'origine résiduaire" – octobre 2014, http ://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Expertises/Toutes-les-actualites/Expertise-Mafor-effluents-boues-et-dechets-organiques, pp. 418-444, site consulté en octobre 2016.

[10] J. C. Masson, « Comprendre la formation et la fertilité des sols », http ://acces.ens-lyon.fr/, 2012, site consulté en novembre 2016.

[11] J. Boulaine, Quatre siècles de fertilisation : seconde partie. Étude et Gestion des Sols. 2-4, 219-226, 1995b.

[12] C. Etrillard, S. Lupton, M. Pradel, A. Tibi, « Cadrage de l'ESCo », dans Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier. Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Rapport final de l'ESCo "Matières fertilisantes d'origine résiduaire" – octobre 2014, http ://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Expertises/Toutes-les-actualites/Expertise - Mafor-effluents-boues-et-dechets-organiques, pp. 9-114, site consulté en octobre 2016.

[13] H. F. Gray, Sewerage in *Ancient and Medieval Times. Sewage Works Journal. 12, 939-946, 1940.*

[14] A. Derville, L'agriculture du Nord au Moyen Age (Artois, Cambrésis, Flandre wallonne), Presses universitaires du Septentrion, Collection Histoire et Civilisation, Villeneuve d'Ascq, 332 pages, 1999.

[15] S. Preiss, « Alimentation et productions végétales du castrum de Boves et de ses environs (IX^{e} - XVII^{e} siècle) (Amiens, Nord) », thèse de doctorat (Histoire et archéologie) de l'Université de Picardie, Amiens, 412 pages, 2011.

[16] A. Bouet, Les latrines dans les provinces gauloises, germaniques et alpines, CNRS Editions, Supplément à Gallia 60, Paris, 488 pages, 2009.

[17] P. Cordier, « Le destin urbain du *stercus* et de l'urine », dans La ville et ses déchets dans le monde romain : rebuts et recyclages – Actes du colloque de Poitiers 19-21 septembre 2002, éd. Monique Mergoil, Archéologie et histoire romaine, 10, pp. 51-60, 2003.

[18] A. Hall, H. Kenward, « Sewers, Cesspits, and middens : a survey of the evidence of 2000 years of waste disposal in York, UK », dans Sanitation, latrines and intestinal parasites in past populations, eds. P. D. Mitchell, Ashgate Publishing, Farnham, pp. 99–120, 2015.

[19] J. P. Leguay, « La laideur de la rue polluée à la fin du Moyen Âge : "*Immondicites, fiens et bouillons*" accumulés sur les chaussées des villes du royaume de France et des grands fiefs au XV^{e} siècle », dans *Le beau et le laid au Moyen Âge*, Actes du 24^{e} Colloque du Centre Universitaire d'Études et de Recherches Médiévales d'Aix, tenu à Aix-en-Provence, Février 1999, eds. *Collectif,* Université Aix-Marseille I, Centre universitaire d'études et de recherches médiévales, Collection Sénéfiance 23, pp. 299-319, 2000.

[20] L. Brunt, Where there's muck, there's brass : the market for manure in the industrial revolution, Economic History Review. 60 (2), 333-372, 2007.

[21] S. Barles, Feeding the City : Food Consumption and Circulation of Nitrogen, Paris, 1801-1914, Science of the Total Environment. 375, 48-58, 2007.

[22] S. Menasseri « Effet des Mafor sur les propriétés chimiques et physiques des sols cultivés », dans Rapport final de l'ESCo "Matières fertilisantes d'origine résiduaire" – octobre 2014, http ://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Expertises/Toutes-les-actualites/Expertise-Mafor-effluents-boues-et-dechets-organiques, pp. 446-459, site consulté en octobre 2016.

[23] L. Vieublé Gonod « Impacts sur l'abondance, la diversité et l'activité des organismes du sol », dans Rapport final de l'ESCo "Matières fertilisantes d'origine résiduaire" – octobre 2014, http ://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Expertises/Toutes-les-actualites/Expertise-Mafor-effluents-boues-et-dechets-organiques, pp. 479-505, site consulté en octobre 2016.

[24] J. Fuchs, « Influence de l'épandage de Mafor sur la santé des plantes cultivées », dans Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier. Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Rapport final de l'ESCo "Matières fertilisantes d'origine résiduaire" – octobre 2014, http ://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Expertises/Toutes-les-actualites/Expertise-Mafor-effluents-boues-et-dechets-organiques, pp. 506-511, site consulté en octobre 2016.

[25] C.C. Bakels, The beginnings of manuring in western Europe. Antiquity. 71 (272), 442-445, 1997.

[26] L. M. E. McCobb, D. E. G Briggs, W. J. Carruthers, R. P. Evershed, Phosphatisation of seeds and roots in a Late Bronze Age deposit at Potterne, Wiltshire, UK. Journal of Archaeological Science. 30, 1269-1281, 2003.

[27] N. Poirier, L. Nuninger, Techniques d'amendement agraire et témoins matériels. Pour une approche archéologique des espaces agraires anciens. Histoire et Sociétés Rurales. 38, 11-50, 2012.

[28] R. Sallares, « Fertilizer », dans The Encyclopedia of Ancient History, eds. R. S. Bagnall, K. Brodersen, C.B. Champion, A. Erkshine, S.R. Huedner, Wiley-Blackwell 2012, publié en ligne le 26 octobre 2012, DOI : 10.1002/9781444338386.wbeah06136.

[29] R. Jones, Signatures in the Soil : The Use of Pottery in Manure Scatters in the Identification of Medieval Arable Farming Regimes. Archaeological Journal. 161, 159-188, 2004.

[30] N. Poirier, « Archaeological evidence for agrarian manuring : Studying the time-space dynamics of agricultural areas with surface-collected off-site material », dans Agrarian technology in the medieval landscape, eds. J. Klapste, Brepols Publishers, p. 279-290, 978-2-503-55137-1.<halshs-01303474>2016.

[31] J. Baeten, E. Marinova, V. De Laet, P. Degryse, D. De Vos, M. Waelkens, Faecal biomarker and archaeobotanical analyses of sediments from a public latrine shed new light on ruralisation in Sagalassos, Turkey. *Journal of Archaeological Science.* 39 (4), 1143-1159, 2012.

[32] C. Lancelotti, M. Madella, The "invisible" product : developing markers for identifying dung in archaeological contexts. Journal of Archaeological Science. 39, 953–963, 2012.

[33] V. Linseele, H. Riemer, J. Baeten, D. De Vos, E. Marinova, C. Ottoni, Species identification of archaeological dung remains : A critical review of potential methods. *Environmental Archaeology.* 18, 5-17, 2013.

[34] E. Marinova, V. Linseele, M. Kühn, Bioarchaeological research on animal dung – possibilities and limitations. *Environmental Archaeology.* 18, 1-3, 2013.

[35] F. Lauer, K. Prost, R. Gerlach, S. Patzold, M. Wolf, S. Urmersbach, E. Lehndorff, E. Eckmeier, W. Amelung, Organic fertilization and sufficient nutrient status in prehistoric agriculture ? Indications from multi-proxy analyses of archaeological topsoil relicts. Plos One 9(9) : e106244. doi :10.1371/journal.pone.0106244, 2014

[36] I. D. Bull, M. J., Lockheart, M.M. Elhmmali, D.J. Roberts, R.P. Evershed, The origin of faeces by means of biomarker detection. Environment International. 27, 647-654, 2002.

[37] J. J. Birk, M. Dippold, G. L. B. Wiesenberg, B. Glaser, Combined quantification of faecal sterols, stanols, stanones and bile acids in soils and terrestrial sediemnt by gas chromatography-mass spectrometry. Journal of Chromatography A. 1242, 1-10, 2012.

[38] V. Rouppert, J. Y. Dufour, K. Fechner, « An example of a fruitful discussion between a pedologist and an archaeologist. A 1st-4th century AD agricultural enclosure with a stable and a manure pit at "Chapelle Saint-Nicolas" in Saint-Brice-sous-Forêt (Val-d'Oise, France) », dans Archaeology, soil- and life-sciences applied to enclosures and fields. Proceedings of the Session 'From microprobe to spatial analysis – Enclosed and buried surfaces as key sources in Archaeology and Pedology', European Association of Archaeologists, 12th Annual Meeting, Krakow 2006, eds. K. Fechner, Y. Devos, M. Léopold, J. Völkel, BAR International Series 2222, Oxford, p.133-142, 2011.

[39] K. Fechner, « Case studies of phosphorus mapping in Late La Tene to Roman enclosures and ponds between Rhine and Seine », dans Archaeology, soil- and life-sciences applied to enclosures and fields. Proceedings of the Session 'From microprobe to spatial analysis – Enclosed and buried surfaces as key sources in Archaeology and Pedology', European Association of Archaeologists, 12th Annual Meeting, Krakow 2006, eds. K. Fechner, Y. Devos, M. Léopold, J. Völkel, BAR International Series 2222, Oxford, p. 29-64, 2011.

[40] K. Fechner, Y. Devos, M. Léopold, J. Völkel, Archaeology, soil- and life-sciences applied to enclosures and fields. Proceedings of the Session 'From microprobe to spatial analysis – Enclosed and buried surfaces as key sources in Archaeology and Pedology', European Association of Archaeologists, 12th Annual Meeting, Krakow, 2006, BAR International Series 2222, Oxford, 2011.

[41] F. Broes, V. Clavel, W. Declerc, K. Fechner, V. Rouppert, J. Vanmoerkerke, A la recherché des espaces de stabulations : Etude pluridisciplinaire d'habitats du Néolithique au Moyen Age dans le Nord de la France. Archéopages. 35, Vivre avec les bêtes, 6-17, 2012.

[42] F. J. Green, Phosphatic mineralization of seeds from archaeological sites. Journal of Archaeological Science. 6, 279-284, 1979.

[43] C. Touquet Laporte-Cassagne (dir.), Les sites ruraux du second âge du fer du Bassin versant du Crould en Val-d'Oise et ses marges, Revue archéologique d'Île-de-France, Supplément 3, à paraître.

[44] U. Büntgen, W. Tegel, K. Nicolussi, M. McCormick, D. Frank, V. Trouet, J. O.Kaplan, F. Herzig, K.-U. Heussner, H. Wanner, J. Luterbacher, J. Esper, 2500 years of European climate variability and human susceptibility. Science. 331, 578-580, 2011.

[45] V. Zech-Matterne, J. Wiethold, B. Pradat, avec la collaboration de F. Toulemonde, « L'essor des blés nus en France septentrionale : systèmes de culture et commerce céréalier autour de la conquête césarienne et dans les siècles qui suivent », dans Consommer dans les campagnes de la Gaule romaine. Actes du X^{e} colloque AGER tenu à Lille en Avril 2012, eds. X. Deru, R. Gonzalez-Villaescusa, W. De Clerc, Revue du Nord hors-série, Collection Art et Archéologie 21, 23-50, 2014.

[46] H. Küster, « Phytosciology and archaeobotany », dans Modelling ecological change, eds. D. R. Haris, K. D. Thomas, University College London, Londres, p. 17-25, 1991.

[47] G. Hillman, « Phytosociology and ancient weed floras : taking account of taphonomy and changes in cultivation methods », dans Modelling ecological change, eds. D. R. Haris, K. D. Thomas, University College London, Londres, p. 27-40, 1991.

[48] K. E. Behre, S. Jacomet, « The ecological interpretation of archaeobotanical data » dans Progress in old world palaeoethnobotany, eds. W. Van Zeist, K. Wasylikowa, K.-E. Behre, Balkema, Rotterdam, p. 80-108, 1991.

[49] M. Charles, G. Jones, J.G. Hodgson, FIBS in Archaeobotany : functional interpretation of weed floras in relation to husbandry practices. Journal of Archaeological Science. 24, 1151-1161, 1997.

[50] A. Bogaard, C. Palmer, M. Charles, J.G. Hodgson, A FIBS approach to the use of weed ecology for the archaeobotanical recognition of crop rotation regimes. Journal of Archaeological Science. 26, 1211-1224, 1999.

[51] M. Charles, A. Bogaard, G. Jones, J. Hodgson, P. Halstead, Towards the archaeobotanical identification of intensive cereal cultivation : present-day ecological investigation in the mountains of Asturias, northwest Spain. Vegetation History and Archaeobotany. 11, 133-142, 2002.

[52] M. Charles, C. Hoppé, A. Bogaard, G. Jones, J. Hodgson, Using weed functional attributes for the identification of irrigation regimes in Jordan. Journal of Archaeological Science. 30, 1429-1441, 2003.

[53] G. Jones, M. Charles, S. Colledge, P. Halstead, « Towards the archaeobotanical recognition of winter cereal irrigation : an investigation of modern weed ecology in northern Spain », dans Res Archaeobotanicae : 9th Symposium IWGP, eds. H. Kroll, R. Pasternak, Oetker-Voges-Verlag, Kiel, p. 49-68, 1995.

[54] G. Jones, A. Bogaard, P. Halstead, M. Charles, H. Smith, Identifying the intensity of crop husbandry practices on the basis of weed floras. Annual of the British School at Athens. 94, 167-189, 1999.

[55] G. Jones, A. Bogaard, M. Charles, J. Hodgson, Distinguishing the effects of agricultural practices relating to fertility and disturbance : a functional ecological approach in archaeobotany. Journal of Archaeological Science. 27, 1073-1084, 2000.

[56] A. Bogaard, Neolithic farming in Central Europe. An archaeobotanical study of crop husbandry practices, Routledge, Londres, 209 pages, 2004.

[57] A. Bogaard, G. Jones, M. Charles, The impact of crop processing on the reconstruction of crop sowing time and cultivation intensity from archaeobotanical weed evidence. *Vegetation History and Archaeobotany.* 14, 505-509, 2005.

[58] G. Jones, M. Charles, A. Bogaard, J. Hodgson, C. Palmer, The functional ecology of present-day arable weed floras and its applicability for the identification of past crop husbandry. Vegetation History and Archaeobotany. 14, 493-504, 2005.

[59] G. Jones, M. Charles, A. Bogaard, J. Hodgson, Crops and weeds : the role of weed functional types in the identification of crop husbandry methods. Journal of Archaeological Science. 37, 70-77, 2010.

[60] R. A. Fraser, A. Bogaard, T. Heaton, M. Charles, G. Jones, B. T. Christensen, P. Halstead, I. Merbach, P.R. Poulton, D. Sparkes, A.K. Styring, Manuring and stable nitrogen isotope ratios in cereals and pulses : towards a new archaeobotanical approach to the inference of land use and dietary practices. Journal of Archaeological Science. 38, 2790–2804, 2011.

[61] J. Lambinon, J.-E. De Langhe, L. Delvosalle, J. Duvigneaud, Nouvelle flore de la Belgique, du Grand Duché de Luxembourg, du Nord de la France et des régions voisines (Ptéridophytes et Spermatophytes), Editions du Patrimoine du Jardin botanique national de Belgique, Meise, 1092 pages, 1992.

[62] P. Julve, Baseflor. Index botanique, écologique et chorologique de la flore de France. Programme Catminat. http ://perso.wanadoo.fr/philippe.julve/catminat.htm, Version : « 1er décembre 2013 », 1998.

[63] P. Jauzein, La notion de messicole ; tentative de définition et de classification. Monde Plantes. 458, 19-23, 1997.

[64] P. Jauzein, O. Nawrot, Flore d'Ile-de-France, Editions QUAE, Toulouse, 969 pages, 2011.

[65] V. Zech-Matterne, C. Brun, « Vers une agriculture extensive ? Etude diachronique des productions végétales et des flores adventices associées, au cours de la période laténienne, en France septentrionale », dans Évolution des sociétés gauloises du second âge du fer, entre mutations internes et influences externes, Actes du XXXVIII^{e} colloque international de l'AFEAF tenu à Amiens en Mai 2014, eds. F. Malrain, G. Blancquaert, Revue Archéologique de Picardie, n° spécial 30, 623-638, 2016.

[66] F. Toulemonde, V. Zech-Matterne, J. Wiethold, C. Brun, F. Malrain, V. Riquier, avec la collaboration de F. Durand, « Évolution des modes de production agricole au cours du I^{er} millénaire av. n. è. dans l'Est de la France : propositions d'après l'analyse carpologique des adventices », dans Production et proto-industrialisation aux âges du fer. Perspectives sociales et environnementales, Actes du 39^{e} colloque international de l'AFEAF Nancy, 14-17 Mai 2015, eds. S. Marion, S. Defressigne, Revue Archéologique de l'Est, Dijon, accepté.

[67] E. Neveu, C. Brun, E. Bonnaire, G. Daoulas, M. Derreumaux, F. Durand, F. Toulemonde, J. Wiethold, V. Zech-Matterne, Inferring changes in Northern France crop cultivation regimes from the evolution of the weed flora composition, Communication orale, 17^{e} congrès IWGP, Paris, Museum national d'Histoire naturelle, 4-9 juillet 2016.

[68] F. Malrain, G. Blancquaert, T. Lorho, L'habitat rural du second âge du fer. Rythmes de création et d'abandon au nord de la Loire. CNRS Editions, Inrap Recherches archéologiques 7, Paris, 264 pages, 2013.

[69] F. Malrain, V. Zech-Matterne, G. Blancquaert, en collaboration avec G. Auxiette, C. Leroyer, T. Lorho, P. Méniel, « Apprehending Continuity and Discontinuity in Iron Age Soil Occupation and Rural Landscape through a Collective Database », dans Persistent economic ways of living. Production, distribution, and consumption in late prehistory and early history, Proceedings of the 19th EAA annual meeting held in Pilsen, Septembre 2013, eds. A. Danielisova, M. Fernandez-Götz, Archaeolingua 35, Budapest, p. 137-144, 2015.

[70] R. Bol, J. Eriksen, P. Smith, M. H., Garnett, K. Coleman, B. Christensen, The natural abundance of ^{13}C, ^{15}N, ^{34}S and ^{14}C in archived (1923-2000) plant and soil samples from the Askov long-term experiments on animal manure and mineral fertilizer. Rapid Communications in Mass Spectrometry. 19, 3216-3226, 2005.

[71] A. Bogaard, T. Heaton, P. Poulton, I. Merbach, The impact of manuring on nitrogen isotope ratios in cereals : archaeological implications for reconstruction of diet and crop management practices. Journal of Archaeological Science. 34, 335-343, 2007a.

[72] M. Aguilera, J. L. Araus, J. Voltas, M. O. Rodriguez-Ariza, F. Molina, N. Rovira, R. Buxo, J. P. Ferrio, Stable carbon and nitrogen isotopes and quality traits of fossil cereal grains provide clues on sustainability at the beginnings of Mediterranean agriculture. Rapid Communications in Mass Spectrometry. 22, 1653-1663, 2008.

[73] M. Kanstrup, I. K. Thomsen, P. H. Mikkelsen, B. T. Christensen, Impact of charring on cereal grain characteristics : linking prehistoric manuring practice to delta N-15 signatures in archaeobotanical material. Journal of Archaeological Science. 39, 2533-2540, 2012.

[74] R. A. Fraser, A. Bogaard, M. Charles, A. Styring, M. Wallace, G. Jones, P. Ditchfield, T. Heaton, Assessing natural variation and the effects of charring, burial and pre-treatment on the stable carbon and nitrogen isotope values of archaeobotanical cereals and pulses. Journal of Archaeological Science. 40, 4754-4766, 2013.

[75] A. Styring, H. Manning, R. Fraser, M. Wallace, G. Jones, M. Charles, T. Heaton, A. Bogaard, R. Evershed, The effect of charring and burial on the biochemical composition of cereal grains : investigating the integrity of archaeological plant material. Journal of Archaeological Science. 40, 4767-4779, 2013.

[76] E. K. Nitsch, M. Charles, A. Bogaard, Calculating a statistically robust δ^{13}C and δ^{15}N offset for charred cereal and pulse seeds. STAR : Science & Technology of Archaeological Research. 1, 1-8, 2015.

[77] A. Bogaard, R. Fraser, T. Heaton, M. Wallace, M. Charles, G. Jones, R. Evershed, A. Styring, N. Andersen, R. Arbogast, L. Bartosiewicz, A. Gardeisen, M. Kanstrup, U. Maier, E. Marinova, L. Ninov, M. Schäfer, E. Stephan, Crop manuring and intensive land management by Europe's first farmers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 110 (30), 1-6, 2013.

[78] P. Halstead, « Like Rising Damp ? An Ecological Approach to the Spread of Farming in South East and Central Europe », dans The beginnings of agriculture, eds. A. Milles, D. Williamset, N. Gardner, British Arhaeological Reports 496, Oxford, p. 23-53, 1989.

[79] A. Bogaard, G. Jones, « Neolithic farming in Britain and central Europe : contrast or continuity ? » dans Going over : the Mesolithic-Neolithic transition in North-West Europe, eds. A. Whittle, V. Cummings, British Academy, Londres, p. 357-375, 2007b.

[80] P. Vaiglova, A. Bogaard, M. Collins, W. Cavanagh, C. Mee, J. Renard, A. Lamb, A. Gardeisen, R. Fraser, An integrated stable isotope study of plants and animals from Kouphonouvo, southern Greece : a new look at Neolithic farming. Journal of Archaeological Science. 42, 201-215, 2014.

[81] G. Blancquaert, C. Leroyer, T. Lorho., F. Malrain, V. Zech-Matterne, « Rythmes de créations et d'abandons des établissements ruraux laténiens du second âge du fer et interactions environnementales » dans Variabilités environnementales, mutations sociales : nature, intensités, échelles et temporalités des changements, Actes des XXXIII^{e} Rencontres internationales d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes tenues au Fort Carré d'Antibes en Octobre 2011, eds. F. Bertoncello, F. Braemer,.APDCA, Antibes, p. 233-246, 2012.

[82] L. Bouby, « Agriculture dans le bassin du Rhône, du Bronze final à l'Antiquité. Agrobiodiversité, économie, cultures », thèse de doctorat de l'EHESS, Université de Toulouse le Mirail Toulouse, 963 pages, 2010.

[83] S. Lepetz, L'animal dans la société gallo-romaine de la France du Nord, Revue Archéologique de Picardie vol. n° spécial 12, Amiens, 1996.

[84] C. Duval, M.-P. Horard, S. Lepetz, Morphological evolution of bovines in Gaul, from the 2nd century BC to the Vth century AD : diversity of herds in the Seine valley (France) and Northern Gaul. Journal of Archaeological Sciences. 40, 3977–3990, 2013.

[85] M. Aguilera, M. Balasse, V. Zech-Matterne, Lepetz S., Crop fertility conditions in the North-Eastern Gaul : combination of stable isotope analysis of archaeobotanical and archaeozoological remains from La Tène period. Proceedings of the 21^{sh} EAA Annual Meeting, From isoscapes to farmscapes, 2-5 septembre 2015, Glasgow, UK. Environmental Archaeology. accepté.