



HAL
open science

Conditions environnementales de l'exploitation des espaces ruraux en Gaule du Nord

Christophe Petit, Nicolas Bernigaud, Annelise Binois, Estelle Camizuli,
Philippe Fajon, Kaï Fechner, Alain Giosa, Bastien Parrondo, Benoît
Rossignol, Jérôme Spiesser

► **To cite this version:**

Christophe Petit, Nicolas Bernigaud, Annelise Binois, Estelle Camizuli, Philippe Fajon, et al.. Conditions environnementales de l'exploitation des espaces ruraux en Gaule du Nord. Michel Reddé. Gallia Rustica 2. Les campagnes du nord-est de la Gaule, de la fin de l'âge du Fer à l'Antiquité tardive, 50 (2), Ausonius, pp.31-82, 2018, Mémoires, 978-2356132062. hal-02058164

HAL Id: hal-02058164

<https://hal.science/hal-02058164v1>

Submitted on 4 Jun 2020

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

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

Conditions environnementales de l'exploitation des espaces ruraux en Gaule du Nord

Christophe Petit

*Nicolas Bernigaud, Annelise Binois, Estelle Camizuli, Philippe Fajon, Kai Fechner,
Alain Giosa, Bastien Parrondo, Benoît Rossignol, Jérôme Spiesser**

L'étude des espaces ruraux du nord-est de la Gaule, depuis le milieu du II^e siècle a.C. jusqu'à la fin du V^e siècle p.C., nécessite de traiter un grand nombre de données archéologiques et paléoenvironnementales dans une perspective pluridisciplinaire. Celles-ci tiennent à la fois à la nature des sols, au climat et à l'action de l'homme, dont l'impact sur le milieu était déjà important au début de l'époque romaine. Depuis le début de l'Holocène¹, les paysages et les environnements se sont progressivement transformés sous l'effet des pulsations climatiques, et d'une anthropisation toujours croissante (Vernet 1997 ; Blondel 2006 ; Broodbank 2013). Les historiens et géographes ont souligné, de longue date, la grande diversité géographique de notre zone d'étude (Vidal de la Blache 1903 ; Febvre 1946 ; Braudel 1986, 40), constituée d'une multitude de pays². Au contraste de relief s'ajoute une variété de climats, de sols et de sous-sols, dont la mosaïque crée une diversité de terroirs³. Nous tenterons donc d'exposer, dans ce premier chapitre, les conditions écologiques dans lesquelles s'est développée l'agriculture de la fin de l'âge du Fer et de l'époque romaine.

LE MILIEU PHYSIQUE (CP, EC)

Le relief et l'hydrographie

La topographie générale de la zone d'étude est le résultat d'une longue histoire géologique. En fonction des paramètres d'altitude et de pente, on distingue des reliefs montagneux, les plateaux du Bassin de Paris, et les plaines (plaines du Rhin, de Bresse, et les Flandres) (fig. 1 et 2).

On peut isoler plusieurs massifs montagneux, des plateaux et des plaines :

— des massifs anciens d'âge hercynien (Vosges, Ardennes, Massif Central), essentiellement constitués par des ensembles granitiques et métamorphiques.

— le Jura, qui correspond à un relief jeune composé, d'ouest en est, par la zone de chevauchement (Revermont), les plateaux jurassiens (le premier à 400 m, le second à 600 m), puis à l'est le Jura plissé⁴.

1. Soit les dix derniers millénaires.
2. Le terme désigne ici une entité géographique et humaine.
3. Au sens d'étendue de terre exploitée.
4. Point culminant du Crêt de la Neige à 1 720 m.

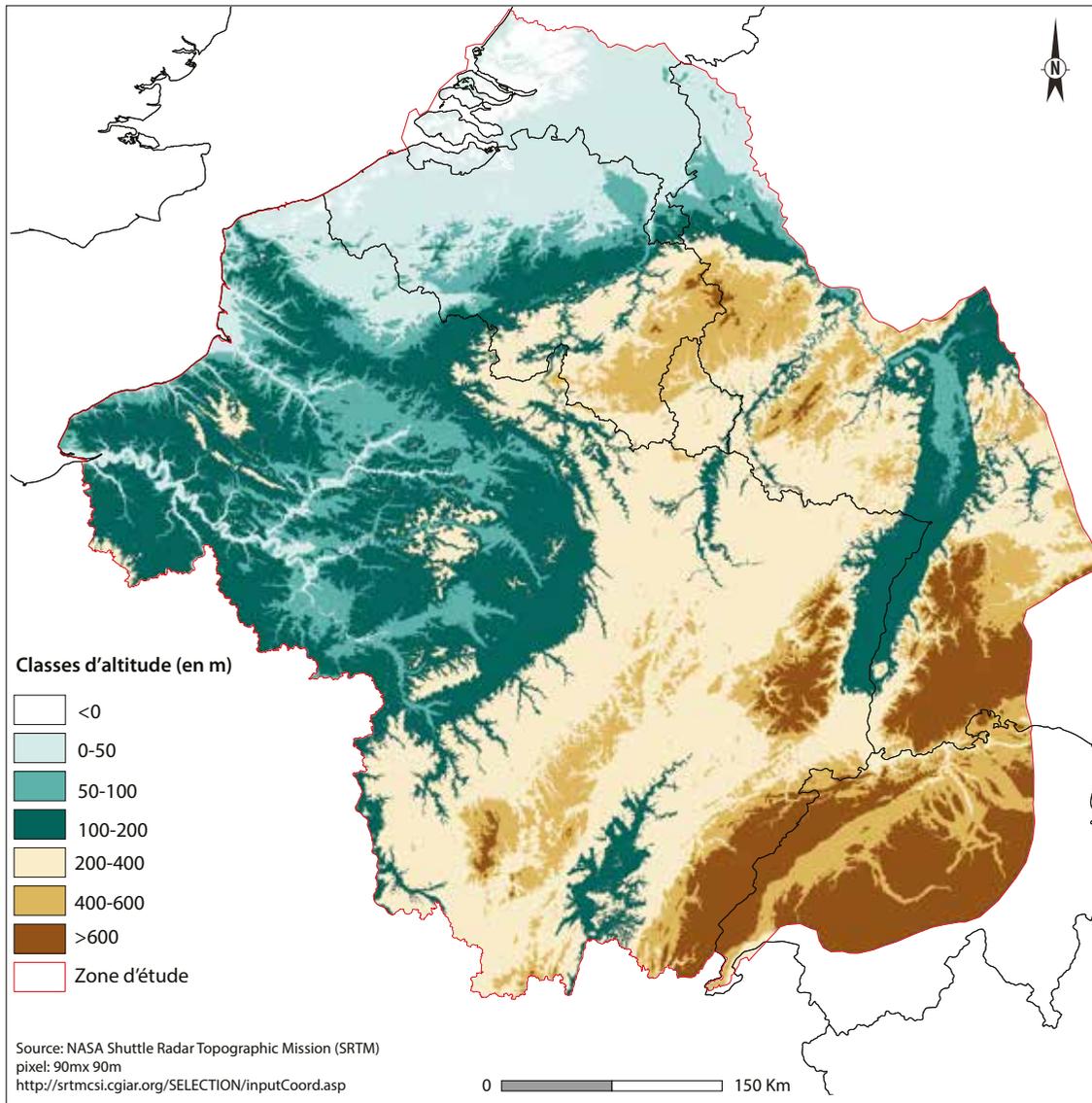


Fig. 1. Carte hypsométrique de la zone étudiée (Source : NASA, SRTM, résolution 90 m ; © E. Camizuli 2018).

— les plateaux du Bassin parisien, composés de séries sédimentaires argileuses, marneuses, calcaires, crayeuses ou gréseuses. La disposition monoclinale des couches explique les reliefs de cuesta circulaire délimitant les différentes régions du Bassin parisien : Vosges gréseuses, Auxois argileux, plateaux calcaires bourguignon ou lorrain, plateaux crayeux (Champagne, Picardie, Normandie), plateaux tertiaires d'Île-de-France. Le seuil de Bourgogne (ou plateau de Langres) correspond à un ensellement qui s'étend du Morvan aux Vosges, déterminant la ligne de partage des eaux entre Manche et Méditerranée.

— les plaines du Rhin et de Bresse, deux bassins sédimentaires tertiaires occupés par des bas-plateaux et des terrasses alluviales. Les basses plaines des Flandres constituent l'extrémité occidentale du rift ouest occidental occupé par le delta du Rhin et de la Meuse.

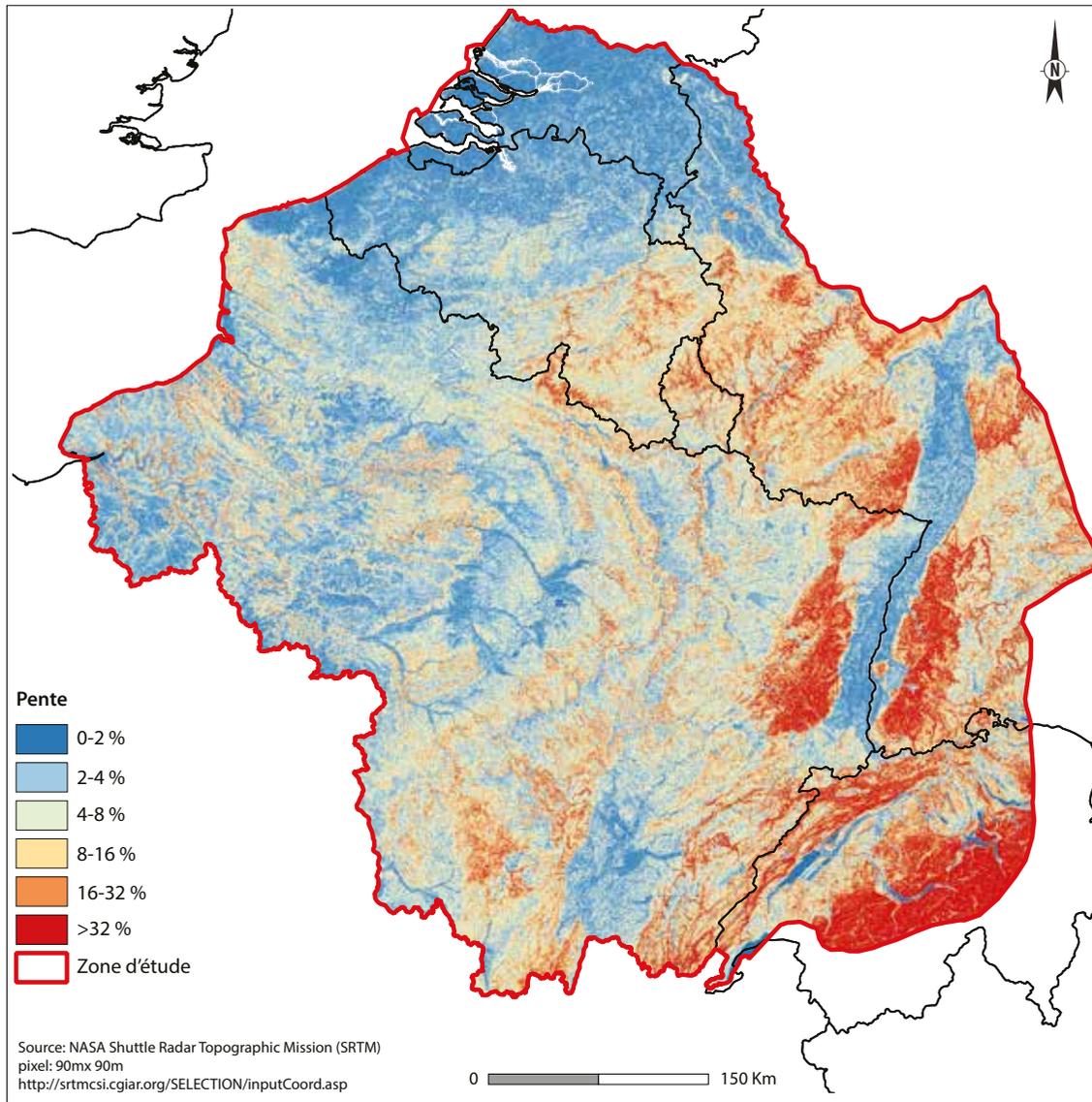


Fig. 2. Carte des pentes de la zone étudiée (Source : NASA, SRTM, résolution 90 m ; © E. Camizuli 2018).

À l'échelle de notre zone d'étude, plusieurs grands bassins hydrographiques doivent être distingués (fig. 3) : le bassin Rhin/Mer-du-Nord, le bassin Saône-Méditerranée, le bassin de la Seine/Manche et les affluents de la Loire qui draine la bordure occidentale du Morvan. Le seuil de Bourgogne, qui ne culmine qu'à 600 m d'altitude, forme une barrière à l'écoulement des eaux. La Seine et ses principaux affluents (Yonne, Marne, Aube, Armançon) constituent autant de vallées conséquentes qui recoupent les cuestas du Bassin parisien. Les larges couloirs alluviaux du Rhin et de la Saône sont implantés dans les fossés d'effondrement tertiaires.

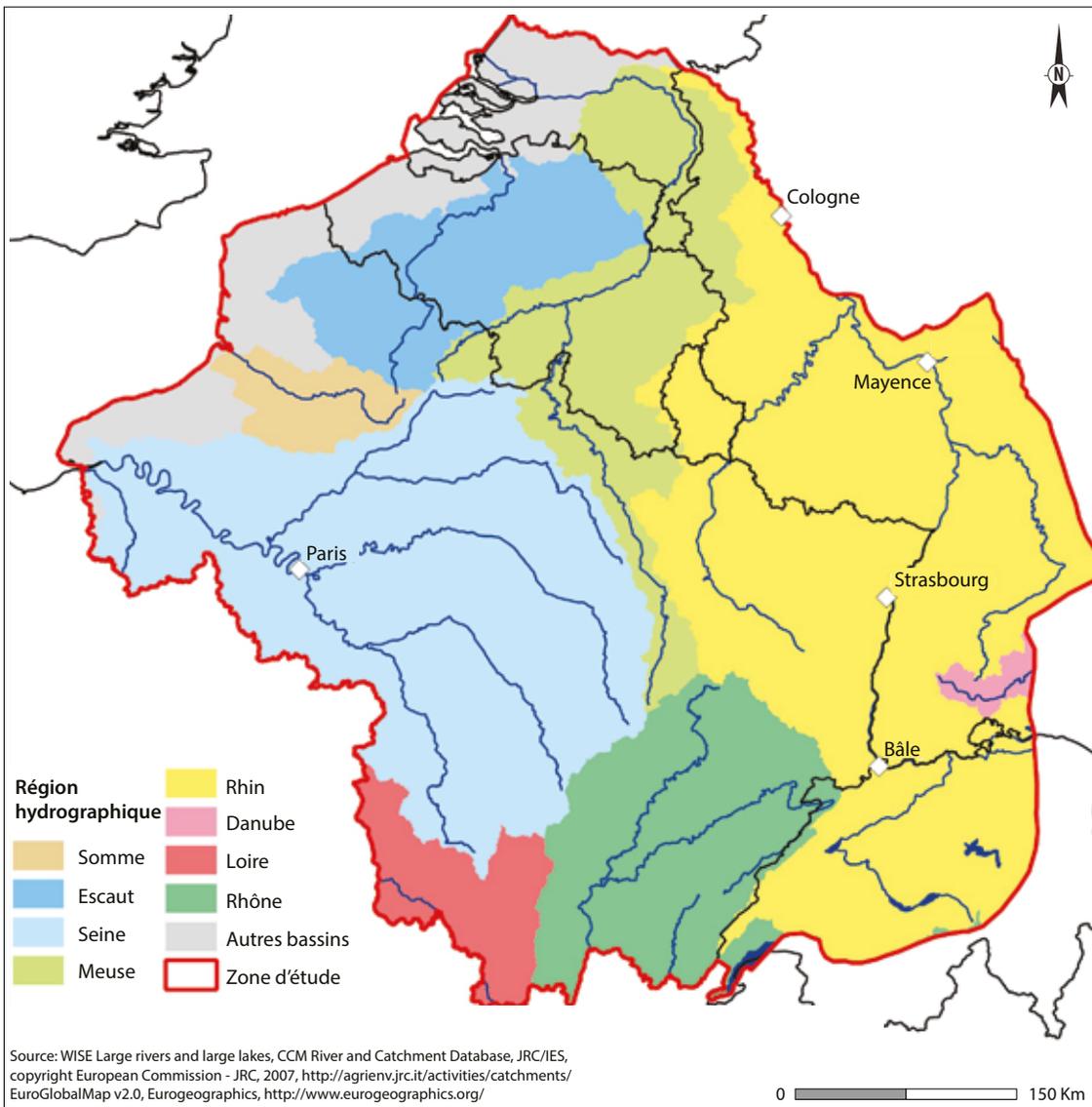


Fig. 3. Carte du réseau hydrographique de la zone étudiée (Source : WISE Large rivers and large lakes, EAA, 2012 ; © E. Camizuli 2018).

La couverture pédologique (EC, AG, CP)

La carte pédologique de la zone d'étude

De manière générale, le sol est issu de l'altération de la roche sous-jacente, sauf quand les terrains sont formés d'apports alluviaux, colluviaux et éoliens. Le matériau parental est donc un paramètre très stable qui peut exprimer la fertilité naturelle des sols. Les données de la base européenne au 1/1 000 000 permettent d'avoir une vision globale sur l'ensemble de notre zone d'étude, tant au niveau lithologique qu'au niveau pédologique⁵ (Panagos 2006 ; Panagos *et al.* 2012) (fig. 4).

5. Plusieurs référentiels pédologiques existent au niveau national français (Référentiel Pédologique, RP) ou international (*World Reference Base*, WRB). L'étude portant sur plusieurs états, c'est la classification internationale qui a été privilégiée ici. Cependant, il existe des

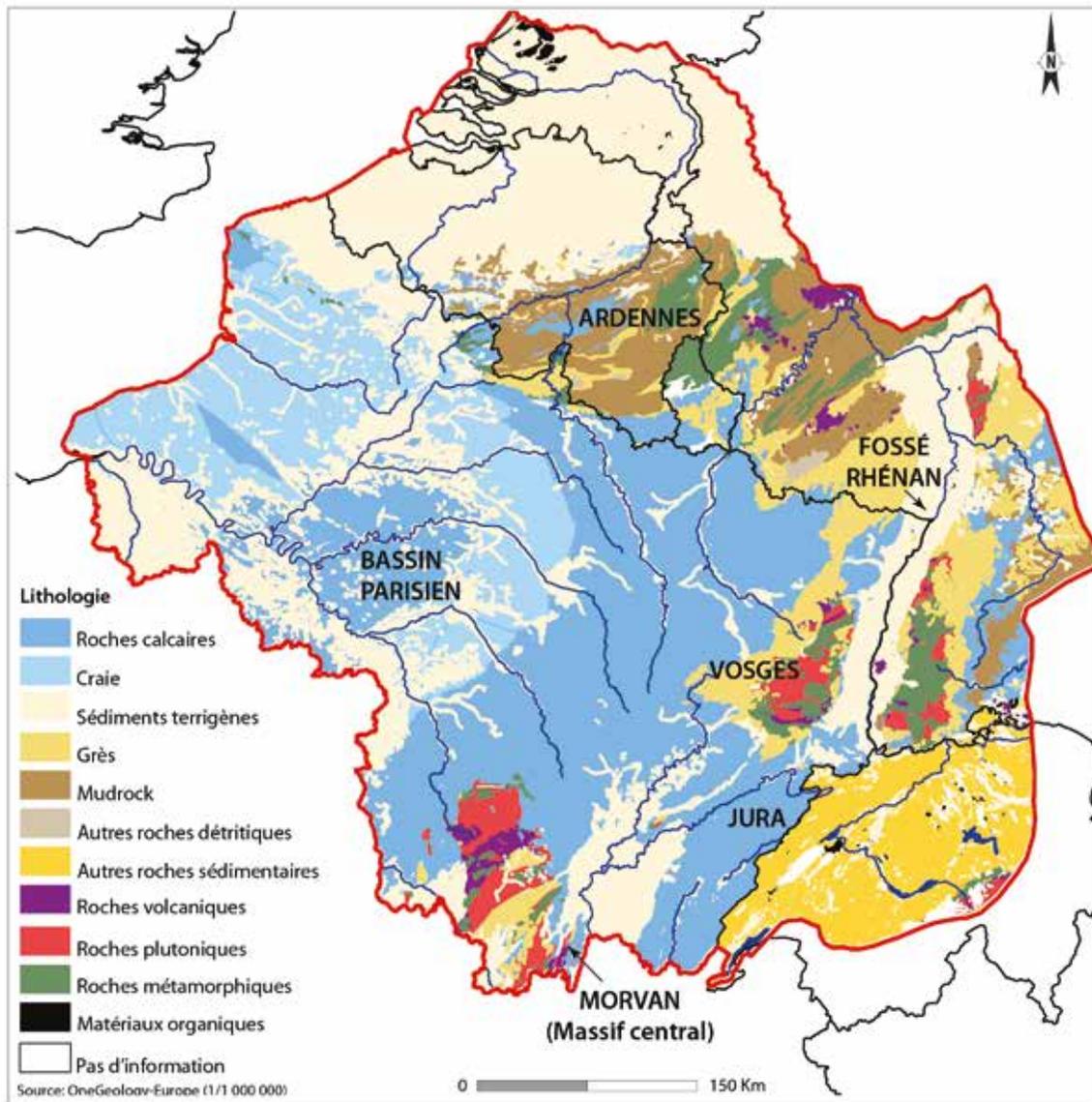


Fig. 4. Carte des matériaux originels dominants dans la zone étudiée (Source : OneGeology-Europe ; © E. Camizuli, 2018).

Les cinq principaux facteurs d'évolution des sols sont le contexte géologique (nature du matériau parental), la géomorphologie du terrain (relief), les organismes vivants, les influences climatiques et le temps (Jenny [1941] 1994). Dans l'espace considéré par notre enquête, la variabilité des sols, considérée à petite échelle, est considérable ; elle reflète en premier lieu la nature des substrats géologiques (fig. 5). La cartographie des grands types de sols peut être utilisée pour notre étude car elle est globalement considérée comme stable à l'échelle des derniers milliers d'années. Les formations les plus représentées, typiques des climats tempérés, sont les cambisols (également appelés "sols bruns", 46 %), et les luvisols (ou "sols lessivés", 18 %), (fig. 6). D'est en ouest, on passe progressivement des cambisols aux luvisols. La majorité des sols lessivés est observée sur des limons qui tapissent des plateaux ou des terrasses alluviales. Les fluvisols (10 %) sont présents dans les vallées alluviales.

similarités entre ces deux référentiels, et certains Grands Ensembles de Références (GER) du RP correspondent avec les *References Soils Groups* du WRB (Legros 2007)

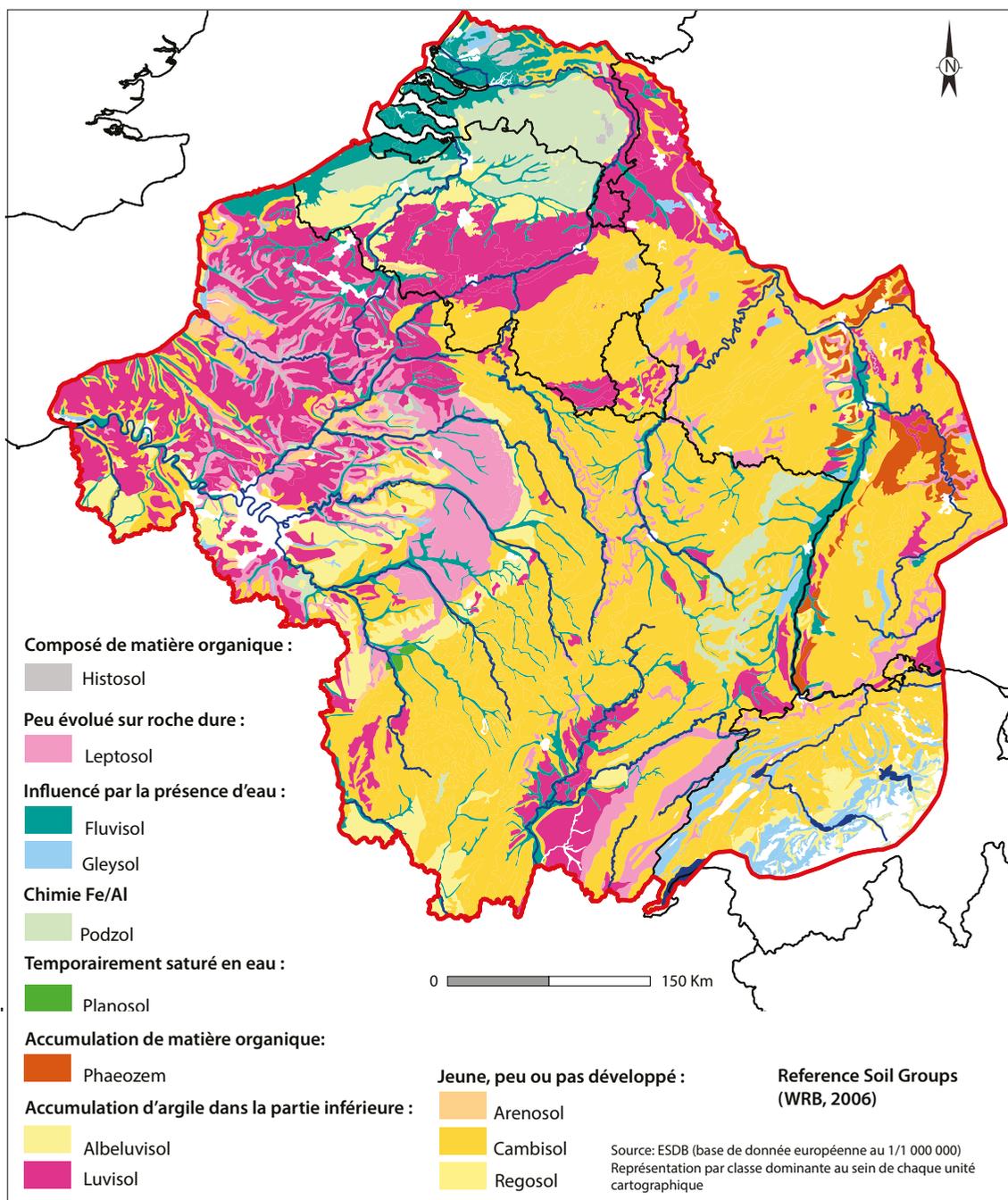
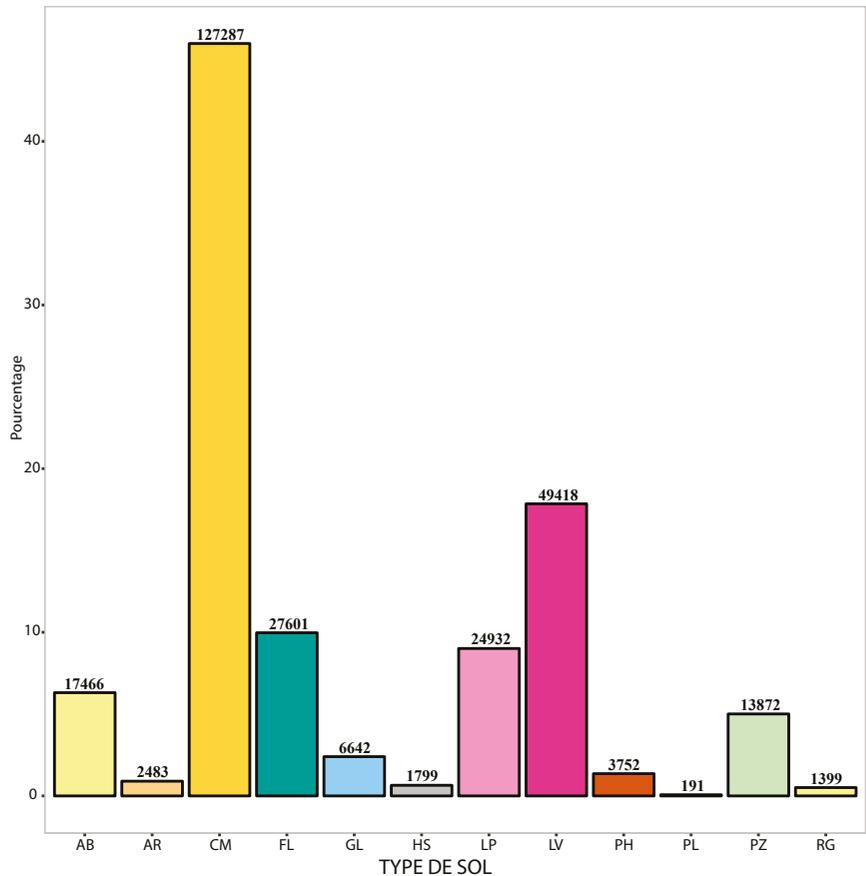


Fig. 5. Carte des types de sols dominants dans la zone étudiée (Référentiel WRB 2006 ; source : Panagos *et al.* 2012 ; Panagos 2006 ; © E. Camizuli 2018).

Fig. 6. Histogramme du pourcentage de types de sols dans la zone étudiée. La superficie pour chaque catégorie est également précisée en km² (© E. Camizuli 2018).

AB = Albeluvisol **LP = Leptosol**
AR = Arenosol **LV = Luvisol**
CM = Cambisol **PH = Phaeozem**
FL = Fluvisol **PL = Planosol**
GL = Gleysol **PZ = Podzol**
HS = Histosol **RG = Regosol**



Les sols peu épais (leptosol, 9 %), ceux qui sont acides (podzols, 5 %) ou sableux (regosol et arenosol, 1,4 %) présentent une faible valeur agronomique et sont très peu représentés dans notre zone d'étude (fig. 5 et 6). Il est important de préciser qu'à petite échelle, les limites pédologiques correspondent toujours à des unités cartographiques qui sont des combinaisons de différents types de sols. On prend alors en compte le type dominant. L'échelle de travail dépend donc de ce qui doit être mis en évidence (Grunwald, éd. 2006 ; Hengl & Reuter 2009). En France, pour des cartes pédologiques au 1/250 000, il faut se reporter aux référentiels régionaux pédologiques, quand ils existent (Grolleau *et al.* 2004 ; Laroche *et al.* 2014).

Comment caractériser les sols antiques et leurs aptitudes culturales ?

L'étude des agrosystèmes anciens est rendue plus complexe par le fait qu'il est nécessaire d'interpréter des pratiques passées en n'ayant accès qu'à des données pédologiques actuelles. Les paramètres retenus, extrait des cartes contemporaines, doivent donc être compatibles avec les données archéologiques et considérés comme "stables" sur des temps longs pour être transposables à l'analyse des systèmes agricoles anciens. Une telle étude nécessite une discussion entre pédologue et archéologue afin de définir des critères simples de "capacité à produire" et de "capacité à travailler" le sol durant l'Antiquité. Certaines bases de données pédologiques peuvent être utilisées en archéologie comme aide à la compréhension de ces pratiques anciennes, mais sous certaines conditions (Carter *et al.* 1997 ; Camizuli *et al.* 2016).

Les paramètres sélectionnés ici sont la profondeur, la pierrosité, la réserve utile en eau pour les plantes, et la texture qui expliquent dans les grandes lignes le potentiel agronomique d'un sol.

La profondeur d'un sol se mesure de la surface jusqu'à la roche sous-jacente (matériau parental). Ce paramètre détermine la profondeur à laquelle les racines, l'eau et l'air peuvent pénétrer (Arrouays *et al.* 2014). Sa connaissance est donc essentielle pour apprécier les aptitudes culturales (Gis sol 2011). Dans notre zone d'enquête, la profondeur est très liée à la nature des roches et à la géomorphologie du territoire. Les sols les plus profonds (> 120 cm) sont situés à l'ouest de la zone sur des formations

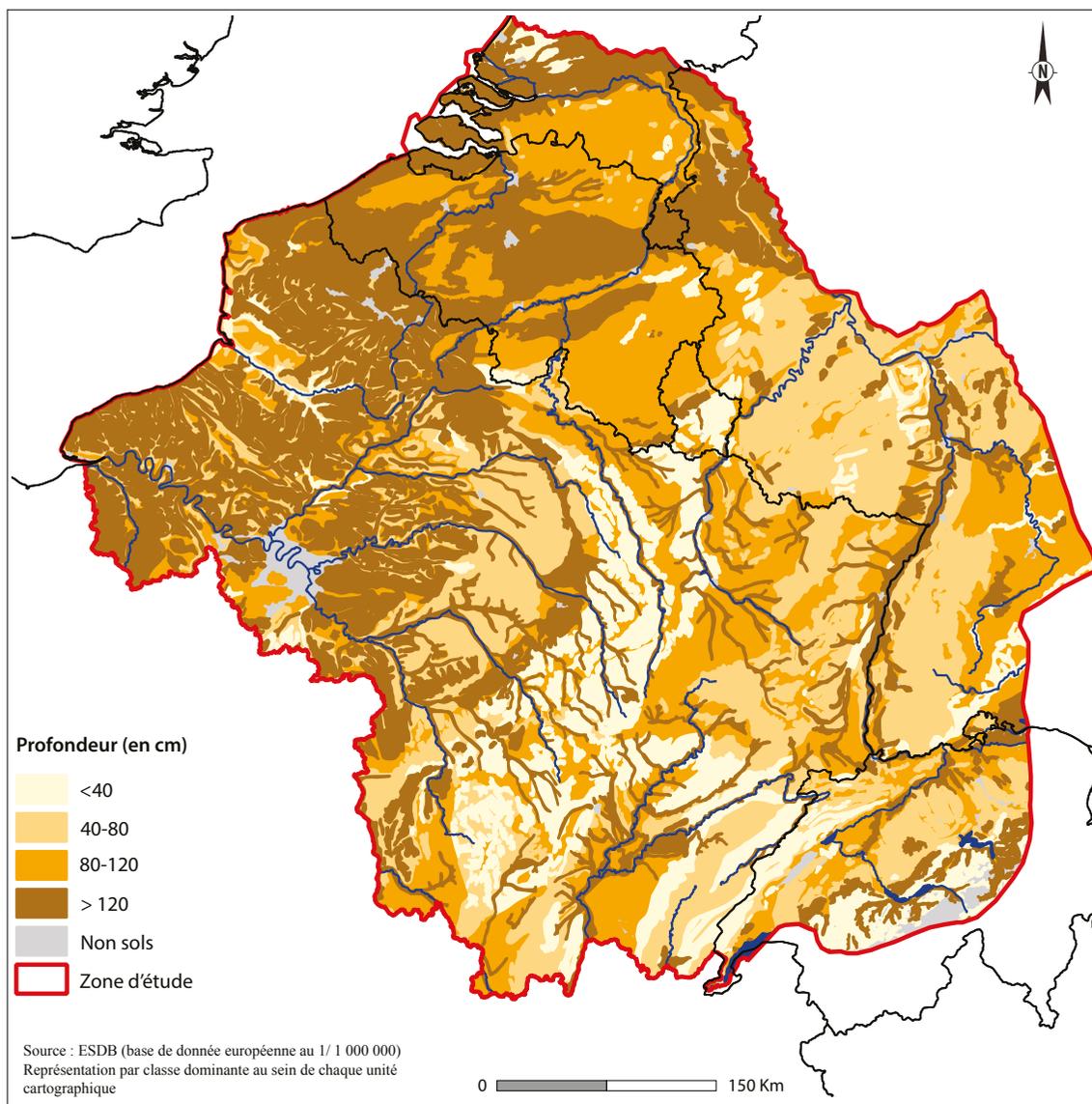


Fig. 7. Carte de la profondeur des sols dans la zone étudiée (Source : ESDBv2.0, 2004 ; Panagos *et al* 2012 ; Panagos 2006 ; © E. Camizuli 2018).

limoneuses (fig. 7). Ceux de plus de 40 cm de profondeur constituent des zones favorables au développement de l'agriculture. Les massifs anciens comme les Vosges et les Ardennes sont moyennement profonds à profonds (40-120 cm). Les sols très peu profonds ne représentent que 12 % de la superficie de notre zone d'étude.

La pierrosité apporte des informations importantes sur le travail nécessaire pour cultiver le terrain concerné (Ballabio *et al.* 2016). Cette notion indique la proportion relative en éléments grossiers (supérieurs à 2 mm) contenus dans les différents horizons du sol. Un pourcentage de 15 % de pierres correspond à une valeur élevée et sera difficile à travailler en agriculture, selon nos critères agrologiques actuels. De plus, la présence d'éléments grossiers limite généralement la quantité d'éléments nutritifs et d'eau disponibles pour les plantes (Gis Sol 2011). Dans notre aire d'étude, les sols contenant un faible volume de pierres (0-10 %) représentent environ 60 % de la surface des sols (fig. 8).

Le sol constitue une réserve en eau pour les plantes et les êtres qui y vivent (Gis Sol 2011). Cependant, la végétation ne peut utiliser qu'une partie de l'eau stockée et on parle alors de "réserve utile". Celle-ci dépend de plusieurs caractéristiques du

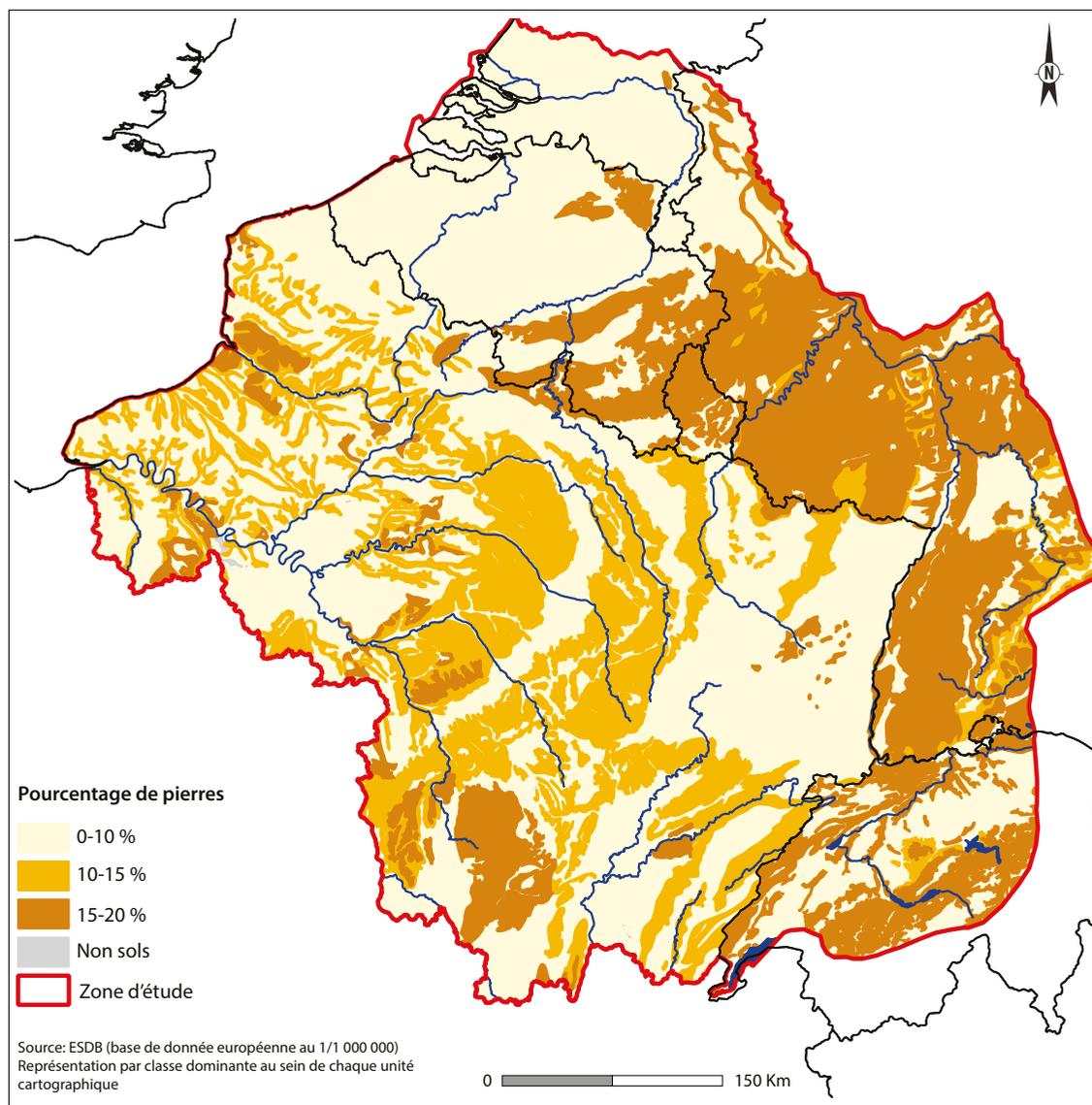


Fig. 8. Carte de la pierrosité des sols dans la zone étudiée (Source : ESDBv2.0, 2004 ; Panagos *et al.* 2012 ; Panagos 2006 ; © E. Camizuli 2018)

sol (sa texture, sa structure et sa profondeur) ainsi que de la profondeur maximale d'enracinement. Les formations limoneuses sont celles qui fournissent le plus d'eau utile. De façon simplifiée, elles possèdent une plus grande réserve utile en eau que les sols sableux, présentent moins de risque de sécheresse et nécessitent moins d'irrigation. Dans le modèle de la base européenne, la réserve utile en eau est estimée à partir une fonction de "pédotransfert" qui utilise principalement la texture et la structure du sol (*European Soil DataBase v2.0, 2004*). Dans notre zone d'étude, les sols présentant les plus fortes réserves en eau utile (de 140 à plus de 190 mm/m) sont les sols limoneux des bassins sédimentaires, comme ceux du Bassin parisien, qui correspondent également à ceux qui offrent la plus grande profondeur. Ils représentent environ 85 % du territoire étudié (fig. 9).

La texture est le résultat de processus physico-chimiques qui agissent sur les roches et les minéraux, influencés par des facteurs externes (climat, topographie, organismes vivants). Au terme d'un laps de temps pertinent pour la gestion des sols, la texture peut être considérée comme invariable, ce qui en fait une propriété intéressante à cartographier (Ballabio *et al.* 2016). Les différentes classes texturales sont définies en fonction des proportions relatives de sable (50 μm – 2 mm), de limon (2 –

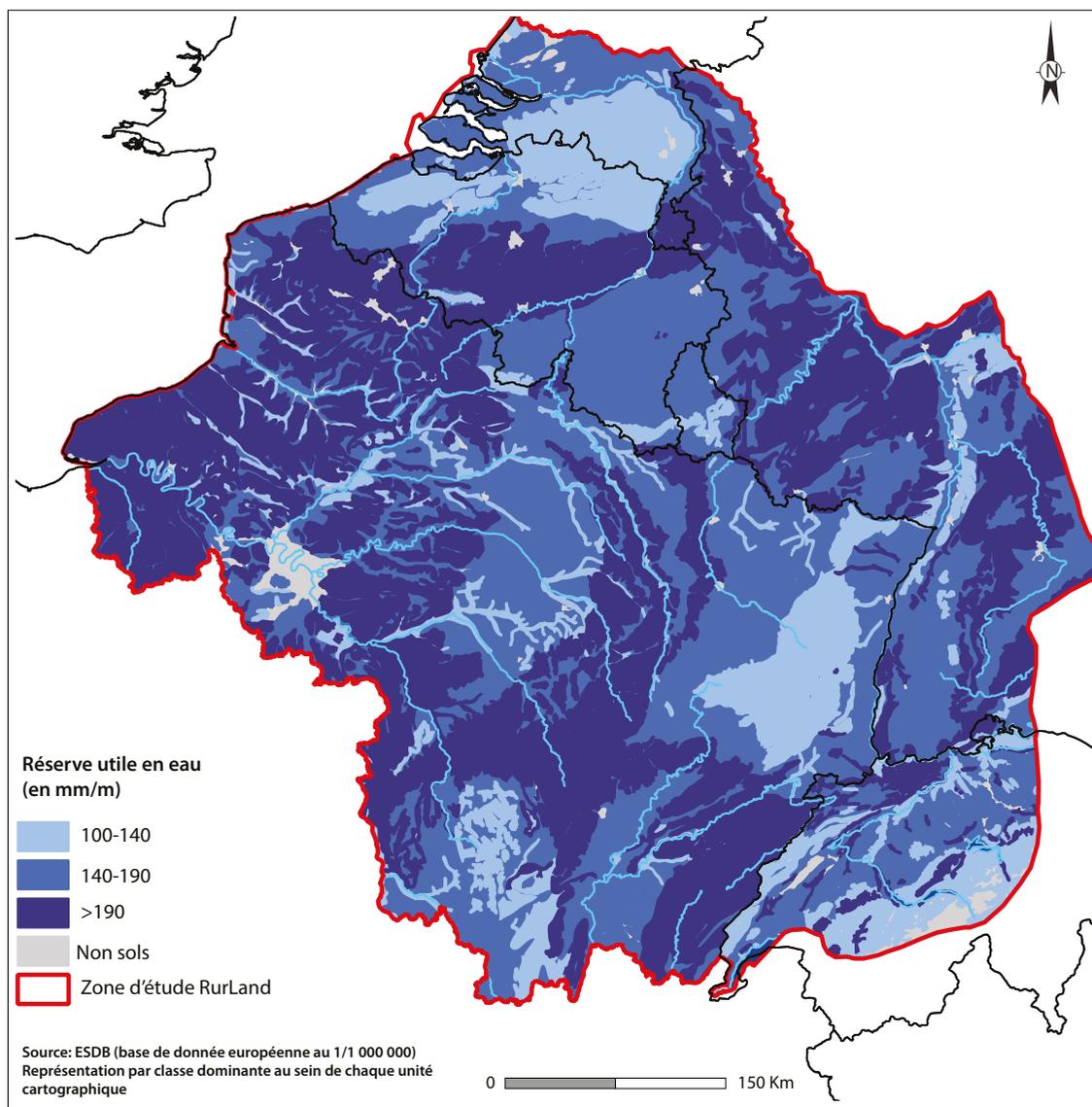


Fig. 9. Carte de la réserve utile en eau dans les horizons de surface
(Source : ESDBv2.0, 2004 ; Panagos *et al.* 2012 ; Panagos 2006 ; © E. Camizuli 2018).

50 μm) et d'argile (< 2 μm). Parmi les différents types de triangles de texture (Richer de Forges *et al.* 2008), le triangle retenu pour notre projet est celui de la carte européenne des sols, selon le programme HYPRES (Wösten *et al.* 1999) (fig. 10a). Les classes texturales expriment des valeurs pratiques en agriculture. Ainsi les sols à texture grossière, riches en sable, sont faciles à labourer mais pauvres en nutriments. Au contraire, les sols à textures fine et très fine, riches en argile, sont plus difficiles à travailler. La texture est de surcroît responsable des variations d'humidité, de rétention et de disponibilité de l'eau dans les sols (Arrouays *et al.* 2014). Au sein de notre zone d'étude, les sols à texture grossière ne représentent que 16 % de la surface des sols et sont essentiellement localisés dans les Vosges et la plaine de Flandre (fig. 10b). Ceux à texture moyenne sont localisés en Champagne crayeuse, dans les Ardennes, en Forêt noire et dans le Jura suisse, tandis que ceux à texture moyennement fine se situent plutôt dans les bassins sédimentaires comme le Bassin parisien. Ils ne représentent qu'environ 11 % de la surface et sont essentiellement situés en bordure des Vosges, du Morvan et au sud des Ardennes, où affleurent les marnes du Lias.

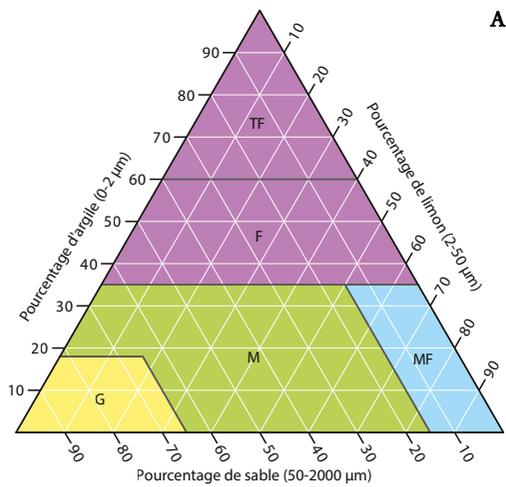
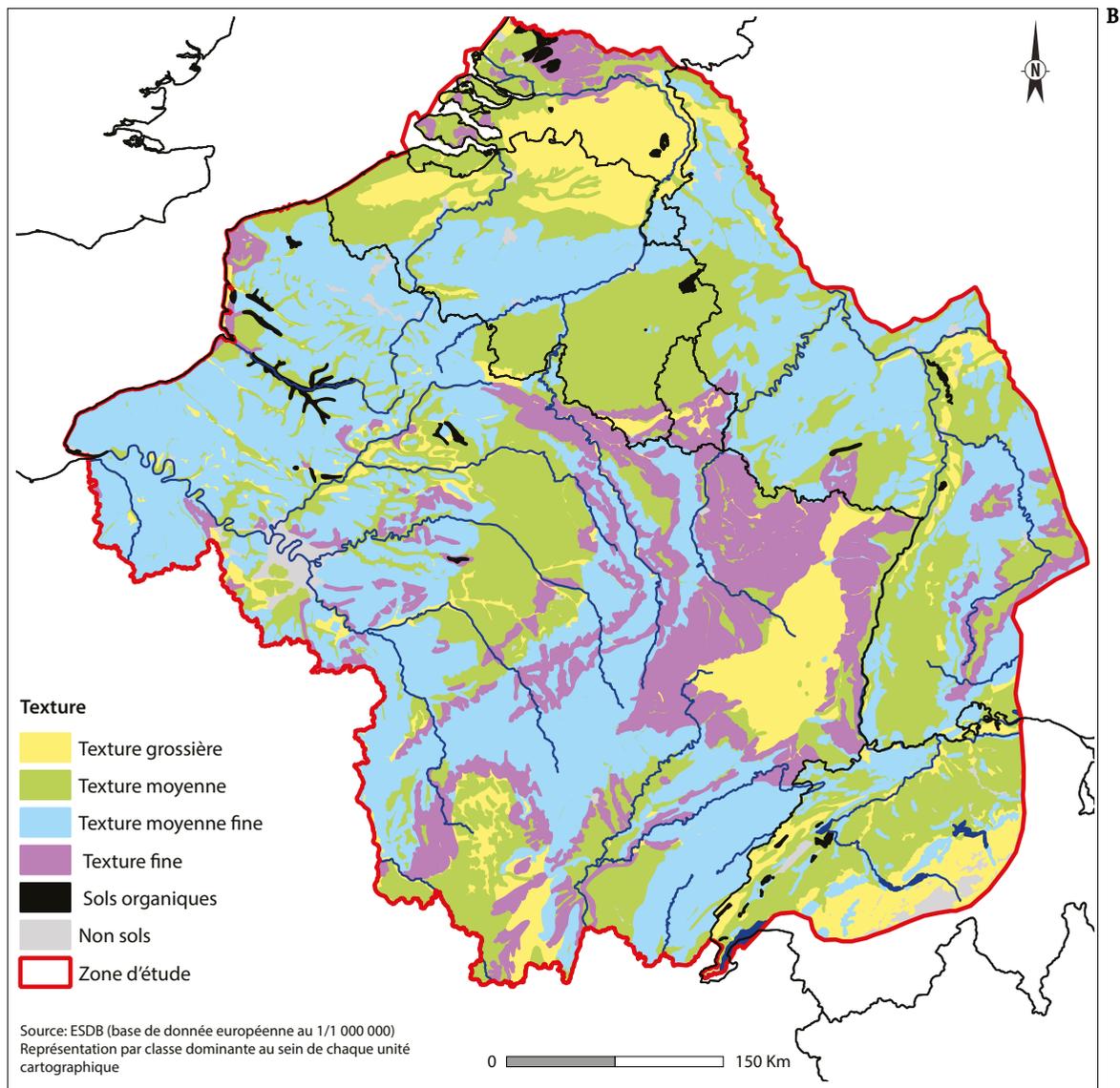


Fig. 10. La texture des sols. A. Diagramme des textures selon la classification européenne des sols (HYPRES, Wösten *et al.* 1999 ; R Development Core Team 2016) ; B. Carte de la texture de surface des sols (Source : ESDbv2.0, 2004 ; Panagos *et al.* 2012 ; Panagos 2006 ; © E. Camizuli 2018).



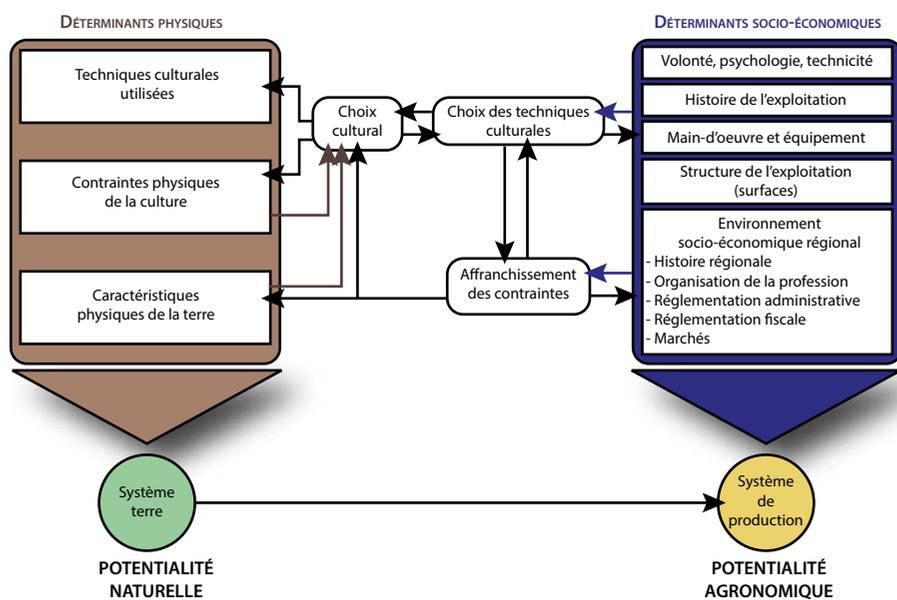
Le potentiel agronomique

Le potentiel agronomique d'un sol est une notion particulièrement complexe résultant de la combinaison de plusieurs paramètres (fig. 11) (Guyot & Bornand 1987 ; Carter *et al.* 1997). Les seules propriétés chimiques ne suffisent pas à déterminer les aptitudes culturales. Il est nécessaire de prendre en compte des paramètres physiques (caractéristiques du sol, pratiques agricoles, géomorphologie, géologie, etc.), mais également des paramètres socio-économiques (choix des agriculteurs, histoire régionale, etc.). Le facteur temps est un paramètre primordial puisque, dès lors qu'un sol est cultivé, sa fertilité devient une variable historique (Mazoyer & Roudart 1998 ; Bremer & Ellert 2004). De plus, la qualité d'un sol se définit en fonction de son aptitude à fournir les services attendus et, selon qu'on se trouve dans le cas d'une production de blé ou d'un élevage de bovins, les exigences concernant les caractéristiques des sols ne sont pas les mêmes. Au sein même de la pratique agricole, les besoins en eau, en profondeur et en nutriments ne sont pas les mêmes selon les céréales (Ellenberg *et al.* 1992).

Les premiers agronomes ont tenté d'introduire des classifications fondées sur la texture (terres sableuses ou légères, terres argileuses ou grasses) (Legros 2007). Columelle, par exemple, classe les sols en quatre catégories : ceux qui sont riches et légers offrent le meilleur rendement pour un moindre effort ; ceux qui sont gras et compacts récompensent les efforts consentis pour leur culture par d'excellents rendements ; les terrains humides peuvent produire sans exiger trop d'investissement et les sols secs, compacts et maigres sont les pires. Les critères descriptifs de Pline peuvent être traduits en termes de pédologie actuelle (Berger *et al.* 1997). Pour prendre un seul exemple, les sols noirs "tendres" considérés par celui-ci comme les meilleurs sont probablement d'origine volcanique et fréquents dans les zones volcaniques de Campanie, mais très rares en Gaule (Plin., *Nat.*, 17,36-37). L'agronomie antique juge fertiles les terres à blés et celles qui conviennent aux espèces méditerranéennes, tandis que les terrains considérés aujourd'hui comme fertiles offrent des terres profondes, humifères et argileuses, fraîches et meubles.

La question des potentialités agronomiques des sols durant la période gallo-romaine est rendue délicate en raison des changements qui ont affecté les couvertures pédologiques pendant presque deux millénaires. Les processus de dégradation peuvent en effet être importants en fonction des conditions climatiques ou de l'activité anthropique (Boardman & Poesen, éd. 2006 ; Petit *et al.* 2006).

La prise en compte de l'ensemble des facteurs d'évolution de la couverture pédologique implique donc une utilisation raisonnée des cartes pour une application antique. La modification des sols depuis deux mille ans est en effet variable. Elle peut être régionalement forte, comme c'est le cas dans la vallée du Rhône (Berger *et al.* 1997) ou dans les zones de marais (Bernigaud



(Guyot et Bornand, 1987, Science du Sol)

Fig. 11. Facteurs influençant la potentialité naturelle des sols et leur potentialité agronomique (Source : adaptée d'après Guyot & Bornand 1987 ; © E. Camizuli 2015).

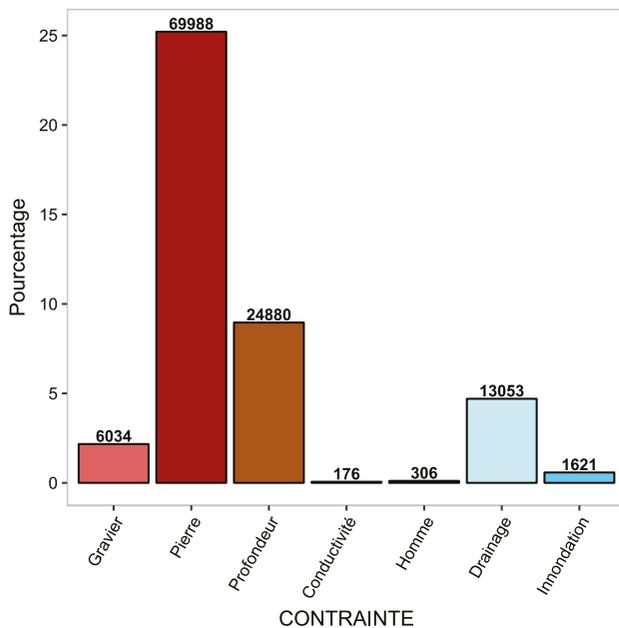
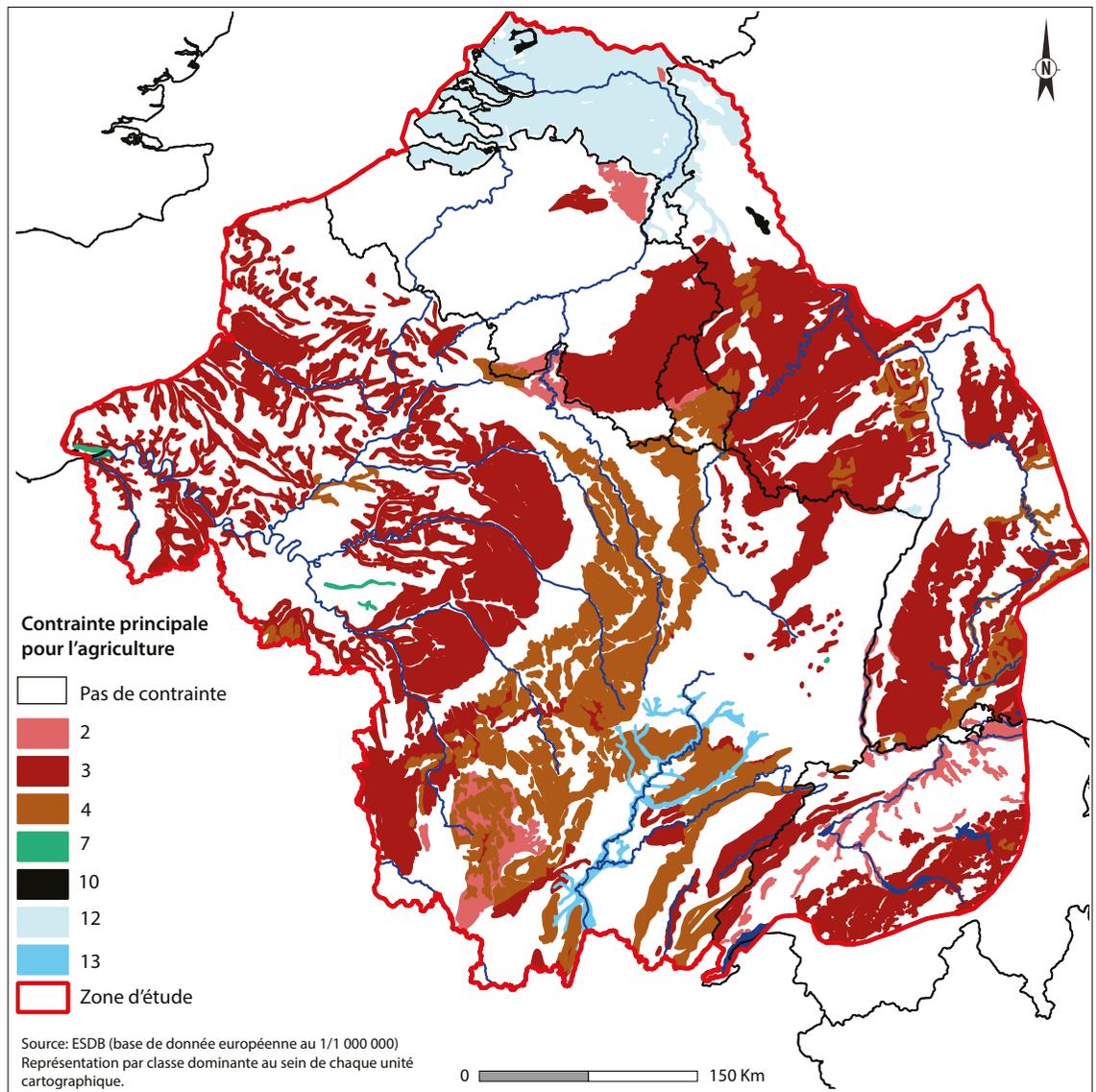


Fig. 12a. Carte des contraintes pouvant limiter les aptitudes culturales (Source : ESDBv2.0, 2004 ; Panagos *et al.* 2012 ; Panagos 2006). 2. Gravier (<35% graviers), 3: Pierre (diamètre >7,5 cm) ; 4. Profondeur (Roche dure et cohérente à 50 cm) ; 7. Salin (Conductivité>4 ms.c. - 1 à 100 cm) ; 10. Sols perturbés par l'homme, 12: Drainage excessif ; 13. Zone souvent inondée.

Fig. 12b. Histogramme du pourcentage des contraintes dans la zone étudiée. La superficie des sols pour chaque contrainte est également précisée en km² (© E. Camizuli 2018).

2012). Dans le nord de la France, certains sols sont partiellement érodés et ceux des plaines alluviales et littorales ont évolué par accumulation sédimentaire. Les cartes pédologiques représentant les grands types de sols actuels sont donc, dans leurs grandes lignes, identiques à celles que nous pouvons reconstruire pour l'époque antique, à l'exception des plaines alluviales et de certaines pentes recouvertes de colluvions. Les sols alluviaux argilo-limoneux plus ou moins organiques constituent les terres les plus fertiles du nord et du sud de la France, quand ils ne sont pas noyés par une nappe phréatique haute.

À l'échelle européenne, les aptitudes des sols à l'agriculture et aux pâturages ont été modélisées en fonction de paramètres climatiques et pédologiques (Kaplan *et al.* 2009). Notre zone d'étude apparaît ainsi comme un secteur où les contraintes de production sont faibles si on la compare aux régions de hautes latitudes (Scandinavie, nord de la Russie, Écosse, etc.), de montagnes (Alpes, Massif Central français, Pyrénées).

Dans l'aire géographique de notre programme de recherche, les aptitudes culturales peuvent être explicitées en raisonnant par rapport aux contraintes majeures que sont l'accessibilité et l'exposition des terrains⁶, le degré d'hydromorphie, la fertilité naturelle⁷, l'enracinement et la résistance à la sécheresse⁸, le travail du sol⁹. Dans cette première approche, seuls les paramètres d'exclusion ont été retenus. Une fois les valeurs critiques définies, on peut exclure les zones inexploitable du point de vue agricole du fait d'une pente trop abrupte, d'un pourcentage de pierres trop important, d'un drainage pauvre, de sols organiques, de la présence de roches en affleurement, de zones "urbaines" et de rivières. Nous présentons donc ici les données européennes de la base au 1/1 000 000 qui permettent de construire une carte des contraintes principales pour les pratiques agricoles¹⁰ (fig. 12a). À petite échelle, la plupart des sols ne présentent aucune limitation (58 % de la surface des sols). Le paramètre le plus contraignant est constitué par la pierrosité (~25 %) suivi par la profondeur (~8%) (fig. 12b). Ces surfaces où l'exploitation agricole ou pastorale est impossible ne représentent qu'une faible superficie dans notre secteur d'étude ; dès lors, l'analyse de la répartition des établissements ruraux devra prendre en compte la variabilité tant écologique que sociale pour comprendre l'organisation de l'implantation des établissements ruraux. Nous y reviendrons ultérieurement dans le chapitre 3. On peut toutefois, à partir d'un exemple régional, illustrer d'ores et déjà cet aspect (Cas d'étude 1).

6. Pente, orientation, position, rayonnement solaire.

7. Déterminée en fonction du matériau parental.

8. Lié à la profondeur du sol et de sa texture.

9. Lié à la pierrosité et la texture du sol.

10. Le travail a été réalisé au 1/250 000 grâce aux données des référentiels pédologiques régionaux (Laroche *et al.* 2014) sur les cartes où ils existent.

Cas d'étude 1 : Qualité des sols et répartition spatiale des occupations agricoles : l'exemple de la Basse-Seine

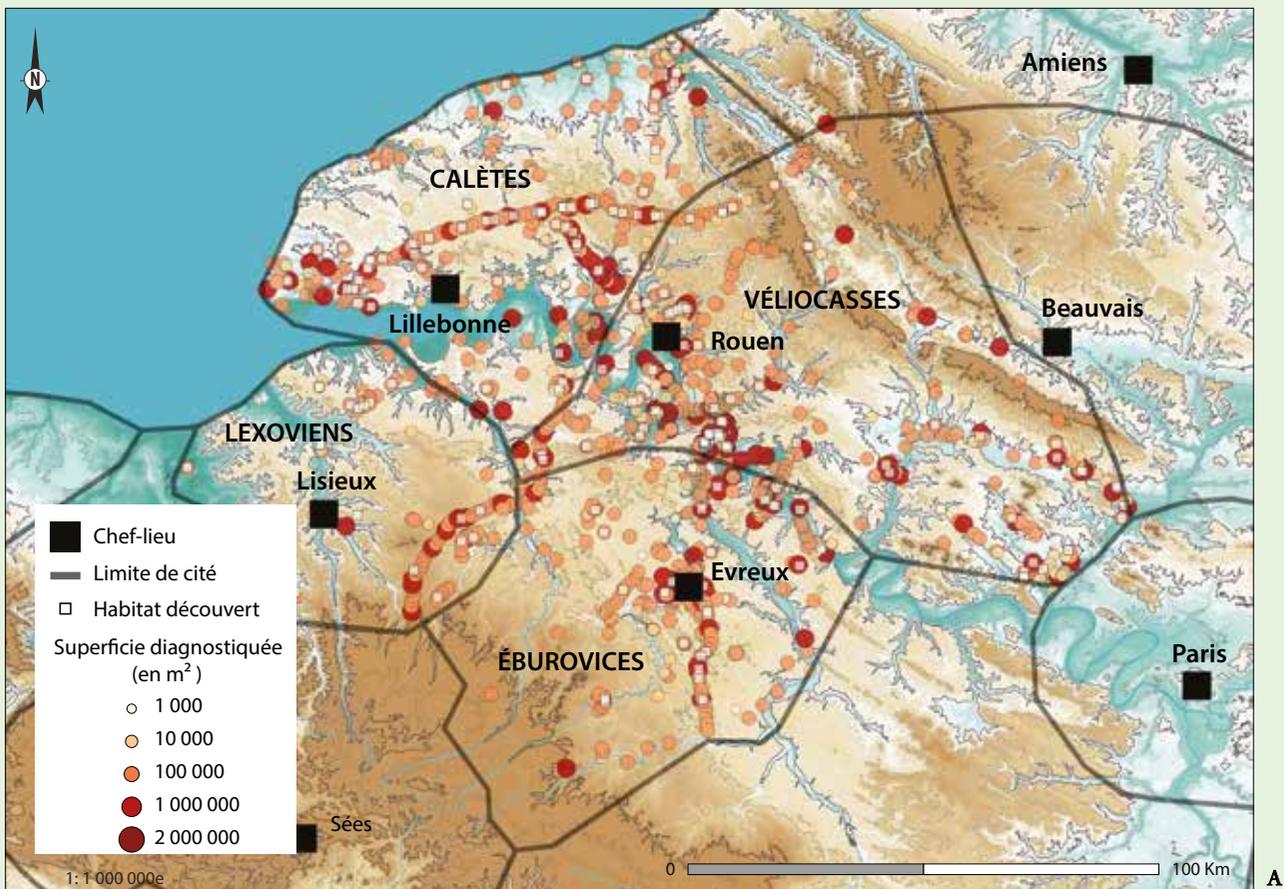
Jérôme Spiesser, Christophe Petit

Pour les auteurs antiques, la qualité des terres détermine la nature des occupations rurales. Caton commence par exemple son ouvrage d'agronomie en conseillant au lecteur qui souhaite acquérir un domaine agricole, de s'assurer que le sol possède toutes les qualités nécessaires à son exploitation (Cato, *Agr.*, 1.2). L'auteur associe d'ailleurs la nature des productions agricoles aux qualités agronomiques des sols lorsqu'il écrit : *ubi ager crassus et laetus est sine arboribus, eum agrum frumentarium esse oportet* (Cato, *Agr.*, 8.1 : "une terre grasse et fertile, sans arbres, doit être une terre à céréales"). Cette relation entre spécificités de la terre et nature des productions reste présente durant toute l'antiquité. Palladius introduit même la notion d'érosion des sols et souligne l'intérêt de connaître leur histoire pour s'assurer qu'ils ont gardé leurs qualités initiales (Pallad. 1.7). Il convient néanmoins de se demander si les recommandations des agronomes étaient réellement appliquées, notamment dans le nord des Gaules. La qualité agronomique des sols a-t-elle influencé le modèle d'implantation des occupations rurales gallo-romaines ?

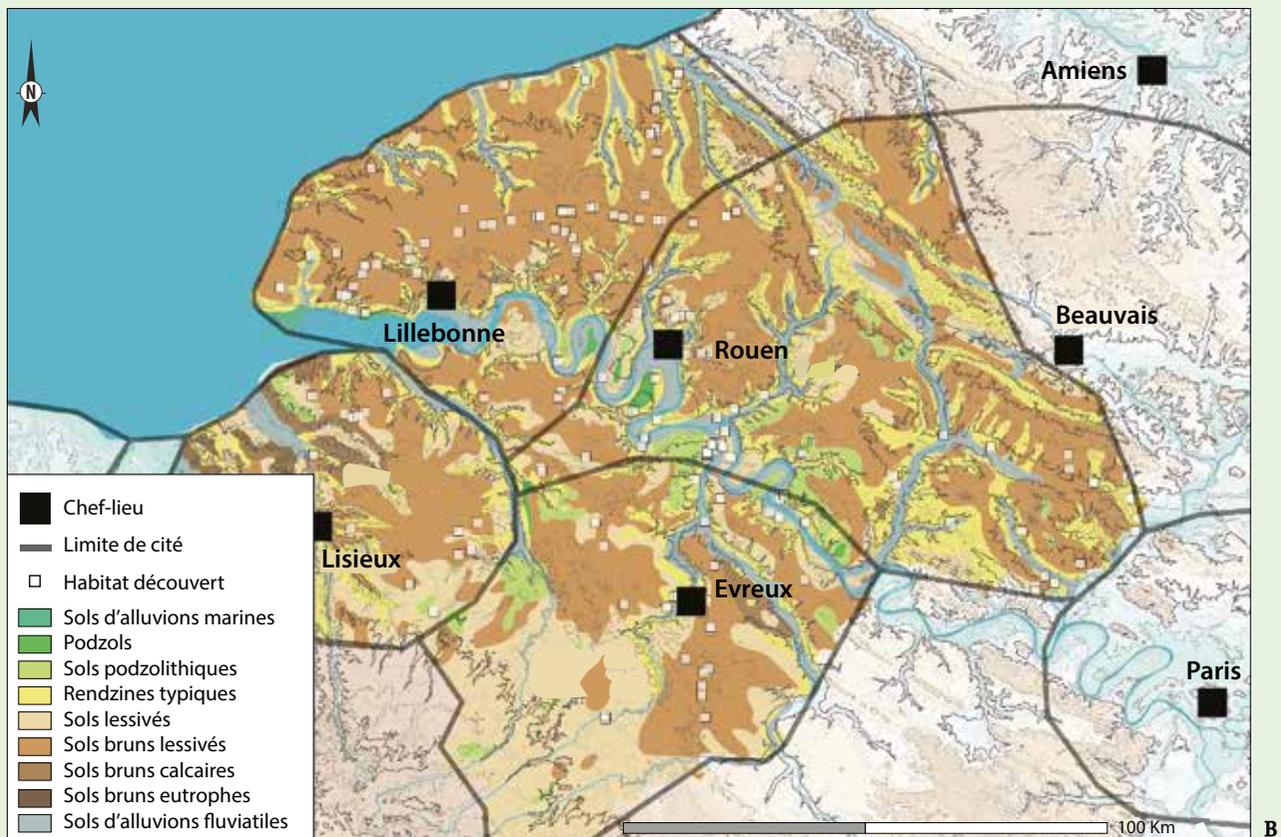
Pour tester cette hypothèse, nous avons sélectionné les nombreuses données issues de l'archéologie préventive dans la basse vallée de la Seine. À cette échelle les données des prospections aériennes ne peuvent pas être prises en compte pour modéliser l'occupation rurale car elles sont étroitement liées au contexte pédologique et à la pluviométrie (Spiesser 2012, 24 ; vol. 1, chap. 7, 287). Il en va de même pour les informations des prospections pédestres et des fouilles anciennes, en raison de l'imprécision de leurs datations et de la nature de la recherche passée, focalisée sur les grandes *villae* gallo-romaines. Entre 1990 et 2014, en revanche, la basse vallée de la Seine a fait l'objet de 1181 diagnostics archéologiques, couvrant une superficie de 69,7 km², soit 0,45 % du territoire. Ces opérations ont permis de découvrir 232 habitats ruraux occupés entre le I^{er} siècle a.C. et la fin de l'Antiquité (fig. 13). L'intérêt de cette documentation réside principalement dans sa précision chronologique et le caractère aléatoire des découvertes en fonction de la nature des sols. Elle permet de pondérer le nombre d'établissements en fonction des superficies diagnostiquées, pour suivre l'évolution des densités d'occupations rurales en fonction des types de sols.

D'après la carte pédologique du bassin Seine-Normandie¹¹, le secteur comprend neuf catégories de sols aux potentiels agronomiques très différents, de quasi nul à très bon (fig. 13 et 14). Les podzols et les sols podzoliques couvrent 3,6 % du territoire d'étude. Ils se caractérisent par une charge grossière importante et un horizon humifère acide. Le potentiel agronomique de ces sols est donc quasiment nul. Les rendzines calcaires (21,2 % du territoire) sont disposées dans les pentes ; ces sols calcaires peu épais, comportant également une charge grossière importante, sont de mauvaise qualité pour la plupart des productions agricoles. Les sols lessivés (19,8 % du territoire), présents principalement au sud de la zone d'étude, sont davantage favorables à l'agriculture, bien que de moindre qualité agronomique, que les sols bruns lessivés (42,6 % du territoire). Les sols bruns calcaires et les sols bruns eutrophes sont les meilleurs sols agricoles du territoire étudié ; ils ne sont présents que sur 2,9 % du secteur, localisés principalement dans la partie occidentale. Dans les fonds de vallée, deux types de sols s'opposent. D'un côté, les sols d'alluvions fluviales (sols bruns développés sur un horizon sablo-graveleux) présentent un bon potentiel agronomique, alors que les sols d'alluvions marines sont de piètre qualité à cause de leur salinité. Ces derniers, que l'on retrouve au niveau de l'estuaire de la Seine en aval de Quillebeuf, restent anecdotiques puisqu'ils ne représentent que 0,9 % du territoire, alors que les premiers en couvrent 10,1 %.

11. Sa précision est celle de l'hectomètre. Elle est difficilement exploitable à l'échelle d'un site, mais elle peut expliquer des tendances générales de l'occupation d'une région. Cette carte (*La pédologie du bassin Seine-Normandie, AESN 1974*) est téléchargeable à l'adresse suivante : <http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article126> (consulté le 30 mai 2018).



A



B

Fig. 13. A. Carte des diagnostics archéologiques réalisées en Normandie sur le fond topographique ;
 B. Carte des habitats ruraux gallo-romains découverts sur le fond pédologique (© J. Spiesser 2018).

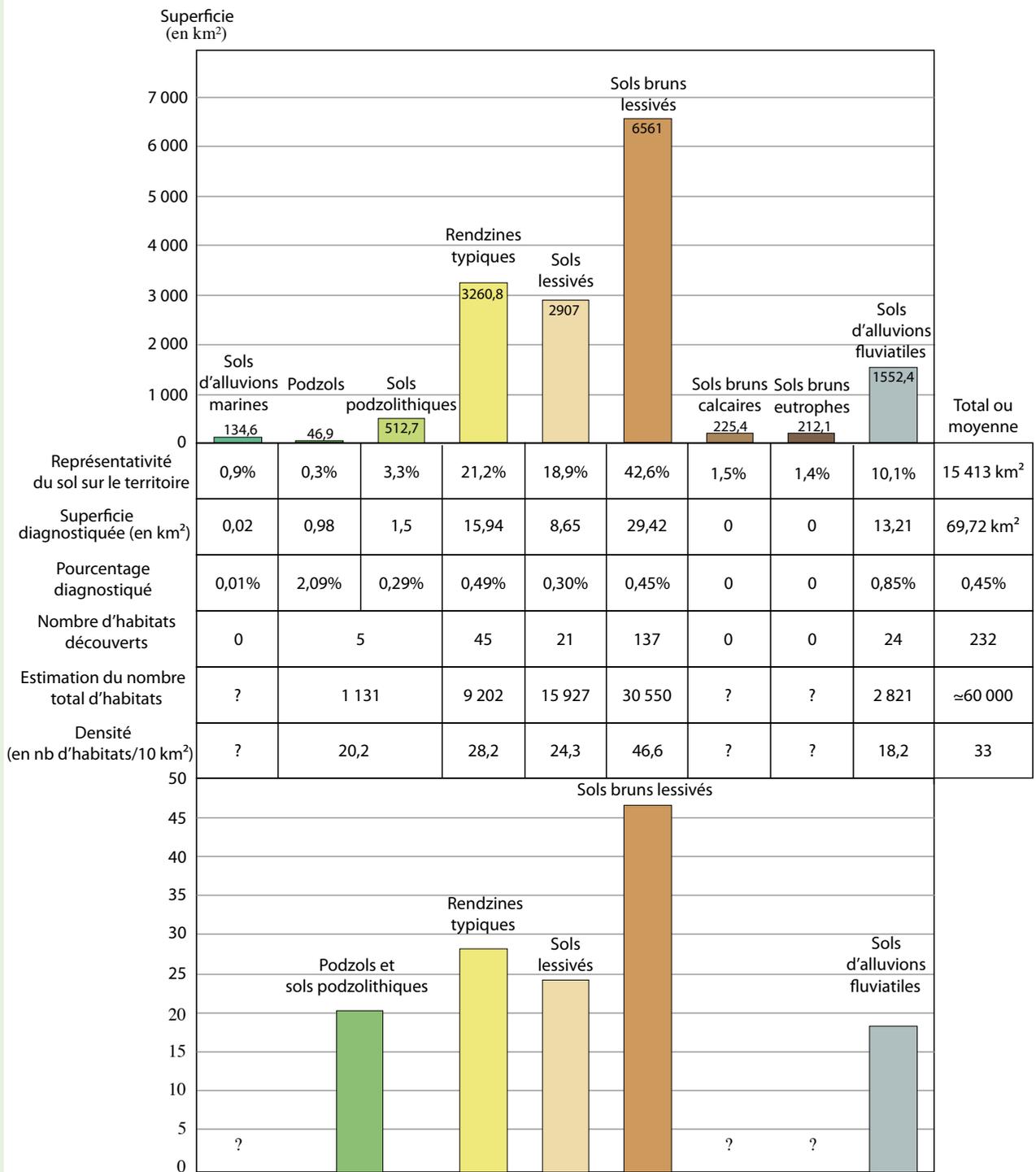


Fig. 14. En bas, densité des habitats ruraux gallo-romains (nombre d'habitat/10 km²) en fonction du type de sol ; en haut, superficie des diagnostics archéologiques par type de sol.

Les différents diagnostics archéologiques ont révélé un nombre de sites variable d'une année sur l'autre à la fin du xx^e siècle ; ce n'est que depuis 2003, soit à partir de 40 km² appréhendés, que la densité de découvertes semble se stabiliser, quelle que soit la catégorie pédologique des terrains fouillés. Les sols bruns, qui possèdent le plus fort potentiel agronomique du secteur, apparaissent davantage occupés que les sols de moindre qualité. La densité d'occupation sur les sols bruns lessivés est voisine de 50 habitats/10 km², alors que la densité observée sur les autres sols est presque deux fois moindre (de 20 à 30 habitats/10 km²) (fig. 14). Comme la durée de vie des établissements excède rarement deux siècles, la densité d'habitats contemporains est plus faible (vol. 1, chap. 6, fig. 13 et 14) ; en revanche les sols sur limons bruns lessivés sont toujours deux fois plus occupés que le reste du territoire, entre l'époque gauloise et la fin de l'Antiquité.

Nous avons retenu le critère de surface de l'habitat résidentiel pour hiérarchiser les établissements romains¹². En effet, la taille de l'habitation ou de l'espace résidentiel semble avoir été un bon critère pour identifier la place de son propriétaire dans la société. Cette corrélation, qui reste encore aujourd'hui avérée, devait également l'être pendant l'Antiquité, comme en témoigne Palladius lorsqu'il écrit : *Aedificium pro agri merito et pro fortuna domini oportet institui* (Pallad. 8.1 : "Les bâtiments doivent être proportionnés à la valeur du domaine et aux ressources du propriétaire"). Les grandes exploitations apparaissent alors surreprésentées sur les sols de qualité agronomique médiocre, voire mauvaise, alors que les petites fermes semblent davantage peupler les bons sols agricoles que sont les sols bruns lessivés¹³ (fig. 15). Un fait similaire a déjà été observé dans le cas de la plaine de France, où les opérations archéologiques préventives ont permis de découvrir une occupation dense de petites fermes sur des sols bruns lessivés (Ouzoulias & Van Ossel 2009, 111-116). La question des pratiques agricoles dans ces établissements reste encore posée.

	Petites Exploitations	Grandes Exploitations	
Podzols et sols podzolithiques		■	2
Rendzines typiques	■	■	51
Sols d'alluvions fluviales	■	■	23
Sols lessivés	■	■	23
Sols bruns lessivés	■	■	109
	101	107	N

Fig. 15. Relation entre type d'exploitation (petite ou grande) en fonction de la nature des sols en Normandie. Cette représentation statistique par matrigraphe illustre en pourcentage les écarts par rapport à la valeur d'indépendance. Le noir indiquant alors une surreprésentation de la variable concernée, le blanc une sous-représentation et le gris que la variable est dans la moyenne des valeurs d'indépendance.

12. En effet le choix de matériaux de construction dans cette région est très inféodé aux ressources locales (limons, rognons de silex ou craie) ; seule la craie permet d'obtenir de la chaux indispensable à l'édification d'une maçonnerie en dur.

13. La distribution statistique de la taille de la surface des bâtiments en fonction de la nature des sols de l'établissement n'est pas aléatoire (analyse par matrigraphe). Un test du χ^2 a permis de valider cette analyse statistique en montrant que ces phénomènes ne sont pas liés au hasard (p-value = 0,001). Les effectifs du tableau sont parfois supérieurs au total des habitats connus sur le type de sols puisque les établissements changeant de statut au cours de leur existence ont été notés dans les deux catégories.

L'érosion des sols pendant et après l'Antiquité (CP, NB, KF, AG)

La majorité des sols est soumise à des processus d'ablation ou d'altération autochtones. Exempts de dépôts, ils n'en demeurent pas moins porteurs d'informations relatives à l'histoire de leur environnement. Ainsi, la pédogenèse holocène¹⁴ a-t-elle modifié le matériau parental¹⁵, d'abord sous contrôle climatique (Duchaufour & Blum 2000), puis en intégrant les effets de l'histoire agricole (Langohr 2001 ; Holliday 2004 ; Cornu *et al.* 2008 ; Chiva 2009 ; Fechner *et al.* 2015 ; Defive *et al.* 2017). Ces derniers sont multiples (déforestation, défrichements, piétinement, labour, plantation, parcellisation, etc.) et se concentrent autour de deux aspects principaux : la végétation et le profil cultural. Si l'histoire de la végétation commence à être connue (Leroyer & Allenet 2006 ; Argant *et al.* 2011 ; David *et al.* 2015), celle du profil cultural reste en grande partie à écrire (Hénin *et al.* 1969 ; Fedoroff 1986 ; Guilaine, éd. 1991 ; Manichon 1993 ; Boissinot 1997 ; Gebhardt *et al.* 2014 ; Fechner *et al.* 2014). Quelles sont les durées et les espaces transformés par les activités agro-sylvo-pastorales ? La période allant de La Tène à la fin du Haut-Empire, remarquable par la multitude des sites ruraux, correspond-elle à une conquête de l'espace agraire ? Où chercher et comment reconnaître les effets de cette agriculture ?

Documenter l'érosion des sols des plateaux

Sur les plateaux limoneux, la profondeur du front de décarbonatation ou celle de l'horizon d'illuviation peuvent servir de repères à partir desquels on peut estimer l'érosion des sols¹⁶. Pour le Bassin parisien, l'érosion liée à l'agriculture mécanique peut atteindre par endroits 40 à 50 cm pour les vingt dernières années. Les approches géoarchéologiques conduites à l'échelle d'un versant en Vétéravie (Francfort, Allemagne) montrent une érosion moyenne des sols d'environ 64 cm dans cette région occupée depuis 7500 ans (Stobbe 1996). Sur terrain calcaire, l'amincissement de la couverture pédologique se manifeste en surface par une "remontée" d'éléments carbonatés provenant du substrat et un comblement des talwegs¹⁷. En coupe, les sols des versants, particulièrement ceux qui sont éloignés des structures parcellaires, perdent leur horizon de surface décarbonatée et humifère au profit d'un horizon de labour carbonaté et appauvri en complexes organo-minéraux (Moreau *et al.* 2011). Dans les talwegs et au niveau des structures parcellaires, des sols cumuliques se forment (Revel & Rouaud 1985 ; Gebhardt *et al.* 2014 ; Froehlicher *et al.* 2016).

Parallèlement, les études archéobotaniques réalisées sur les sites antiques allemands (vol. 1, chap. 1, 72-96) ou français (Zech-Matterne *et al.* 2017a) montrent une augmentation importante de taxons inféodés aux sols calcaires durant l'époque romaine. Dans le nord de la Gaule, les adventices¹⁸ associées aux moissons sur calcaire augmentent (Zech-Matterne *et al.* 2017a). En Allemagne, l'érosion a mis à nu le loess calcaire jusqu'alors enfoui¹⁹ (vol. 1, chap. 1, 72-96). Ainsi, un nouveau type de sol a-t-il été développé dans la zone de loess : les anciens luvisols ont commencé à se transformer en régosols calcaires anthropiques²⁰. Si ce développement s'est considérablement intensifié jusqu'à l'ère moderne, sa cause en est le nouveau système agraire romain dans la zone de loess car il a provoqué une rupture claire avec les traditions culturelles de l'âge de Fer.

En Champagne, où le contexte pédologique est très différent, l'érosion liée à la période antique est également manifeste. Là, le substrat crayeux n'a pas bénéficié d'apports éoliens et les sols se sont développés durant l'Holocène à partir des altérites crayeuses cryoturbées²¹. Ces rendzines²² sont noires, peu épaisses, riches en carbonates et en matière organique. Elles sont très sensibles aux modifications environnementales (Crowther *et al.* 1996). Sauf exceptions ponctuelles ou terrain anciennement

14. Les périodes interglaciaires, favorables à une biomasse importante, sont caractérisées par un ralentissement des processus d'érosion au profit des processus pédogénétiques.

15. C'est-à-dire les roches ou formations superficielles considérées comme "roche mère", donnant naissance au sol (Campy *et al.* 2003).

16. Bichet *et al.* 1997 ; Bork & Lang 2003 ; Finke & Hutson 2008.

17. Dans le Terrefort toulousain, une érosion anthropique principalement médiévale a été mise en évidence (Revel & Rouaud 1985).

18. C'est-à-dire les messicoles strictes comme *Orlaya grandiflora*, *Agrostemma githago*, dont les effectifs augmentent beaucoup, et la présence de *Torilis japonica*, *Buglossoides arvensis*, *Centaurea cyanus*, *Vaccaria hispanica*, *Papaver rhoeas* et *P. argemone*, entre autres.

19. Le loess calcaire correspond à l'horizon C des luvisols. Le modèle explicatif est présenté dans Bichet *et al.* 1997.

20. Para-rendzine d'après la classification allemande des sols.

21. Les sols cryoturbés ont subi sous le climat périglaciaire de la dernière glaciation des mouvements redressant les pierres et modifiant leur structure.

22. Appelées également calcosols.

forestier, la partie supérieure de ces sols²³ a disparu. Les sols agricoles de Champagne sont blancs, sous les effets conjugués de l'érosion et du broyage mécanique des cailloux préconisé par l'agriculture contemporaine (Fechner & Slachmuylder 2009). Le broyage permet un approfondissement artificiel du sol et une augmentation de sa capacité en eau, mais l'augmentation très importante du taux de carbonates peut également engendrer le phénomène de chlorose. En effet, sur une rendzine érodée, la présence de calcium en excès peut bloquer l'assimilation des autres éléments nutritifs nécessaire à la croissance végétale²⁴. Le sol devient alors toxique (Fechner 2004). Les sols antiques, moins riches en carbonate actif, présentaient des taux de saturation plus faibles en carbonates, ce qui les rendaient de ce point de vue plus fertiles. L'érosion de ces minces sols noirs durant l'Antiquité explique peut-être que certains secteurs du plateau crayeux aient été abandonnés à cette époque. C'est l'étude des colluvions de fond de vallon qui permet d'identifier les premiers effets géomorphologiques de l'exploitation agro-pastorale de ces espaces, situés à proximité de sites d'habitat.

La mémoire locale des phases d'érosion : les colluvions

Dans le nord du Bassin parisien, les études géoarchéologiques sur les colluvions de versants et de fond de vallons secs sont encore peu nombreuses (Fechner *et al.* 2014). En Normandie (Lespez *et al.* 2005 ; Germain-Vallée & Lespez 2011 ; Sechi-Sapowicz 2012), dans l'est (Ertlen *et al.* 2014 ; Ollive *et al.* 2016), en Allemagne (Leopold & Völkel 2006) ou en Franche-Comté (Joan & Sordoillet 2013), les populations antiques ont composé avec des sols et des paysages déjà partiellement transformés par leurs prédécesseurs. À Imling (Moselle), l'érosion des sols et le recouvrement par des colluvions avant l'installation d'une villa au 1^{er} siècle p.C. témoignent de cet héritage (Gebhardt *et al.* 2009 ; 2014).

Sur les sols limono-sableux de Belgique, les colluvions piégées dans les fonds de vallons secs recoupés lors de l'opération du TGV en Wallonie sont généralement datées, au plus tôt, de l'époque romaine²⁵. En Lorraine, de nombreux indices pédologiques recueillis dans ces colluvions indiquent une origine anthropique ; les phytolithes associées aux graminées-herbacées et les revêtements argileux poussiéreux témoignent d'une mise à nu de la surface du sol due à la déforestation (Gebhardt *et al.* 2014). Dans le secteur de la Seille, les phénomènes d'érosion et de recouvrement peuvent être précoces et marqués. Dans les pentes, les sites sont très érodés et, dans le fond des vallons, ils sont difficilement décelables car profondément enfouis sous les colluvions (Laffite 1998, 17 ; vol. 1, chap. 12, 580). Sur le site de Haut-Clocher (Moselle), la mise en évidence d'une voie romaine sous 160 à 200 cm de colluvions comblant un talweg a permis d'estimer l'érosion des limons de plateau à plus de 25 cm depuis l'époque antique (Viller 2009 ; Étienne 2011). Le début de cette érosion agricole est lié à la déforestation de l'âge du Bronze²⁶. Les premières colluvions sont généralement attribuées à la fin de l'époque laténienne ou à l'époque romaine²⁷ : elles sont le reflet du développement des surfaces agro-pastorales. Certains secteurs, comme le sud des Ardennes, auraient été mis en culture et érodés surtout sous la pression démographique accrue de la fin de l'époque gauloise et du début de l'époque gallo-romaine (Laurelut & Louwagie 2002 ; Fechner *et al.* 2014). En Champagne crayeuse, les manifestations d'une érosion des plateaux se multiplient, non seulement via la mise en évidence de phases de colluvionnements accélérées au niveau des vallons secs, mais également par l'analyse du remplissage des fosses laténiennes et gallo-romaines. Plus on progresse dans le temps, plus la composante humique et limoneuse baisse dans le comblement des structures, sorte de témoignage négatif de l'amincissement de l'horizon de la terre arable (Fechner & Slachmuylder 2009).

À partir de la Protohistoire, les taux d'érosion sont corrélés positivement à l'importance de la documentation archéologique. Sur notre secteur d'étude, l'érosion des sols, régulièrement présente depuis l'âge du Fer, va croissant jusqu'aux périodes contemporaines²⁸. L'époque romaine constitue une phase d'accélération qui, pour les versants occupés de manière continue, reste malgré tout moins importante que celle des périodes récentes. Les déplacements sédimentaires antiques, en relation étroite avec les aménagements parcellaires (fossés, terrasses, etc.) et avec la conduite des terres agricoles (période de labour, gestion de la végétation), traduisent l'intensification de l'exploitation agricole consécutive à la romanisation.

23. L'horizon sombre et décarbonaté de surface.

24. Chlorose en fer ou en phosphore notamment.

25. Par exemple, la coupe de Lincent "Couture II" (Fechner *et al.* 1997, 232 ; Fechner *et al.* 2014 ; Fock *et al.* 2008).

26. Par exemple le site de Dampierre-le-Château "Liévau" (Fechner *et al.* 2014).

27. Par exemple les sites de Cuperly "La Perte" et Saint-Hilaire-au-Temple (Fechner *et al.* 2014).

28. Par exemple Protze 2014.

Sédimentologie des remplissages lacustres et des mardelles

Une reconstitution des taux d'érosion²⁹ pour la période holocène peut être fournie par l'analyse des remplissages lacustres³⁰. Les "mardelles" enregistrent les dynamiques d'érosion sur les surfaces qu'elles drainent (généralement entre 1 et 10 ha), quelle que soit l'hypothèse retenue quant à leur origine naturelle³¹ ou anthropique³². Dans le bassin versant d'une mardelle forestière de Sarrebourg, la quasi-totalité de l'érosion est liée à la période d'anthropisation datée entre le second âge du Fer et le début de la période romaine (Étienne 2011, 162). Il s'agit d'une période de 200 ans environ, durant laquelle les pratiques agro-pastorales ont entraîné une érosion moyenne de 12 à 14 cm de sol sur le bassin versant de la mardelle de Sarrebourg, soit un rythme moyen annuel de 0,5 +/- 0,1 mm/an (Étienne 2011, 161). Au cours de la période médiévale, cette zone est restée en forêt, l'érosion y a donc été minimale, de l'ordre de 3 à 4 cm, pour un bilan final de 15 à 18 cm en 2200 ans sur ce petit bassin versant. On observe à la même époque un phénomène identique dans les Ardennes françaises (Laurelut & Louwagie, 2002 ; Fechner *et al.* 2014). À Bisping, la phase d'anthropisation agro-pastorale n'a engendré en revanche qu'une faible érosion de 4 à 5 cm de sol, avec des valeurs moyennes de perte de 0,2 mm/an, une valeur trois fois inférieure à celle de Sarrebourg (Étienne 2011, 162). Ces variations de taux d'érosion s'expliquent probablement par des différences de mode d'exploitation. L'analyse du contenu en pollens et en micro-fossiles non polliniques des mares suggère en effet un contexte très marqué par les activités pastorales à Bisping à cette époque, et peut-être plus agricole à Sarrebourg, ce qui pourrait expliquer ces écarts. La mardelle d'Assenoncourt révèle pour sa part une perte de sol estimée à 30 cm pour les 1500 dernières années, principalement due aux pratiques agraires médiévales (Étienne 2011). Les estimations réalisées à partir des carottages dans le lac Frickenhauser (Allemagne) indiquent une déperdition de 55 cm au cours des 2000 dernières années, principalement liée aux pratiques agricoles médiévales (Enters *et al.* 2006 ; 2008).

Enregistrée principalement au niveau des versants des talwegs, la mise à nu des sols des plateaux modifie les bilans d'érosion. L'ensemble des recherches retranscrit l'abrasion potentielle de plusieurs dizaines de centimètres dans les limons de surface. La corrélation entre une forte anthropisation et des valeurs élevées d'érosion – et inversement – suggère un rôle prépondérant des pratiques agro-pastorales dans l'instabilité des sols durant la période antique. Toutefois, climat et anthropisation peuvent participer de façon concomitante à l'augmentation de ces flux érosifs, comme cela a été démontré pour le secteur alpin, pour des pentes plus accentuées (Giguet-Covex *et al.* 2011). Ces données générales doivent donc être modulées en fonction des contextes géomorphologiques (degré de pente, taille des bassins-versants, type de sols et de couvert végétal), mais il apparaît que la déperdition de sols depuis la période antique peut dépasser 30 cm dans bon nombre de contextes, si bien que le profil cultural antique a souvent disparu.

De l'érosion des versants au colmatage des plaines alluviales durant l'Antiquité : un modèle sédimentologique général

Dans le nord de la France, les plaines alluviales, caractérisées par des pentes d'écoulement modérées à faibles, étaient encore souvent tourbeuses au début de l'Holocène avant d'être progressivement colmatées par des apports limoneux. Ces derniers, issus de l'érosion des sols limoneux des plateaux due à la culture, ont colmaté les plaines alluviales, favorisant ainsi l'atterrissement progressif des zones humides et leur assèchement (Notebaert & Verstraten 2010 ; Hoffmann *et al.* 2009 ; Lespez 2012a et b). Cet impact agricole sur le transfert sédimentaire peut être décelé dès le Néolithique, mais il reste à cette période encore modeste et limité spatialement (Fechner *et al.* 2014 ; Ertlen *et al.* 2014). Il est fréquemment repéré dès l'âge du Bronze dans certaines vallées de Lorraine (Fechner *et al.* 2014), dans les fonds de petites vallées en Bresse (Gourgousse *et al.* 1996 ; Richard 1996), en Normandie, comme dans les vallées de la Mue et du Laizon (Lespez 2012a et b). Le recouvrement des derniers niveaux tourbeux par des apports détritiques n'a pas été partout synchrone. D'après les datations radiocarbone, celui-ci s'inscrit dans un

29. Les petits bassins versants comprenant une zone d'accumulation sédimentaire sont particulièrement propices à la restitution de l'érosion des sols. Valeur exprimée en mm/an ou en mm/siècle.

30. Pour le lac jurassien de Saint-Point, Magny *et al.* 2013 ; pour les Alpes, Arnaud 2014.

31. Cette hypothèse est défendue par V. Ollive suite à l'analyse minutieuse de nombreuses tranchées réalisées lors de fouilles préventives (Klag *et al.* 2015).

32. Cette hypothèse a été avancée suite aux travaux de carottages à travers les mardelles (Étienne *et al.* 2011).

intervalle chronologique compris entre la fin de l'âge du Bronze et le Haut Moyen Âge³³. Le colmatage des vallées tourbeuses est donc un phénomène qui a débuté à des dates différentes dans le nord de la France, ce qui ne plaide pas pour une causalité climatique de l'érosion. Cette diachronie révèle plutôt une mise en valeur agro-pastorale asynchrone des bassins versants à des échelles spatiales plus ou moins locales durant toute la Protohistoire.

Dans le Bassin parisien, la sédimentation limoneuse des petits affluents de la Seine connaît plusieurs pics. Si certains coïncident avec des dégradations climatiques, comme dans la vallée de la Beuvronne (Orth *et al.* 2004), d'autres sont associés à une augmentation des marqueurs d'anthropisation dans les échantillons palynologiques du site de Lacroix-Saint-Ouen dans la vallée de l'Oise. L'hypothèse d'une déstabilisation des versants suite à un défrichement a été avancée (Pastre *et al.* 1997). À de rares exceptions près³⁴, l'augmentation du flux détritique dans les lits mineurs a pour conséquence l'exhaussement de ces derniers et la réactivation d'anciens chenaux secondaires (Pastre *et al.* 1997). Durant l'Antiquité romaine, les rythmes de la sédimentation détritique se sont accélérés dans la plupart des vallées, quelles que soient leurs dimensions, comme en témoignent des études réalisées dans le Bassin parisien (Pastre *et al.* 2002 et 2006 ; Carcaud *et al.* 2002 ; Petit *et al.* 2006 ; Sechi *et al.* 2010 ; Morin *et al.* 2011), au sud de l'Angleterre (Fould & Macklin 2006)³⁵ ou encore dans la vallée du Rhin³⁶. En Gaule du nord, l'alluvionnement limoneux se généralise pendant la période gallo-romaine (Pastre *et al.* 2006 ; Sechi *et al.* 2010). Il se traduit à l'échelle du bassin versant de la Seine par une rétraction des lits mineurs, accompagnée d'un atterrissement plus ou moins complet des zones humides (Pastre *et al.* 2006, 201 ; Cruz & Petit 2015 ; Cruz *et al.* 2016). Dans la vallée de la Marne, cet alluvionnement a progressivement nivelé la topographie héritée des périodes précédentes (Le Jeune *et al.* 2012). Des différences locales dans le rythme sédimentaire peuvent cependant être notées. L'augmentation des apports limoneux est observée précocement dans certaines vallées secondaires au centre du Bassin parisien, largement peuplées durant le second âge du Fer, comme celles du Crould à Louvre et de la Mauldre à Jouars-Pontchartain (Blin *et al.* 1999). Le début de l'assèchement de la plaine alluviale de la Seine à Vix, en pied de cuesta du Châtillonnais, s'effectue quelques décennies, voire quelques siècles avant celui de la plaine alluviale de la Laigne à Molesme, daté du 1^{er} siècle p.C. (Petit *et al.* 2006 ; Cruz & Petit 2015 ; Cruz *et al.* 2016). À partir de l'âge du Fer, les plaines alluviales du bassin de la Seine apparaissent généralement à l'abri des débordements saisonniers, et sont largement asséchées. Le régime des crues semble limité à des occurrences ponctuelles, peut-être d'ordre cinquantennal ou centennal (Granai 2014). L'apport sédimentaire qui a asséché les plaines alluviales a probablement accentué le déficit hydrique de l'optimum climatique romain³⁷. La présence de fentes de retrait repérées sur plusieurs sites alluviaux lorrains (Illange, Bouxière, Lesmesnils) traduit un net déficit hydrique qui s'exprime de façon importante lors de l'exploitation de terres alluviales, jusque-là très humides (Gebhardt *et al.* 2014).

La période romaine est donc une période d'accélération généralisée de l'aggradation des plaines alluviales. Si certains géomorphologues renoncent à pondérer la part respective du climat et de l'homme dans cette évolution, nous réaffirmons que l'exhaussement sédimentaire des plaines alluviales pendant le Haut-Empire est directement lié à l'intensification des activités agricoles et pastorales dans les bassins versants (Petit *et al.* 2006). Les études conduites dans les lacs alpins, où des *proxies* analytiques permettent de distinguer le rôle de l'homme de celui du climat, confirment par ailleurs l'importance de ce forçage anthropique pour les trois derniers millénaires (Arnaud *et al.* 2012).

33. Dans la vallée de la Mue, à la Fontaine-Henry, la tourbe devient limoneuse après 760-390 a.C. (Lespez *et al.* 2005 ; 2008) ; dans la vallée de la Seullès, cette date peut être estimée à 1000-200 a.C (Lespez & Germain 2011 ; Viel 2012). Le long des affluents de rive droite de la Dives, la sédimentation limoneuse se généralise au début du 1^{er} millénaire a.C. (Germain-Vallée & Lespez 2006 ; 2011 ; Lespez *et al.* 2010). L'atterrissement limoneux de la vallée de la Dive se met en place entre le 1^{er} et le 4^{ème} siècle p.C. et, dans la vallée de Houay, affluent de l'Orne dans la plaine d'Argentan, l'apport massif de limon se met en place au 6^{ème}-7^{ème} s. p.C. (Lespez 2009). Cet atterrissement se situe vers le début du 8^{ème} siècle p.C. dans la Grande Vallée à la Hague (Lespez *et al.* 2004).

34. On observe un regain des processus tourbeux, comme dans le vallon des Aulnaies-du-Pont à Goussainville (Pastre *et al.*, 1997).

35. En Grande-Bretagne, le taux d'aggradation de la plaine alluviale (0,5 mm/an le long des rivières) chute à 0,2 mm/an pour la période du Haut-Moyen âge, puis remonte à 0,5 mm/an (Macklin *et al.* 2014, 33-36).

36. Ce taux est de 0,6 mm/an pour le Rhin supérieur pour la période laténienne et romaine (Hoffmann *et al.* 2009).

37. Voir infra.

Les sols bonifiés (CP, NB, AG, KF)

Bonifier une terre, c'est la rendre plus productive. Les pratiques permettant d'améliorer la productivité d'une terre dépendent du type de production (élevage, céréaliculture, fruiticulture, etc.) et des caractéristiques des sols, par exemple amendements basiques sur les sols acides, drainage dans les terrains hydromorphes... Remontant au moins au second âge du Fer, les parcelles agro-pastorales sont intégrées dans des systèmes agraires qui perdurent le plus souvent malgré les vicissitudes de l'histoire politique et militaire. En effet, l'ensemble des travaux nécessaires à la mise en place d'une terre productive (épierrement, délimitation, amendements, sarclage...) engage la parcelle dans une trajectoire agraire qui est rarement interrompue, à cause de cet investissement (Cosgrove 1984 ; Erickson 2006 ; Widgren 2012 ; Mitchell 2013).

Rideaux de cultures et aménagements de terrasses

Les terrasses artificielles créées par l'homme sur les plateaux et les versants limitent l'érosion et modifient la géométrie des sols (Follain *et al.* 2006 ; 2007 ; 2009). Si la portée agronomique de ces structures est maintenant établie (Chartin *et al.* 2011), leur mise en place durant l'Antiquité romaine au sein de notre zone d'étude n'est pas nécessairement liée à une volonté consciente de maîtriser l'érosion. Beaucoup semblent corrélées avec la mise en place des parcelles, de sorte que les motivations de leur construction peuvent être multiples : séparation des cultures et de l'élevage, gestion foncière... (Bertrand & Bertrand 2002). Leurs datations sont variables. Certaines sont datées de l'époque romaine comme dans le piedmont vosgien (Pétry 1977) ou sur le plateau du Châtillonnais (Goguy & Bénard 2001-2002 ; Peyre 2011) ; d'autres sont des éléments structurants et pérennes du paysage agricole dont la mise en place commence au Néolithique en Alsace (Fröhlicher *et al.* 2016) ; enfin beaucoup datent de l'âge du Bronze dans le sud de la France (Poupet 1993). Ainsi le paysage agraire de la Gaule romaine est-il en grande partie hérité des périodes précédentes et chaque terroir nécessite un phasage archéologique (Robert *et al.* 2011). Si, dans les zones accidentées, les parcelles sont faites de murs et de terrasses, dans les plaines humides ce sont des fossés. Cette adaptation de l'agriculture antique aux contraintes édaphiques témoigne de la connaissance des terroirs.

Le drainage des terres

Sur les plateaux limoneux, le drainage des sols permet d'accroître fortement le rendement des cultures. Dès qu'un parcellaire fossoyé est mis en place, les terres sont drainées et nous pouvons considérer que le grand développement des systèmes parcellaires de l'âge du Fer, en particulier durant La Tène, est une réponse à une exploitation des terres drainées (chapitre 8 de ce volume). Les phases humides saisonnières ont obligé les agriculteurs à développer des systèmes de drainage efficaces pour éviter les effets d'anoxie nuisibles aux végétaux cultivés (Baize & Jabiol 1995).

Un grand nombre de parcellaires fossoyés antiques témoignent de la volonté de mettre en valeur des terres "lourdes", argileuses ou affectées par des processus d'engorgement en eau, notamment sur les plateaux limoneux, dès le Haut-Empire (Ouzoulias 2013). En Brie boisée, des terres lourdes ont fait l'objet d'une mise en valeur agricole et/ou pastorales, comme en témoigne la mise au jour d'un parcellaire reconnu sur plus de 30 ha (Desrayaud 2008 ; vol. 1, chap. 10). Le vaste ensemble de fossés et de mares mis au jour sur plusieurs milliers d'hectares à Bussy-Saint-Georges était organisé pour évacuer les eaux et assainir les terres lourdes (vol. 1, chap. 10). L'entretien de ces réseaux parcellaires devait être régulier comme le montrent bien les recreusements des fossés colmatés³⁸.

En complément de ces systèmes de drainage, d'autres dispositifs spécifiques font leur apparition durant l'époque romaine : des puisards et des drains enterrés en pierre sèche ou en céramique. En Lorraine, par exemple, à Yutz "Vieux Bourg", un alignement de puits non cuvelés correspondait à des puisards alimentés par des drains semi-cylindriques en terre cuite, disposés en lignes parallèles ; cet aménagement est daté des I^{er}- III^e siècles p.C. (Blaising 2002). Sur les terres lourdes de l'Île-de-France, des puisards renvoyant l'eau sous les couches imperméables complétaient les réseaux fossoyés ; ces structures

38. Par ex. Lieusaint "Zac Pyramide", vol. 1, chap. 11, 454.

doivent être identifiées archéologiquement afin de comprendre le drainage des terres³⁹. Si la multiplication des sites et des aménagements agricoles durant la période antique est notable, témoigne-t-elle de changements techniques ?

Traces agricoles

Des surfaces agricoles labourées ont été identifiées à différentes reprises (Gebhardt & Langohr 2015), les plus anciennes remontant à la Protohistoire (Schwartz *et al.* 2009). Une surface érodée par labour a été repérée sur le site de Vilers-le-Tourneur dans la vallée de la Veyle (Laurelut & Louwagie 2002 ; Fechner & Slachmuylder 2009). Des espaces bien délimités évoquent des jardins enrichis en phosphates et charbons de bois à Chevigny-Saint-Sauveur dans la plaine dijonnaise (Virlogeux 2002) ou à Velzeke en Moyenne Belgique (Fechner *et al.* 2000). À Moyenvic (Moselle), le labour est attesté dans un chenal comblé (Gebhardt 2004). Des traces de labours croisés gallo-romains ont été notamment identifiées dans la région de Metz (Waton 1986) ou encore à Lincent, en Moyenne Belgique (Fock *et al.* 2008). Ces structures n'étant pas associées à des limites de parcelles, le lien entre forme des parcelles et pratiques de labours ne peut être étudié.

Amendements et fumures

L'entretien de la fertilité des sols

Le potentiel agronomique des sols antiques a pu être amélioré par amendements minéraux (engrais) ou organiques (fumures), en complément du travail du sol. Ces deux processus sont décrits dans la littérature agronomique antique et peuvent être documentés archéologiquement⁴⁰. Les textes agronomiques antiques, notamment Palladius et Columelle, préconisent l'usage des fumures et des amendements. Faisant référence à leur acquisition, Pline écrit : "Bien cultiver, c'est nécessaire ; très bien cultiver, c'est ruineux."⁴¹ La nécessité de restituer à la terre les éléments nutritifs exportés avec les récoltes est comprise par les agronomes romains. Qu'en est-il en Gaule du nord ?

Les fumures

La plus ancienne trace d'usage d'engrais organique (avec épandage de rejets domestiques) date du Néolithique final (Bakels 1997). L'enrichissement des champs à l'aide de fumier d'étable a été clairement démontré pour le site de Weier en Suisse (Troels-Smith 1984). Les champs de l'âge du Bronze en Grande-Bretagne révèlent, encore de nos jours, un enrichissement en azote (van der Veen 1992).

De récents sondages réalisés dans les *Celtic Fields* de Zeijen et de Wekerom (Pays-Bas) ont apporté des informations inédites sur la genèse et l'utilisation de ces ensembles grâce à diverses analyses sédimentaires et paléoenvironnementales (micromorphologie, anthracologie, datation OSL) (Arnoldussen & van der Linden 2017). Les résultats de ces analyses mettent en évidence que les champs et les talus contiennent des sédiments d'origine allochtone. La présence de pollens de plantes des marécages (cypéracées, massette, rubanier) et de microfossiles d'algues vertes témoignent d'un apport de végétaux collectés dans les zones marécageuses, vraisemblablement celles des environs. Ces résultats suggèrent un enrichissement des sols morainiques par une fumure sans doute fabriquée dans de proches maisons-étables, avec un mélange d'excréments bovins et de litière végétale collectée dans les milieux humides. Durant le premier millénaire a.C., cet amendement aurait épaissi au fil des siècles les champs et les talus, pratique qui rappelle fortement le mode de formation des sols de *plaggen*, anthroposols dont l'origine est généralement attribuée au Moyen Âge (Langohr 2001). Dans l'Europe du nord, les maisons-étables dont l'essor remonte à l'âge du Bronze (Roymans 1996) présentent de larges fosses à fumiers dans les modèles datés de l'époque romaine : ces aménagements témoignent de la gestion des déchets de stabulation et des paysages alentours (Langohr *et al.* 2004 ; résumé récent dans Broes *et al.* 2017). Ces fosses sont manifestement des fosses à fumier, surcreusées par des curages répétés pour récupérer la fumure, comme le prouve par exemple l'étude de l'une d'elles sur le site de Brecht "Zoegweg" en

39. Structure à ne pas confondre avec des puits à eau car leur fonction est opposée. Certaines sont datées de l'époque sur les fouilles de Sénart (Seine-et-Marne) (Broutin *et al.* 2018 ; Mondoloni *et al.* 2005). Nous remercions P. Broutin pour ses informations.

40. La question de l'assolement ne peut pas être abordée à partir de données archéologiques. Malgré ces implications importantes, et dans la mesure où aucun calcul de productivité n'est proposé, elle ne sera pas abordée ici.

41. *Bene colere necessarium est, optime damnosum* (Plin., *Nat.*, 18,38).

Belgique. Les analyses réalisées dans le remplissage sédimentaire mettent en évidence la présence d'algues (diatomées et chrysophycées), qui indiquent que la litière employée pour fabriquer le fumier a été collectée dans une zone marécageuse, ce qui rappelle les résultats concernant les *Celtics Fields*⁴². Sur le site de Brecht-Zoegg daté du 1^{er} au III^e siècle p.C. (Verbeek *et al.* 2004), l'étude pédoarchéologique d'une grande fosse⁴³ de type "Potstallen"⁴⁴, implantée dans l'un des grands bâtiments, montre très clairement que cette fosse a été profondément piétinée par les bovins. La fumure était constituée d'un mélange de bouses de vache⁴⁵, d'urine⁴⁶, de rejets domestiques⁴⁷, de terres et litières issues des zones marécageuses⁴⁸. Aux Pays-Bas et dans le nord de la Belgique, ces étables étaient associées à la pratique des "plaggen", sols podzoliques enrichis par ces énormes quantités de fumure (Langohr 2001). La carte de répartition de ces fermes-étables gallo-romaines montre clairement qu'elles sont inféodées aux podzols, à proximité des zones marécageuses du delta du Rhin. Cette zone où se développait l'élevage bovin se distingue bien des zones limoneuses destinées à la céréaliculture (fig. 16).

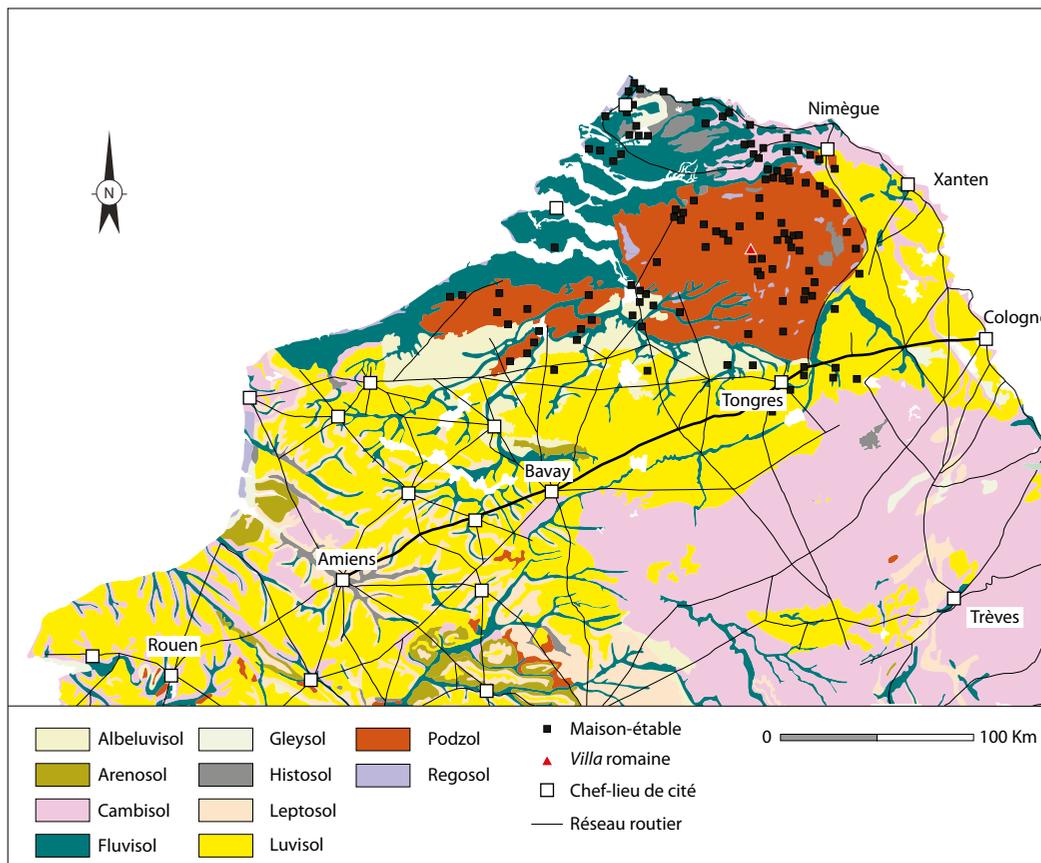


Fig. 16. Carte schématique et non exhaustive des maisons-étables dans le nord de la Gaule. La seule villa connue dans ce secteur et représentée ici est celle de Hoogeloon. Voir les cartes générales des villae dans le chap. 3, fig. 44a et b, ci-dessous (© N. Bernigaud 2018).

42. J. Mikkelsen, C. Nicosia, et R. Langohr, "Contribution de l'archéopédologie au fonctionnement des maisons-étables à l'époque romaine dans le nord de la Belgique", communication orale inédite dans le cadre du séminaire RurLand du 30 novembre 2015, INHA, Paris.

43. Structure 76/538 du site de Brecht. Présentation de C. Nicosia lors du séminaire RurLand du 30 novembre 2015 : J. Mikkelsen, C. Nicosia, R. Langohr, Contribution de l'archéopédologie au fonctionnement des maisons-étables à l'époque romaine dans le nord de la Belgique.

44. Aujourd'hui, les étables spécialement aménagées avec une fosse creusée pour récolter de grandes quantités de fumier sont appelées "Potstallen".

45. De nombreuses traces de bousiers témoignent de la richesse en matière organique de ce matériau.

46. Le phosphate imprégnant ce matériaux est très important.

47. Charbons, phytolithes, sédiments brûlés, cendres.

48. La présence de phytolithes de graminées, des diatomées et des algues de type chrysophycées signent l'apport de matériaux, sédiments et litières issus des marécages.

Dans le Bassin parisien, les indices de fumures antiques sont rares et les différentes méthodes employées sont encore largement discutées. L'analyse des tessons épars et émoussés, retrouvés en prospection de surface, a depuis longtemps été utilisée (Foard 1978 ; Wilkinson 1982) dans l'identification des terroirs antiques du sud de la France (Favory *et al.* 1994 ; Poirier & Nuninger 2012) et dans le Berry (Poirier 2007 ; 2016). La présence de ce mobilier signerait, selon certains, des épandages de résidus organiques mêlés à des tessons céramiques, mais la présence de petites occupations pourrait également avoir échappé à leur investigation. En complément de l'usage d'engrais vert et de la fumure directe des jachères par le bétail paissant, le transport de fumier⁴⁹ pourrait avoir principalement été destiné à des cultures intensives. D'après les agronomes latins, les champs devaient être fumés avec un minimum de 15 t/ha⁵⁰. Se basant sur les sources mentionnant la gestion et le commerce de ces rejets urbains, P. Ouzoulias émet l'hypothèse que les boues urbaines (*stercus*) constitueraient des apports de fertilisants permettant une agriculture intensive en zone périurbaine⁵¹. Se pose alors la question des domaines éloignés (loin des villes et/ou difficile d'accès). Avaient-ils les moyens techniques et financiers de produire et de distribuer les fumures ? Pour les agronomes et historiens de l'agriculture, une forte production ou un transport à longue distance de fumier durant l'époque antique paraît peu envisageable (Mazoyer & Roudart 1998) et il est vrai que les identifications de fosses à fumier sur les sites ruraux dans le Bassin parisien restent rares⁵².

Les corpus carpologiques du sud de la France indiquent l'apparition des plantes nitrophiles durant la Protohistoire, ce qui indique l'apport de fertilisant (Bouby 2010). Les travaux conduits dans le nord de la France en carpologie (Zech-Matterne *et al.* 2017a) complétés par les analyses isotopiques des restes carpologiques de céréales (Aguilera *et al.* 2017b) prouvent la fumure des terres dans le nord de la Gaule, en particulier pour la production de céréales exigeantes comme le blé nu (*Triticum aestivum*) (ci-dessous chap. 6). Sur les sols crayeux de Champagne, la densité de l'occupation rurale dans la périphérie immédiate de Reims est probablement due à l'amendement des sols via l'épandage des déchets urbains (*stercus*). Cela expliquerait aussi la présence de la culture des blés nus (secteur de Bezannes) qui, à l'inverse de l'orge, ont des besoins plus élevés en azote et autres nutriments.

Les études micromorphologiques et géochimiques des sols repérés lors d'opérations préventives confirment également la fumure gallo-romaine des terres⁵³. Sur certains sites lorrains, des résidus organiques humifiés, des nodules phosphatés et des artefacts anthropiques remaniés et roulés révèlent des apports de fumier⁵⁴. En Moselle, des déjections d'herbivores attestent la présence de bétail dans un champ (Borny) ou un chemin creux (Vitry-sur-Orne). Le travail du sol est avéré à Moyenvic (labour) et Bliesbruck (jardinage). À Chevigny-Saint-Sauveur dans le Dijonnais, un vaste espace de 9 600 m² occupé par des terres noires, riches en apports organiques témoigne clairement d'apport de fumures (Virlogeux *et al.* 2005, 288-291). Ces travaux permettent d'attester la connaissance des pratiques d'amendements mais les études restent rares. Il est donc difficile d'appréhender les surfaces mises en jeu et de quantifier l'importance des pratiques dans le système agro-pastoral gallo-romain.

Les engrais

Le marnage et le chaulage sont des techniques d'amendement des sols qui consistent à épandre une certaine quantité de carbonates sur des terres arables acides. Ces pratiques sont décrites par les traités d'agronomie antiques et modernes (Puvis 1835). Plus que l'apport de calcium, ces engrais permettent d'améliorer la structure du sol en favorisant la floculation des argiles et la formation des complexes organo-minéraux. Ce faisant, la sensibilité du sol à l'érosion est diminuée et sa capacité à redistribuer des éléments nutritifs augmentée. Les sols pouvant tirer un bénéfice important de ces apports sont en très grande majorité éloignés des roches carbonatées. D'un point de vue analytique, l'apport d'engrais carbonatés se traduit notamment par une remontée du pH. Pour élever le pH d'une unité sur terre sableuse, il faut lui apporter à l'hectare 1,5 à 2 tonnes de

49. Une scène du calendrier rustique de la mosaïque dite "des saisons" de Saint-Romain-en-Gal (conservé au Musée d'Archéologie Nationale de Saint-Germain-en-Laye, inv. 83116) représente l'apport de fumier sur une claie (Lancha 1981, n° 368, pl. CXIIb). Voir cependant Bouvier 2002 pour une autre lecture de la scène.

50. Reprenant les agronomes latins, on peut estimer, pour l'Antiquité, le poids de fumier à l'hectare entre 15 et 47 t/an (Ouzoulias 2006, 185 ; Poirier & Nuninger 2012, 18 ; infra chap. 5 et 6).

51. P. Ouzoulias, communication personnelle. Voir vol. 1, chap. 11 pour le cas de la périphérie de Reims.

52. Rouppert *et al.* 2011 et Rouppert 2017 pour l'Île-de-France. Pour la région Centre, voir aussi Poitevin *et al.* 2017.

53. Par ex. Fechner, soumis ; divers travaux de C. Cammas dans la moitié nord de la France.

54. Sites de Vitry-sur-Orne, Ay-sur-Moselle, Saint-Epvre.

chaux, 2 à 3 tonnes pour les limons, 3 à 4 tonnes pour les terres lourdes argileuses. Ce marnage ou chaulage doit être renouvelé à un rythme pluriannuel pour être efficace et tend à disparaître avec le temps. Le poids du matériau et la distance entre les zones émettrices (roches carbonatées extraites) et les zones réceptrices (sols agricoles acides) posent certaines questions quant à l'organisation d'un tel trafic. Pline l'Ancien (*Nat.*, 17.47) atteste l'utilisation du chaulage chez les Éduens. Or, pour la ville d'Autun, les affleurements de roches calcaires utilisées pour la construction des bâtiments publics se situent à plusieurs dizaines de kilomètres⁵⁵. Ont-ils été aussi sollicités pour le chaulage des jardins et des terrains agricoles périurbains ? Pline ne le dit pas explicitement mais décrit, au 1^{er} siècle p.C., l'utilisation traditionnelle de différentes marnes en Gaule et en Grande-Bretagne afin d'améliorer la production des céréales et des fourrages. Cette pratique est dénommée *marga* chez les Pictons et les Éduens (Plin., *loc. cit.*). Les Ubiens creusaient à trois pieds⁵⁶ sous la terre très fertile des alluvions du Rhin pour extraire la marne avant d'amender les sols environnants afin d'améliorer les rendements agricoles (Plin., *loc. cit.*) ; Varron (*R.*, 1.7.8) décrit des amendements par épandage de craie (*creta*).

L'utilisation de matériaux carbonatés est tellement courante, notamment pour la construction (pierres, chaux, plâtre, ciment), que la finalité des extractions mises en évidence peut être difficile à déterminer. Une fosse d'extraction implantée au cœur d'un chenal aurait été utilisée à l'âge du Bronze ou au Hallstatt ancien pour extraire du sable calcaire servant à amender les cultures (Giraud *et al.* 2009, 494). Certaines mardelles de Lorraine, implantées sur les marnes du Keuper, pourraient correspondre à des marnières (Vanwalleghem *et al.* 2006 ; Étienne 2011). En bordure de Seine, une grande fosse polylobée gallo-romaine exploitant des silts sableux très carbonatés a probablement été creusée pour amender les sols acides du plateau⁵⁷. Sur les limons décarbonatés de Belgique, du Luxembourg et de la frange septentrionale de la France, outre l'amendement par le fumier⁵⁸, l'amendement minéral antique est attesté par des analyses chimiques d'horizons cultivés gallo-romains⁵⁹. L'apport aux sols de matériaux variés aux sols témoigne de l'horticulture sur les sites gallo-romains de Velzeke et d'Arbre (Fechner *et al.* 2000).

Amendements organiques et minéraux ont été pratiqués durant l'Antiquité, néanmoins leur mise en évidence archéologique est rare (sols souvent érodés) et nécessite des techniques adaptées (analyses physico-chimiques, micromorphologie, analyses isotopiques sur écofacts). La géographie des pratiques culturelles gallo-romaines, entre héritage celtique, spécialisation des terroirs et innovations techniques commence à se dessiner grâce au développement de l'étude des écofacts et des analyses archéopédologiques.

Les sols agricoles

Bien que l'expression "archéologie du champ" soit employée depuis de longues années (Boissinot & Brochier 1997), les études restent peu nombreuses. Des méthodes de prospections variées permettent de reconnaître des champs fossiles. L'étude des parcellaires est une discipline bien établie qui s'appuie le plus souvent possible sur des fouilles et propose une analyse de la carte archéologique, notamment en fonction de l'orientation des structures (Carpentier & Marcigny, éd. 2012). En revanche, la caractérisation des productions issues de ces parcelles reste le plus souvent indéterminée, de sorte que réunir les informations concernant le plan et la fonction des parcelles est quasi-inédit, à l'exception de quelques parcelles avec des fosses de plantation (Zech-Matterne 2011).

Sur les sols crayeux de Champagne, la détermination de la fonction des espaces est étayée par des analyses micromorphologiques, géochimiques et malacologiques ; ces dernières permettent de bien distinguer les espaces forestiers des espaces semi-ouverts (friches), prairies ou champs⁶⁰ (Boulen *et al.* 2012). Dans un fond de vallon sec à Cuperly "La Perte"

55. Les calcaires mis en œuvre dans le bâti gallo-romain d'*Augustodunum* sont issus de carrières de la région beunoise situés à plus de 30 km d'Autun (Blanc *et al.* 1985).

56. Environ 1 m.

57. Alizay "La Chaussée", responsable de fouille Claire Beurion (INRAP). La texture du matériau trop peu argileux pour en faire de la terre à bâtir, est tout à fait indiquée pour amender les sols acides du plateau (étude en cours).

58. Cf. supra.

59. Sites de Remerschen (Luxembourg), de Fexhe-le-Haut-Clocher, Rebecq, Lincent, Blicquy, Arbre, Velzeke, en Belgique, Cuperly "La Perte" et Champfleury, dans la Marne, pour ne citer que les mieux documentés.

60. Sur les sites de Bouy, Cuperly "les Haches", Sivry-Ante "Secteur occidental de Dampierre-le-Château Liévaux".

(Marne), une paléo-surface romaine non labourée correspondant probablement à une zone de pâturage extensif est scellée sous des colluvions dont la mise en place débiterait à l'époque antique (Fechner 2004 ; Fechner & Slachmuylder 2009, 354). Ces études montrent que certains profils agronomiques anciens sont bien préservés ponctuellement mais la représentativité spatiale de ces analyses à l'échelle d'un terroir exploité reste posée.

L'archéologie du champ peut également être mise en place dans les espaces archéologiques conservés sous forêt. Les cartes archéologiques sont précises et étendues, notamment pour la période romaine (Cas d'étude 2). En l'absence de pratiques sylvicoles destructives⁶¹, les forêts sont des écosystèmes très favorables à la conservation des vestiges archéologiques car les processus d'érosion y sont négligeables en comparaison des zones cultivées (Bichet *et al.*, 1997 ; Campy & Macaire, 2003 ; Dupouey *et al.* 2007). Les caractéristiques biologiques et sédimentaires du milieu forestier permettent également la préservation des modifications du sol, issues de la dernière phase de l'occupation de l'espace (Dupouey *et al.* 2007). Les prélèvements pédologiques et relevés phyto-sociologiques réalisés en forêt de Haye (Dupouey *et al.* 2002, Georges-Leroy *et al.* 2009) ont ainsi permis de montrer que les parcelles, les habitats et les chemins avaient des compositions géochimiques différentes.

61. Sous-solage et enrésinement.

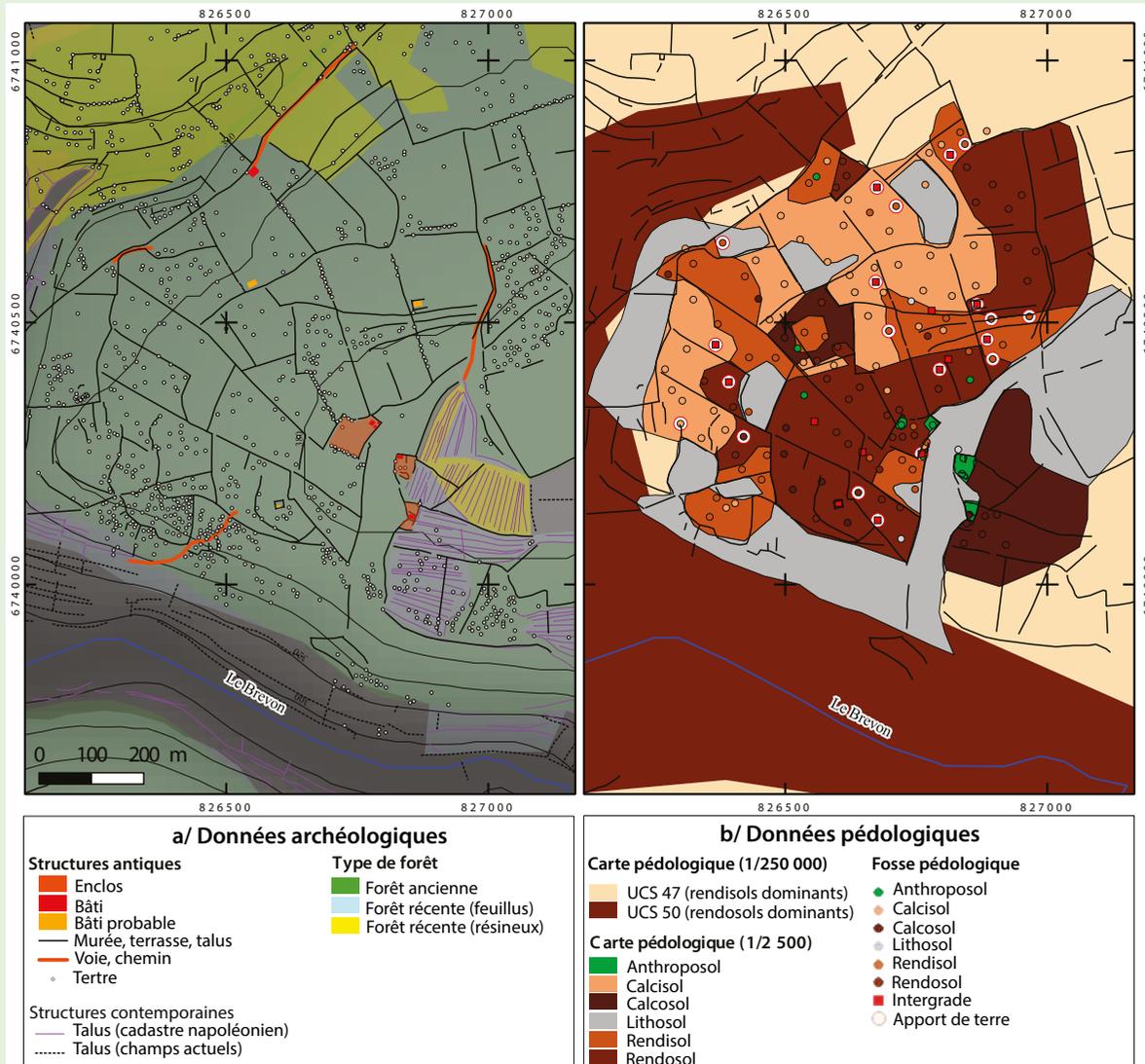


Fig. 17. Carte archéologique (a) et archéopédologique (b) sur le site de Roche Chambain (Côte-d'Or, Bourgogne, France) (© A. Giosa 2018).

Cas d'étude 2 : Caractérisation archéopédologique des habitats gallo-romains et de leurs terroirs. L'exemple de la forêt du Chatillonnais

Alain Giosa, Christophe Petit

Dans quelles mesures, et sous quelles conditions ces différences géochimiques peuvent-elles servir à interpréter la fonction des espaces archéologiques ? Des prospections archéopédologiques⁶² ont été réalisées sur le site de Roche-Chambain⁶³ (fig. 17a). Il s'agit d'un ensemble de parcelles et d'habitats occupant un rebord de versant dans la vallée du Brevon, affluent du cours supérieur de la Seine. 291 points d'observations du sol⁶⁴ réparties sur les 50 ha du site et accompagnés d'observations de surface (chablis) ont permis de dresser une carte archéopédologique (fig. 17b). La superposition de la carte pédologique régionale (1/250 000) avec la carte pédologique locale (1/2 500) réalisée dans le cadre de cette étude, montre des différences importantes ; les résultats qui sont attendus en termes d'anthropisation des sols ne peuvent donc faire l'impasse sur l'acquisition de données primaires. La carte archéopédologique locale permet de réaliser plusieurs constatations :

- les anthroposols (présence de mobilier) sont localisés dans les enclos⁶⁵
- les habitats sont groupés autour des lithosols (lapiés)
- les champs contemporains (cadastre napoléonien) ont une couverture pédologique homogène et différente des sols antiques
- certaines limites de sols correspondent à des limites archéologiques, d'autres non
- 25 fosses pédologiques ont permis de documenter des apports de terre importants (intergrades) ou plus tenus (mottes d'argile de décarbonatation).

La configuration des sols, sur le versant de Roche-Chambain, est donc issue de la conjugaison de facteurs morpho-climatiques⁶⁶ à laquelle s'ajoute l'histoire de l'utilisation du terroir⁶⁷. La teneur en matière organique et le pH ont été mesurés sur l'horizon présent à 10 cm de profondeur pour chacune des fosses pédologiques. Étant donné la dépendance de ces variables géochimiques vis-à-vis des processus pédogénétiques, seuls les résultats obtenus sur les rendosols et les anthroposols sont présentés ici (fig. 18). On s'affranchit ainsi de la variabilité géochimique inhérente aux différents types de sols pour mieux distinguer la variabilité anthropique. Les teneurs en matière organique et le pH sont présentés en fonction du contexte archéologique de prélèvement⁶⁸. Ainsi, les sols des bâtiments et des enclos sont riches en matière organique (teneur voisine

62. Terme introduit par R. Langohr pour signaler les liens entre pédologie, archéologie et l'histoire de l'utilisation diachronique de l'exploitation des terres (EGS, 2001).

63. Étude pionnière archéopédologique ayant pour objectif de caractériser un terroir anciennement exploité par une communauté rurale ; A. Giosa, doctorat Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne, en cours.

64. Dans ce cas, des fosses pédologiques.

65. Sauf quelques charbonnières éparses.

66. Localisation des lapiés, des rendosols et des calcisols.

67. Anthroposols, calcosols sur champ moderne, apport de terre décarbonaté sur les sols squelettiques (rendosols et rendisols).

68. Le test de Kruskal-Wallis a été utilisé pour asseoir l'interprétation des résultats. Cet outil statistique probabiliste, basé sur une comparaison des rangs, teste l'hypothèse d'égalité des modalités. Il a permis de mettre en évidence, avec un seuil de confiance (alpha 0,05), la présence de différences significatives entre les contextes archéologiques de prélèvement (p-value < 0.0001) pour les deux variables géochimiques présentées.

de 20 %) et ont un pH très élevé. Les charbonnières sont moyennement riches en matière organique et leur pH est variable. Les parcelles ont des teneurs en matière organique d'environ 10 % et leur pH est plus faible. La variabilité du pH, certes de moindre amplitude que la variabilité de la matière organique, est malgré tout significative. L'impact anthropique est particulièrement fort au niveau des enclos. Les activités humaines de stockage, de consommation, de rejets ont engendré une accumulation de matière organique alors que la construction en pierre calcaire a eu pour effet d'augmenter le pH. Comme en forêt de Haye, ces analyses n'ont pour l'instant pas vocation à permettre l'identification des espaces. Il s'agit dans un premier temps de préciser, en partant de contextes anthropisés, les modalités de l'enregistrement de l'impact anthropique dans les sols et de sa conservation sur le temps long.

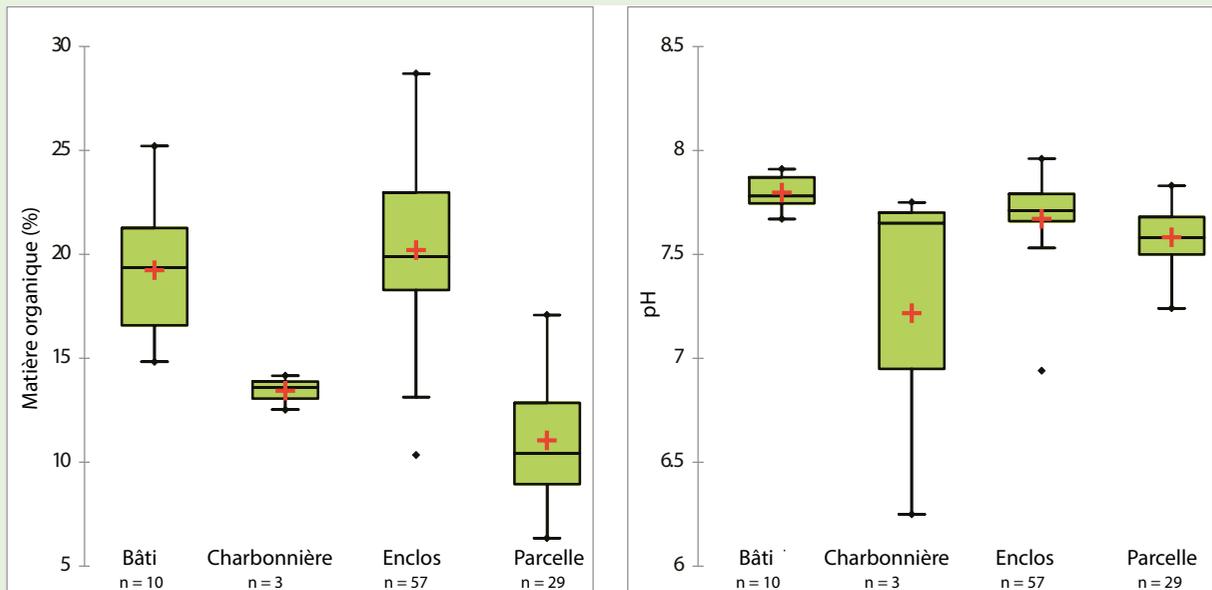


Fig. 18. Teneur en matière organique (gauche) et pH (droite) des espaces archéologiques (bâti, charbonnière, enclos parcelle) occupés par les mêmes types de sols (rendosols et anthroposols) échantillonnées sur le site de Roche Chambain (prélèvements réalisés à 10 cm de profondeur) (© A. Giosa 2018).

FORÊT ET OUVERTURE DU MILIEU (CP, AG, BP)

Si la composition taxonomique des forêts de Gaule romaine était proche de la couverture actuelle (Chevallier, éd. 1985), on s'interroge sur leur extension, leur état (naturel, anthropisé, plus ou moins dégradé). La composition végétale des forêts contemporaines dépend principalement du climat et du relief (Leguédou *et al.* 2011). L'étage montagnard est principalement occupé par le hêtre, mais aussi les conifères (épicéa, sapin) dans les massifs des Vosges, du Jura et des Ardennes. L'étage collinéen est plus particulièrement favorable au chêne, souvent accompagné par d'autres espèces arborées (charme, hêtre, etc.). Dans le nord de la France, les pinèdes restent peu développées, mais se trouvent sur certains sols sableux, comme à Fontainebleau en Île-de-France. Dans les environnements littoraux et alluviaux se développent des espèces ligneuses ripicoles de bords de cours d'eau et de marais (aulnaie, saulaie). Actuellement, la couverture forestière est encore importante dans notre zone d'étude où elle représente environ 30 % de la surface. Celle-ci s'organise en fonction d'un gradient longitudinal : les secteurs orientaux, Suisse, Jura et Vosges, Forêt Noire, Ardennes sont les plus boisés avec un taux dépassant 45 % de la surface ; les plateaux lorrains et bourguignons, l'Alsace, les plateaux du Bassin parisien sont boisés au tiers. Le taux de la frange littorale, Picardie et Normandie, et de la plaine belge ne dépasse pas 20 %⁶⁹.

La forêt en Gaule perçue par César

Dans son récit de la guerre des Gaules, César livre quelques brèves informations sur le paysage, mais il ne faut pas espérer en tirer une information trop précise, comme l'ont bien rappelé certains historiens (Harmand 1985 ; France 1986 ; 1989). Le proconsul cite deux très grands massifs forestiers, l'immense forêt hercynienne qui va du Rhin au pays des Daces et ne pouvait être traversée qu'en 60 jours de marche au moins (Caes., *Gal.*, 6.24-25) et celle des Ardennes, la plus grande de toute la Gaule, qui s'étend depuis les bords du Rhin, en pays trévière, jusque chez les Nerviens, une distance de plus de 500 milles, soit plus de 700 km dans sa plus grande dimension (*Gal.*, 6.29). La couverture forestière de la Gaule ne se résumait pas à ces deux seuls massifs auxquels on peut ajouter celui des Vosges (*Silva Vosagus*), l'un des rares qui soit représenté sur la table de Peutinger. César n'évoque que peu les forêts car, de toute évidence, ce sont des zones potentiellement dangereuses, évitées par les armées. Néanmoins son récit laisse transparaître non pas une Gaule chevelue fortement boisée, mais des campagnes où la forêt paraît déjà très morcelée. La cité helvète, sur le plateau suisse et le versant oriental du Jura, offrait un paysage ouvert avec un équilibre entre sols cultivés et sylvie (*Gal.*, 1.2.3 ; Harmand 1985, 143). La région proche de *Vesontio* (Besançon) présente aussi un paysage ouvert (Caes., *Gal.*, 1.38 et 1.41). Dans le nord de la Séquanie, la forêt était peut-être même encore plus réduite que chez les Helvètes.

Plus à l'ouest, dans le Bassin parisien, on peut identifier de façon anecdotique des massifs forestiers, isolés dans une campagne probablement largement ouverte⁷⁰. Tout autour de la Beauce, des forêts périphériques (Forêts de Montargis, d'Orléans, Yvelines, Dreux, Senonches, Marchenoir) sont évoquées par César⁷¹. Aucune forêt n'est toutefois mentionnée en pays ambien, en Picardie. César signale des forêts humides de peu d'importance chez les Morins et les Ménapes, cités littorales en arrière de la côte de la Manche et de la Mer du Nord. Il restait cependant des forêts dans la région de *Portus Itius* (Boulogne-sur-Mer) puisque celles-ci ont été exploitées en 54 a.C. pour la construction d'une flotte d'au moins 800 navires pour la deuxième expédition de Bretagne (Caes., *Gal.*, 6.1.1-4 ; 2.2 ; 8.6).

Le paysage évoqué par César lors de la guerre des Gaules est donc de toute évidence largement ouvert : la forêt occupait les hauts reliefs (Jura, Ardennes, etc.) mais les plaines sont décrites comme une mosaïque de champs et de prairies, avec parfois des marais et des forêts largement morcelées et difficiles à positionner précisément. Nous n'avons aucune information sur l'aspect et l'état général de ces forêts (primaires, gérées, surexploitées), les descriptions étant succinctes. Mais dans tous les cas, il est clair que le couvert forestier était déjà largement morcelé à la fin de l'âge du Fer, ce qui invalide la vision du XIX^e siècle

69. Source Institut Forestier National (IFN).

70. César relate la fuite de Gaulois dans le bois de la rive gauche de la Seine, probablement à l'emplacement des bois de Meudon ou une extension vers Vanves et Issy-les-Moulineaux (Harmand 1985, 152).

71. César signale que ces forêts sont incapables de protéger les populations en fuite mais ceci ne permet pas d'en déduire une superficie, même approximative.

d'une Gaule considérablement boisée (Maury 1850, 197 ; Jullian 1908, 260-265). Bien que certains historiens l'aient appelée de leurs vœux (Harmand 1985), l'étude des forêts gauloises et gallo-romaines reste encore à écrire.

La forêt en Gaule d'après les données palynologiques

Des données archéologiques, historiques et palynologiques ont été confrontées depuis longtemps à l'échelle d'un site ou d'une microrégion (Daubigney & Richard 1986 ; Galop 1997), avec une résolution chronologique relativement faible. Nous voudrions ici aborder la question à l'échelle géographique de notre programme. Les données retenues sont issues de zones faiblement anthropisées, à l'écart des sites archéologiques où les activités humaines biaisent très largement la reconstitution

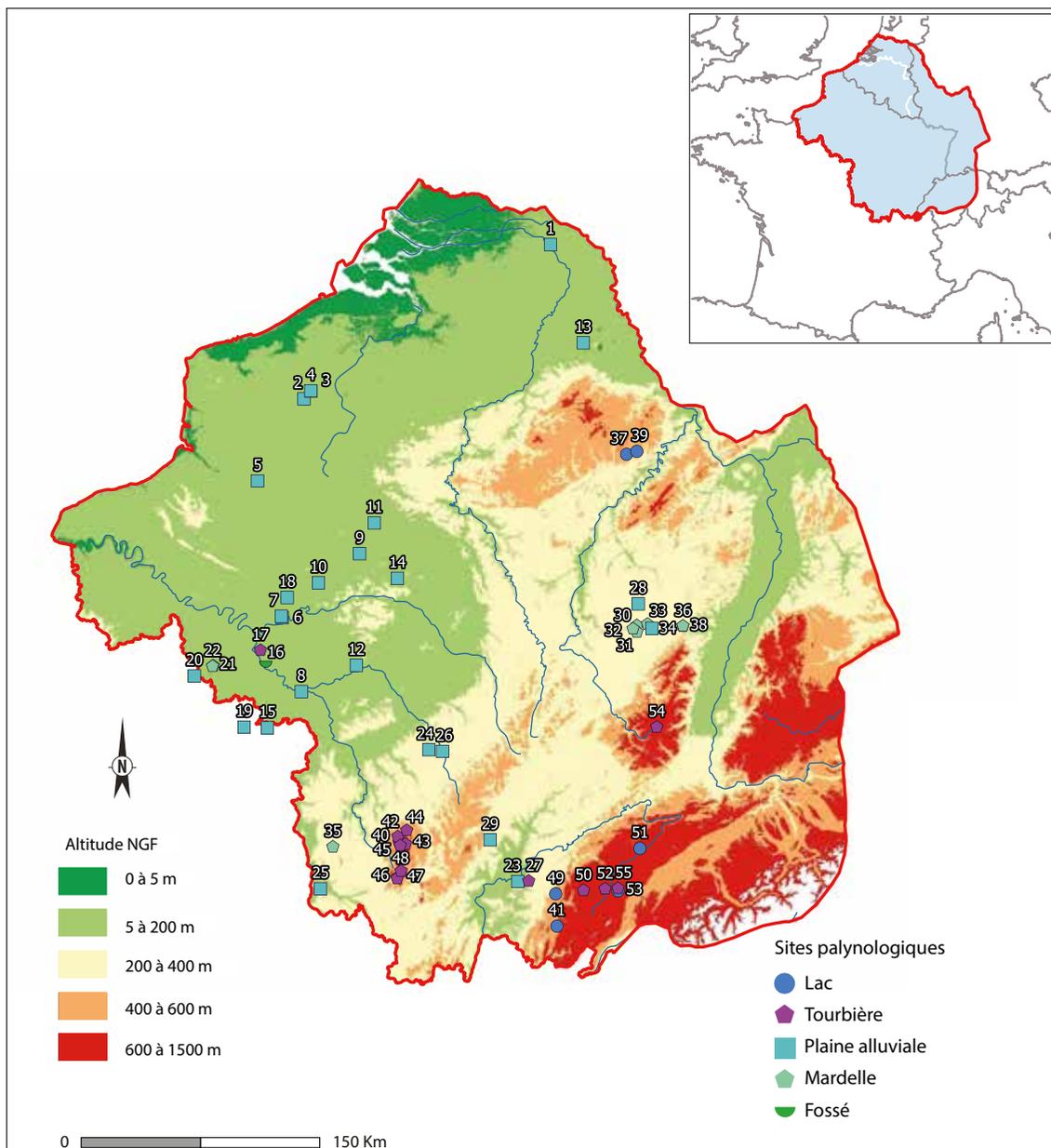


Fig. 19. Carte de localisation des sites ayant fait l'objet d'analyses palynologiques (liste des sites en annexe 2) (© B. Parrondo 2018).

du paysage⁷². L'identification et le comptage des grains de pollen issus des séquences sédimentaires prélevées par carottage ou sondage dans des zones humides (tourbières, lacs, paléo-chenaux) permettent de reconstituer le degré d'ouverture du milieu en comparant le pourcentage des pollens arboréens (%AP) à celui des pollens non arboréens (%NAP). Ce rapport ne représente toutefois pas directement un taux de boisement et il existe un certain nombre de biais en fonction de certaines conditions locales⁷³. Seule une approche statistique permet de mettre en évidence les principales tendances à l'échelle de notre programme.

Sur notre zone d'étude, nous avons retenu au total 55 diagrammes polliniques qui ne sont pas répartis de façon aléatoire (fig. 19, annexe 2). Ces données issues de travaux de thèses de palynologues se concentrent dans les massifs du Jura et du Morvan où se trouvent de nombreuses tourbières, lacs et zones humides. Elles sont plus rares à basse altitude, dans la plaine bressane et dans le Bassin parisien, où les zones humides favorables à la conservation du pollen sont localisées dans les plaines alluviales (remplissages de paléo-chenaux) et dans les bas-marais tourbeux. Enfin les mardelles, qui sont de petites zones humides situées sur des plateaux, ont aussi fait l'objet d'études de pollens et de microfossiles non-polliniques (NPP), notamment en Lorraine (Étienne 2011) et au pied du Morvan (Jouffroy-Bapicot 2010). La sédimentogenèse de ces différentes zones humides est bien différente. La résolution chronologique des séquences est fonction de plusieurs paramètres : taux de sédimentation, pas d'échantillonnage et taille variable du réceptacle permettant des restitutions de la végétation locale (mardelles) ou plus régionales (zones humides alluviales). L'enregistrement est d'une précision chronologique généralement faible car le taux de sédimentation est souvent très bas, inférieur à 0,1 mm/an soit 1 cm/siècle dans le bas marais de Fenay (Laine *et al.* 2010). Le remplissage du paléochenal de Neublans, qui couvre toute la période gallo-romaine et le Haut Moyen Âge, présente un taux de sédimentation exceptionnel qui atteint 0,8 mm/an, permettant ainsi une reconstitution de l'évolution de la végétation avec un pas de résolution chronologique décennal (Gauthier 2000 ; Vannière *et al.* 2003).

L'ensemble des données recueillies permet de proposer une valeur moyenne de l'indice %AP pour deux siècles⁷⁴. Nous avons comparé les valeurs de cet indice des cinq périodes chronologiques successives couvrant un millénaire, entre 400 a.C et 600 p.C.⁷⁵ (fig. 20).

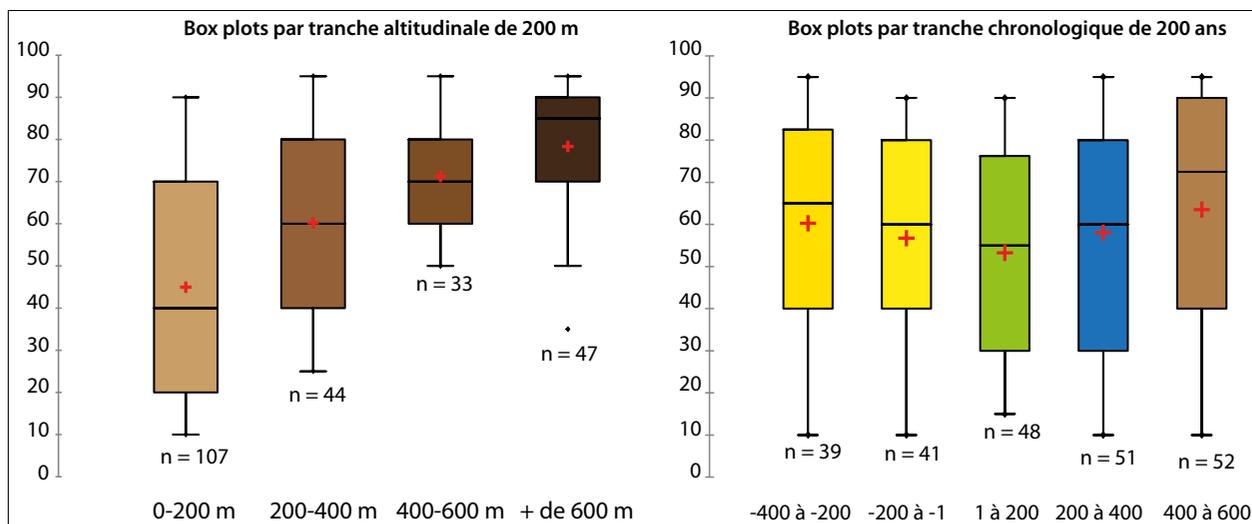


Fig. 20. Évolution de la répartition du pourcentage de pollens d'arbres (%AP), (A) en fonction de l'altitude et (B) en fonction de la chronologie.

72. Les activités de rouissage, de battage de céréales, etc., peuvent être identifiées par la forte proportion de pollens de végétaux qui ont fait l'objet de traitement, dans ou à proximité des structures analysées (par exemple, Magny & Richard 1990 ; Boulen 2013).

73. Dans les paysages largement déboisés, l'indice %AP peut être surestimé si le point de forage est très proche d'aulnes ou de saules. Dans les environnements très ouverts, l'apport de pollens lointains, comme ceux du pin, peut également augmenter la valeur de cet indice.

74. Valeur issue d'un ou de plusieurs échantillons dont la moyenne a été calculée.

75. Les pas chronologiques retenus : 400-200 a.C., 200-1 a.C. ; 1-200, 200-400 et 400-600 p.C. (annexe 2).

Des dynamiques différentes d'ouverture du milieu en fonction des conditions climatotopographiques

À l'échelle de la zone d'étude, l'analyse des 231 valeurs est présentée en fonction des conditions édaphiques⁷⁶ qui caractérisent les différents forages analysés (fig. 20)⁷⁷. Les données sont regroupées suivant trois grands ensembles climatotopographiques :

- les zones de basse altitude, inférieures à 300 m, bas-plateaux et plaines alluviales (plateau d'Île-de-France, vallée de la Seine, plaine de Bresse, basse vallée du Rhin).
- les zones de plateaux et de collines entre 300 et 600 m d'altitude (Nord du Morvan, Allemagne, Lorraine).
- les zones de moyenne montagne, au-delà de 600 m d'altitude (Jura, Morvan, Vosges, Ardennes).

L'ouverture du milieu⁷⁸ pour l'ensemble de la période retenue (fig. 21) est sous contrôle altitudinal. L'altitude est en effet le premier facteur explicatif du ratio AP/NAP (55 %) (fig. 21) : il y a d'autant plus de pollens d'arbres dans les spectres palynologiques que l'échantillon est prélevé en altitude (fig. 22). Cela indique qu'il y avait globalement plus d'arbres en altitude qu'en plaine et que le milieu était plus fermé en altitude qu'en plaine. De plus, la variabilité du ratio AP/NAP (hauteur des *box plots*) diminue avec l'altitude. La chronologie a ici un faible pouvoir explicatif.

Pour les dix sites d'altitude supérieure à 600 m dans le Haut-Jura et le Haut-Morvan, le paysage reste très boisé tout au long de la séquence chronologique⁷⁹, comme cela a déjà été constaté (Jouffroy-Bapicot *et al.* 2013). L'ouverture du paysage, peu importante, est toutefois plus marquée pour l'époque romaine que pour les époques antérieures ou postérieures. La large ouverture du paysage observée dans la tourbière des Sources de l'Yonne, qui apparaît comme un résultat exceptionnel⁸⁰, est le reflet du développement de Bibracte et de la présence d'une agglomération de plus de 20 ha, située sur les versants dominant immédiatement cette zone humide, probablement aménagée (Moore *et al.* 2013).

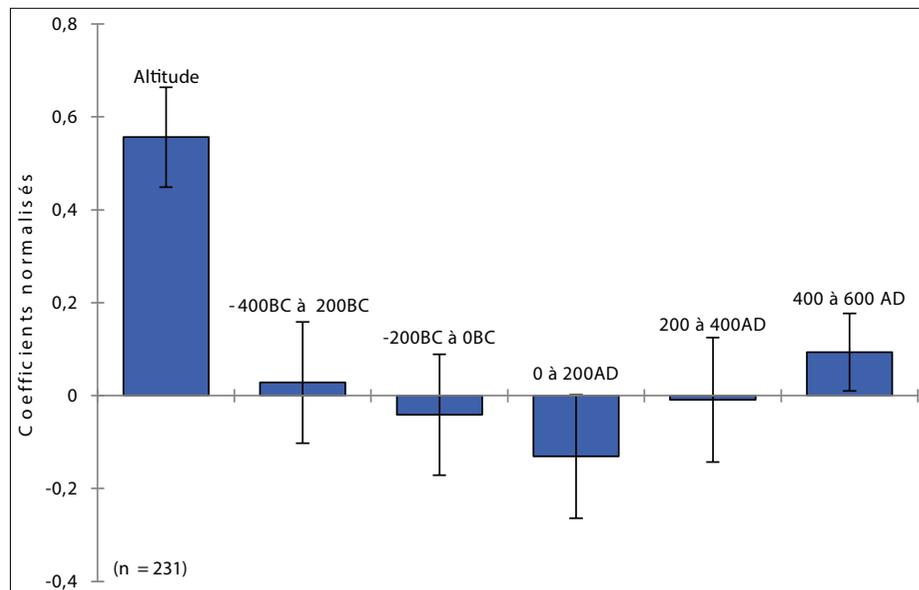


Fig. 21. Coefficients de corrélation entre le ratio AP/NAP, l'altitude et la datation des échantillons palynologiques. L'altitude est le principal facteur explicatif pour AP/NAP ($R^2=55\%$) ; indépendamment de l'altitude, les 1^{er} et 1^{er} siècles marquent un recul des pollens arboricoles alors que les 5^e et 6^e siècles voient leur retour.

76. Climat, altitude et type de substrat déterminant le type de végétation et les modalités potentielles d'exploitations agro-pastorales.

77. Toutes les séquences analysées ne couvrant pas l'ensemble du millénaire, certaines valeurs du %AP n'ont pas pu être calculées (annexe 2).

78. %AP calculé pour 231 échantillons, issus sur 55 séquences. Moyenne générale de 58,4%, avec une variance importante puisque la valeur de %AP varie de 10 (milieu totalement ouvert) à 95 % (milieu complètement fermé, forestier) (annexe 2).

79. Premier quartile jamais inférieur à 65 % et l'amplitude de variation est faible.

80. AP de 35 %.

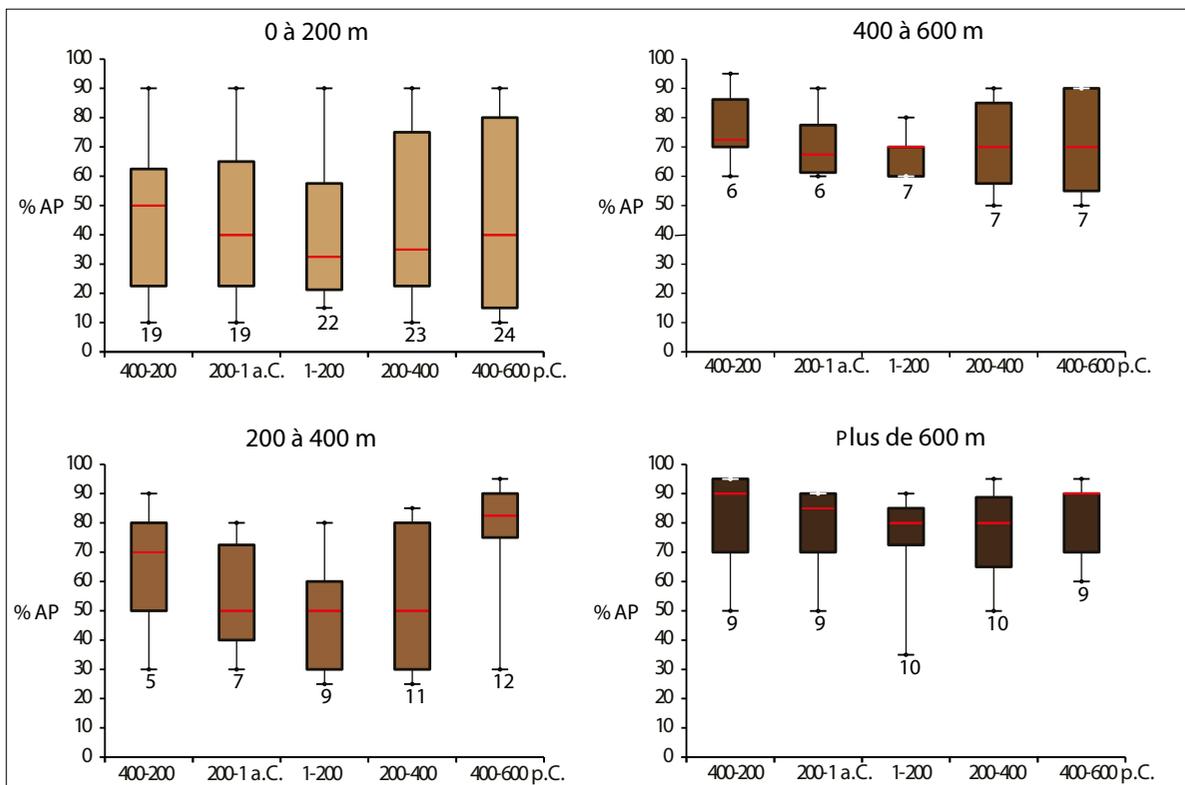


Fig. 22. Indicateur de l'ouverture du milieu à l'échelle de la zone étudiée. Évolution chronologique de la variabilité du pourcentage de pollens d'arbres (AP%) par groupes de séquences regroupées par classes d'altitude (valeur moyenne en rouge).

Sur les dix-sept sites installés à des altitudes comprises entre 400 et 600 m dans le Jura, sur les plateaux du nord du Morvan, le paysage s'est ouvert progressivement durant la période de La Tène. Le paysage était le plus ouvert durant le Haut-Empire⁸¹, puis les situations ont été contrastées pendant le Bas-Empire⁸² : certains lieux sont redevenus forestiers (Clairvaux, dans le Jura ; Champ-Gazon, dans le Morvan) alors que d'autres sites morvandiaux (Nataloup, Vernis-des-Brulons) sont restés liés aux activités agro-pastorales (Jouffroy-Bapicot 2014).

Sur la dizaine de sites implantés sur les plateaux de moyenne altitude, entre 200 et 400 m, on observe la plus grande variation d'ouverture du milieu durant le millénaire analysé. Le paysage s'est ouvert progressivement durant La Tène et a atteint son ouverture maximale durant le Haut-Empire⁸³. La situation était très contrastée durant le Bas-Empire : certains sites se sont reboisés (Prémery dans le Morvan ; les mardelles de Saint-Jean et de Sarrebourg en Lorraine) alors que le paysage à proximité de la mardelle de Fallberg s'est ouvert, car celle-ci se situait à cette période à proximité d'un site nouvellement implanté (Étienne 2011, 114). Pour la période de 400 à 600 p.C., la couverture forestière est devenue très importante⁸⁴, à l'exception du site de Fenay, dont le paysage était largement ouvert dans la plaine dijonnaise.

Les paysages végétaux des 26 sites de plaine sont très variés : certains sont largement forestiers alors que d'autres sont très largement déboisés⁸⁵. Le paysage était déjà très agricole dès l'époque laténienne et une reforestation de certains sites s'est opérée au cours du Bas-Empire et du Haut Moyen Âge.

81. AP moyen de 67 % et médian de 70 % de 400 à 600 m et AP moyen de 74 % et médian de 80 % à plus de 600 m.

82. Forte variance.

83. Médiane de 50 % pour la période 1-200 p.C.

84. AP% moyen entre 75 et 80 %. Par exemple, le Meerfelder Maar en Allemagne) ou le site de Prémery (Morvan) restent largement forestiers.

85. Variance importante du %AP.

Évolution de l'ouverture du milieu de 400 a.C à 600 p.C.

Au cours de la Tène, l'ouverture du milieu a été progressive (fig. 21)⁸⁶. Aucun reboisement n'est identifié entre la Tène et le Haut-Empire, période d'ouverture maximale⁸⁷, notamment en plaine, dans le bassin amont de la Seine (Vix, Molesme) et dans la plaine dijonnaise. Sur les plateaux, cette ouverture est perceptible autour des mardelles en Lorraine et dans le Jura, à proximité du sanctuaire de Pont des Arches à Villards-d'Héria (Lac d'Antre) et sur le premier plateau (à Clairvaux), dans le Morvan à Champ-Gazon. La seule légère fermeture connue est celle de la mardelle de Romersberg en Lorraine.

Entre le Haut-Empire et le Bas-Empire, la dynamique paysagère était variée selon les secteurs. Dans le Morvan, la situation était contrastée : à Montbé et au Grand-Montarnu, le paysage boisé jusqu'à cette date tardive s'ouvrait, alors que, le paysage se refermait déjà aux Sources de l'Yonne, à Prémery et à Champ-Gazon comme autour de certaines mardelles de Lorraine (Bisping, Sarrebourg et Saint-Jean). Le paléochenal de Neublans enregistre une fermeture importante du paysage au cours du Bas-Empire mais son interprétation est toujours discutée : représentativité très locale indiquant que le versant dominant ce paléochenal était reboisé, ou marqueur d'une déprise agricole et d'un dépeuplement plus général dans la plaine du Doubs ? La précision chronologique des données archéologiques fait encore défaut pour définir l'échelle de ce phénomène.

Au cours des v^e et vi^e siècles p.C, une très forte reforestation est documentée dans l'est de la France. Elle est très importante dans le Jura (Lac d'Antre, lac de Clairvaux, Censeau, Beuffarde), sur les plateaux bourguignons (plaines de Vix et de Molesme) et lorrains (Bisping, Sarrebourg et Saint-Jean). En Bresse (Mou-de-Pleure), le paysage encore ouvert durant l'Antiquité tardive s'est refermé. Mais, à Neublans, le paysage, fermé à cette époque, s'est rouvert. Dans le Morvan, la reforestation est quasi-complète aux Sources de l'Yonne, le milieu se referme à Montbé, et Grand-Montarnu ; en revanche, à Nataloup, et probablement au Vernis des Brulons (?), le paysage a continué de s'ouvrir. En revanche, dans la région francilienne, les situations étaient très contrastées ; certains sites sont boisés (Fontainebleau) alors que d'autres restent très ouverts⁸⁸.

On peut donc conclure que :

- les zones de basse altitude étaient largement défrichées durant le second âge du Fer ;
- les défrichements du Haut-Empire ont affecté les zones de moyenne altitude ;
- les zones d'altitude supérieure à 400 m n'ont jamais fait l'objet de défrichements importants durant ce millénaire ;
- la déprise agricole du Bas-Empire est peu marquée et d'extension locale ;
- une reforestation générale s'est opérée après le iv^e siècle p.C. pour les zones de plateaux d'altitude supérieure à 200 m alors que, dans les plaines, la situation fut plus contrastée (fig. 22).

La forêt romaine sous les forêts actuelles ?

Les relevés Lidar permettent de cartographier, de manière continue et sur plusieurs dizaines ou centaines d'hectares, d'anciens habitats et parcellaires conservés sous forêt, grâce à l'observation d'anomalies micro-topographiques (terrasses, talus, excavations, buttes, murs), disséminées en sous-bois, matérialisent des structures archéologiques (Doneus *et al.* 2008 ; infra, chap. 7). Ces structures doivent d'abord être cartographiées pour qu'on puisse, dans un second temps, reconnaître leur fonction et leur chronologie (Dardignac & Lejeune 2016), ce qui permet de documenter les modes et les temps d'exploitation du territoire⁸⁹. En effet, sur la base d'un raisonnement régressif (Robert *et al.* 2011), nourri par les données disponibles (historiques et archéologiques), le plan figurant le continuum des structures peut être fragmenté en différentes zones correspondant à autant de moments d'utilisation de l'espace. Une grande partie de ces ensembles semble pouvoir être attribuée à la période

86. Diminution de la moyenne du %AP d'environ 10 %.

87. AP moyen de 39 % pour la période 1-200 p.C.

88. Par exemple, mares des forêts franciliennes (Sénart, Dourdan).

89. La fenêtre d'étude, c'est-à-dire la portion du Lidar qui documente la partie "forêt ancienne" du Châtillonnais mesure 186,6 km². Cela représente environ 0,6 % du territoire de la cité lingone.

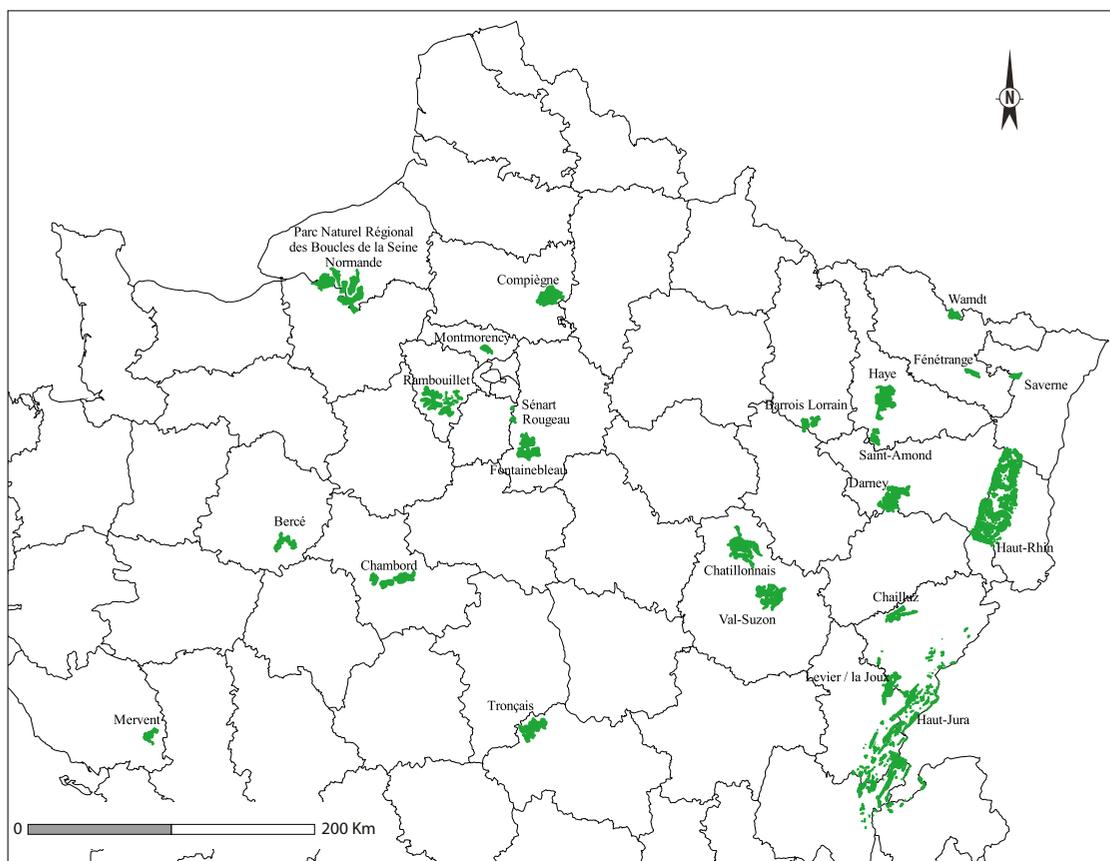


Fig. 23. Carte des couvertures Lidar des forêts anciennes françaises (© A. Giosa 2018).

gallo-romaine, si l'on en croit l'exemple des forêts du Châtillonnais et du plateau de Haye (infra, chap. 7). Leurs vestiges sont particulièrement bien conservés dans les portions anciennes des forêts (Vallauri *et al.* 2012).

En extrapolant par hypothèse ces données à l'ensemble de la France contemporaine, 15,6 % du Bassin parisien et 13 % du territoire métropolitain pourraient fournir des cartes archéologiques comparables (fig. 23). L'archéologie sous forêt fournirait alors un échantillonnage spatial appréciable, d'une surface très largement supérieure à celle de l'archéologie préventive.

En Île-de-France, la plupart des grandes forêts domaniales, longtemps dédiées aux chasses royales et aristocratiques, ont sans doute été mises en réserve par le pouvoir royal au Haut Moyen Âge (vol. 1, chap. 10 ; Hennebicque 1979). On aurait pu penser que ces forêts n'avaient jamais fait l'objet de mise en valeur agricole car elles sont implantées fréquemment sur des sols podzoliques très sableux des grès stampiens. Les prospections menées dans ces forêts royales montrent pourtant qu'elles ont, en réalité, fait l'objet de mises en culture à des périodes plus anciennes, à Fontainebleau (Seine-et-Marne)⁹⁰, Compiègne (Oise) (Horen *et al.* 2015), Rambouillet (Yvelines) (Vigneau 2007). Les autres forêts franciliennes préservent également de denses réseaux parcellaires à Ferrières (Seine-et-Marne) (David 2010), Sénart (Essonne) (David 2012). La forêt de Montmorency (Val-d'Oise) semble faire exception, puisque peu de structures agraires y ont été identifiées (Trouvé & David 2015). En complément des informations issues des grands décapages de fouilles préventives réalisées sur des sols difficiles à mettre en valeur (Ouzoulias 2014), on peut affirmer que tous les sols, quel que soit leur potentiel agronomique, ont été mis en valeur en Île-de-France car la pression agro-pastorale devait être très forte durant la période gallo-romaine et les massifs forestiers, d'extension plus limitée qu'aujourd'hui.

90. Nous remercions C. Dardignac et S. David pour la communication de ces données inédites.

Dans les méandres de la basse vallée de la Seine, les massifs forestiers actuels étaient largement défrichés et exploités durant l'antiquité sur une bande de plus de 500 m autour des voies romaines (vol. 1, chap. 6 ; Spiesser 2018). Seuls les sols podzoliques sur lesquels s'implantait un sanctuaire étaient alors boisés (vol. 1, chap. 6).

Les sols des plateaux calcaires de la bordure occidentale du bassin parisien sont peu fertiles ; ils ont cependant largement été mis en culture à l'époque romaine en Lorraine (vol. 1, chap. 12) et dans le Châtillonnais (vol. 1, chap. 16). Dans la forêt domaniale de Châtillon (Côte-d'Or), on peut identifier quelques bosquets (moins de 200 ha) isolés au sein du parcellaire et un massif boisé de 2000 ha sur une croupe difficile d'accès. Ces plateaux exploités durant le Haut-Empire semblent avoir été désertés dès le Bas-Empire.

En revanche, les massifs forestiers d'altitude, très éloignés des centres urbains, ne recèlent pas de réseaux parcellaires de grande extension. Dans le secteur de marge que constitue la Vôge, plateau gréseux entre Lingons et Leuques, la couverture Lidar montre clairement une large voie romaine qui relie les deux bassins versants de la Saône et de la Moselle⁹¹. L'un des itinéraires de portage entre Corre-Ecle-Portieux passant par le sanctuaire de la Pille est une voie rectiligne clairement reconnue sur le relevé Lidar mais elle n'est bordée par aucun établissement rural. Entre Besançon et la haute chaîne, le massif jurassien apparaît peu occupé si l'on en croit les inventaires archéologiques (Nouvel & Cramatte 2013 ; vol. 1, chap. 14). L'analyse des récentes couvertures Lidar confirme que, même le long de la grande voie romaine transjurassienne passant par Pontarlier, peu d'établissements ruraux sont identifiés (Bichet *et al.* 2017 ; à paraître). Si les établissements ruraux d'époque romaine semblent peu nombreux dans le haut Jura, cette zone apparaît au contraire comme un pôle de peuplement de premier ordre durant la Protohistoire et le Haut Moyen Âge (Passard-Urlacher *et al.* 2015).

Les fenêtres d'observation continues du paysage romain fossilisé sous forêt confirment :

- la présence de massifs forestiers gallo-romains dans les secteurs de montagne (Vosges, Jura) ;
- une mise en culture sur des plateaux de moyenne altitude (Châtillonnais, Lorraine) et à faible potentiel agricole, avec des défrichements antiques quasi-systématiques ;
- à basse altitude une exploitation de tous les milieux, y compris les zones de sols difficiles à mettre en valeur, trop lourds, ou très peu fertiles. C'est une gestion cynégétique puis sylvicole des espaces à l'époque médiévale et moderne qui a permis une fossilisation de paysages agraires romains sous les grands massifs forestiers actuels.

LES VARIATIONS CLIMATIQUES DURANT L'ANTIQUITÉ EN GAULE DU NORD (CP)

Variabilités spatiales et temporelles du climat

La réalité du climat se décline en fonction des facteurs qui le constituent (température, précipitation, vent, etc.), dans une grande variété d'échelles temporelles et spatiales avec des incidences spécifiques sur les activités humaines et en particulier les activités agro-pastorales. La zone méditerranéenne étant bien différente en cela du climat de l'Europe moyenne, la romanisation des campagnes de la Gaule du nord ne peut pas se comparer aisément avec celles d'Italie ou de Narbonnaise (fig. 24). À l'échelle de notre secteur d'étude, trois grands types de climats sont distingués (océanique, continental et montagnard), qui peuvent ensuite être nuancés. La façade littorale de la Manche et de la Mer du nord est affectée d'un climat océanique franc, océanique altéré sur sa bordure orientale. Plus à l'intérieur des terres, la transition vers des formes dégradées suit un gradient de continentalisation croissante, faible d'abord avec le Bassin parisien, puis plus marqué vers l'est, à mesure que la température moyenne s'abaisse et que le jeu des saisons devient contrasté (fig. 25a et b, tab. 1).

Les variabilités temporelles du climat résultent de la combinaison de fluctuations de fréquences différentes, plurimillénaires, centennales et annuelles.

91. Nous remercions P. Fetet et J.-J. Gaffiot pour la communication de données inédites.

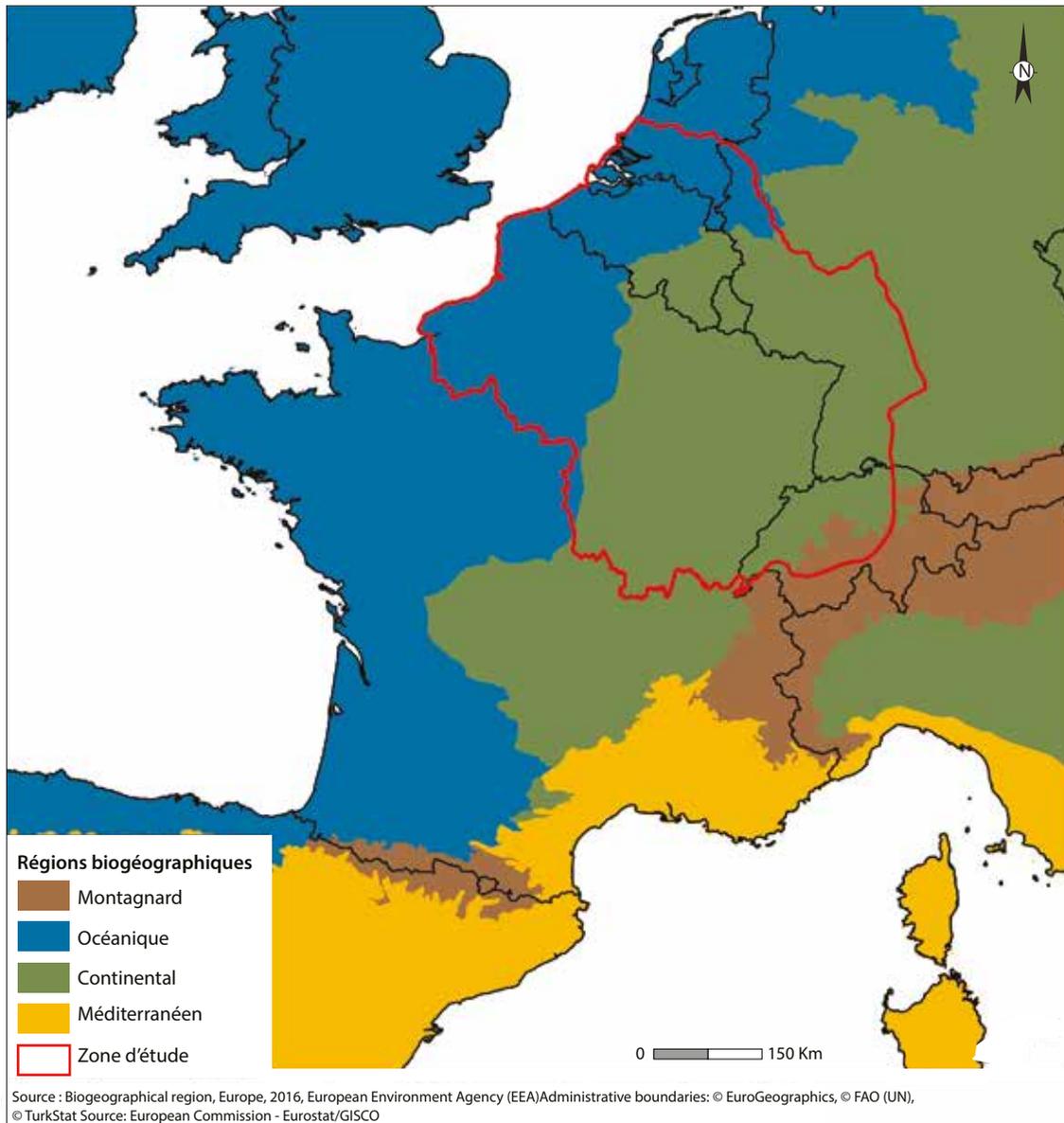


Fig. 24. Les régions biogéoclimatiques (Source : European Environment Agency, 2016 ; © E. Camizuli 2018).

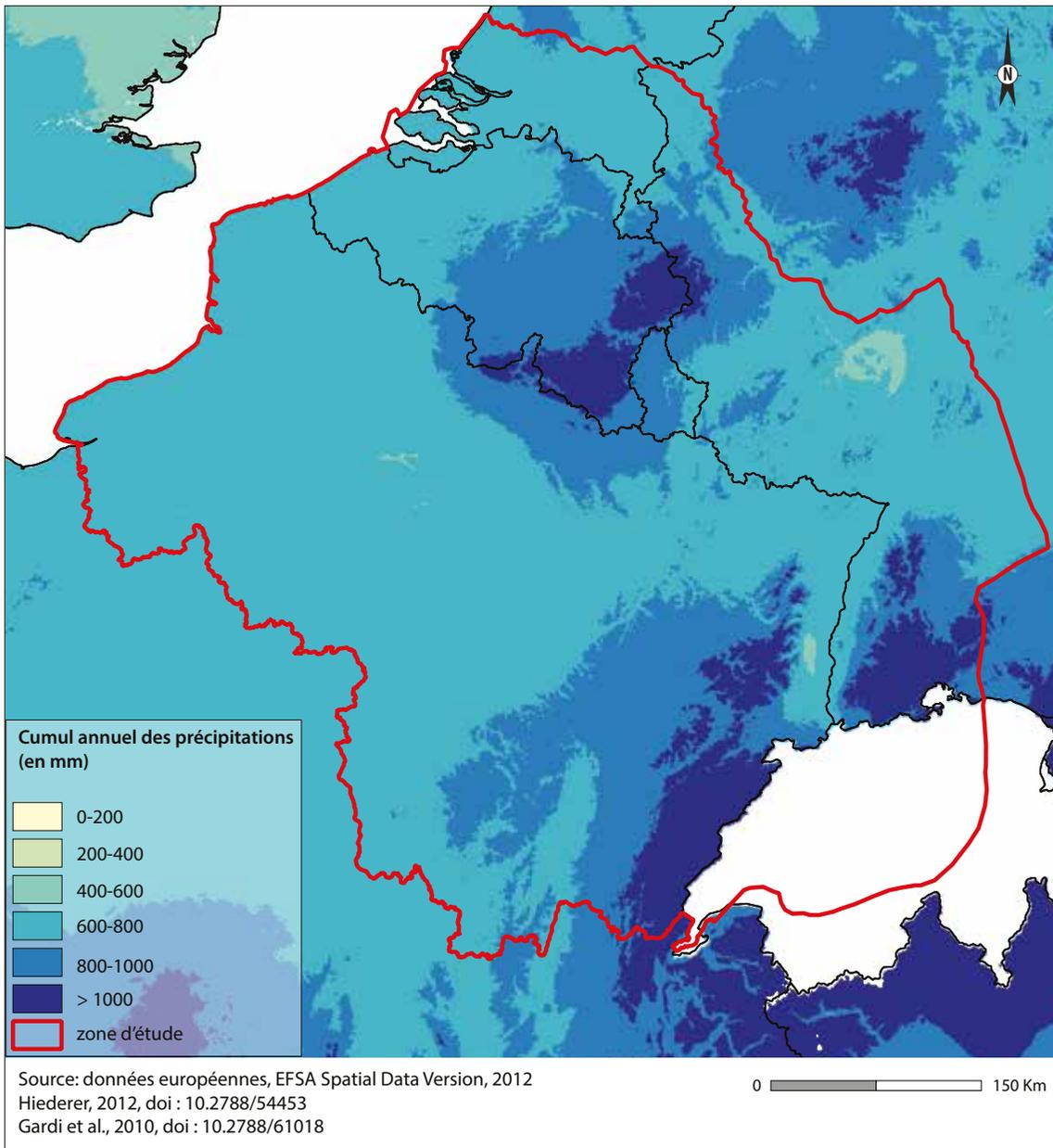
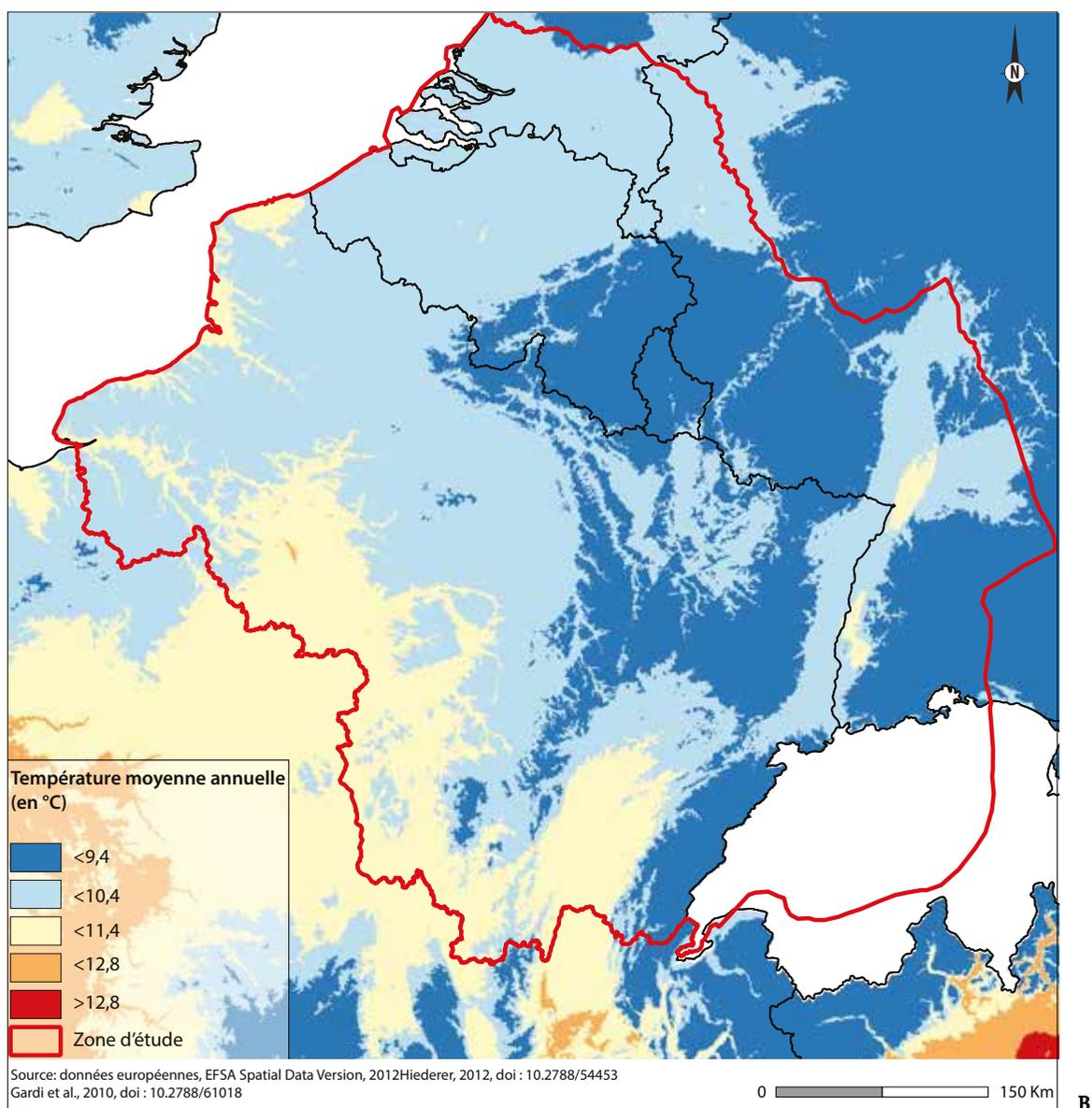


Fig. 25. Précipitations (A) et températures (B) moyennes annuelles dans la zone étudiée (Source : Hiederer 2012 ; Gardi *et al.* 2010 ; © E. Camizuli 2018).



B

Type de climat	Température moyenne annuelle (°C)	Nombre de jours T° < 5°C	Nombre de jours T° > 30°C	Précipitation moyenne annuelle (mm)	Régions
Montagnard (type 1)	< 9,4	> 25	< 4	> 1150	Massif du Jura, Ardennes, Vosges, Forêt Noire, Morvan
Semi-continentale (type 2)	< 10,4	< 25	< 9	< 1150	Seuil de Bourgogne (Plateau de Langres), Lorraine, Alsace,
Océanique dégradé (type 3)	< 11,4	< 14	< 15	< 710	Centre du Bassin Parisien (Normandie, Picardie, Champagne) Dépression péri-morvandelle Plaine de Saône Flandres
Océanique franc et altéré (type 4)	< 10,4	< 8	< 4	< 940	Bordure d'environ 100 km bordant la Manche

Tab. 1. Grandes catégories de climat (adapté de Joly *et al.* 2010).

Depuis l'optimum climatique que l'on peut placer au Néolithique, la tendance climatique holocène globale sous l'influence des paramètres orbitaux de la Terre est au refroidissement, avec, pour une latitude de 60° N, une insolation⁹² qui atteignait 520 W.m⁻² vers 7000 a.C. pour n'être plus que de 480 W.m⁻² depuis l'époque antique (Berger & Loutre 1991) (fig. 26). À cette tendance générale, s'ajoutent des fluctuations climatiques plus rapides, millénaires, séculaires, pluriannuelles, sans parler du réchauffement climatique des derniers siècles, dit de l'Anthropocène, lié aux activités anthropiques contemporaines.

Les variations climatiques reconnues pour le nord de la Gaule sont issues principalement de l'analyse des variations des glaciers d'altitude, des niveaux lacustres, des fluctuations du régime des rivières et des données dendrochronologiques.

Les variations climatiques pluri-décennales du climat

Avancées et reculs des glaciers

Les fluctuations des langues glaciaires alpines permettent de mettre en évidence des fluctuations séculaires du climat et sont parfois très bien datées, comme c'est le cas pour le glacier d'Aletsch (Holzhauser 2009) ou celui de la Mer de Glace (Le Roy *et al.* 2015) (fig. 26C). Les glaciers avançaient entre 1000 et 600 a.C. et entre 500 et 600 p.C. : ils atteignent des tailles presque aussi importantes que celle du Petit Âge Glaciaire. Ces avancées⁹³ sont corrélées aux principales variations de l'énergie solaire, enregistrées par les fluctuations du radiocarbone atmosphérique (Holzhauser *et al.* 2005 ; Le Roy *et al.* 2015). Entre 200 a.C. et 50 p.C., les langues glaciaires avaient la même taille ou une taille plus courte qu'aujourd'hui⁹⁴. De 300 a.C. à 200 p.C., aucune avancée glaciaire n'a été repérée dans les Alpes. L'étude précise du glacier d'Aletsch permet d'identifier une avancée glaciaire au cours de l'époque romaine dont le maximum, daté de 272 p.C., est comparable à la position qu'il occupait en 1982 p.C. Après ce court épisode, vers 350 p.C., le glacier aurait reculé de quelques centaines de mètres, pour ré-avancer dès le début du V^e siècle p.C. avec un fort dynamisme, montrant une première pulsation vers 430 p.C. et un maximum d'extension vers 600 p.C. où le glacier atteignit la taille de ceux du Petit Âge Glaciaire (Holzhauser *et al.* 2005, fig. 2 ; Le Roy *et al.* 2015).

Les fluctuations des niveaux lacustres du Jura

La synthèse des fluctuations des niveaux des lacs jurassiens a permis d'identifier des épisodes de haut niveau alternant avec des épisodes de bas niveau durant l'Holocène (Magny 2004 ; 2013) (fig. 26D). Le niveau d'eau de chaque lac est influencé par le bilan d'évapotranspiration du bassin versant lacustre. Les phases de hauts niveaux lacustres s'expliquent par l'augmentation des précipitations annuelles, la température moyenne décroissante du mois le plus chaud, et un refroidissement et/ou le raccourcissement de la saison de croissance. Ces résultats sont compatibles avec les analogues modernes et montrent que les hauts niveaux lacustres observés dans le Jura sont synchrones des refroidissements reconnus dans les Alpes (Haas *et al.* 1998 ; Magny 2004).

Ces fluctuations lacustres, parallèles aux fluctuations du radiocarbone atmosphérique (Stuiver *et al.* 1998 ; McCormick *et al.* 2012) (fig. 26B), indiquent qu'elles sont sous le contrôle dominant des activités solaires : les hauts niveaux lacustres correspondent à des périodes de faibles radiations solaires correspondant, sous nos latitudes, au développement de conditions climatiques plus fraîches et plus humides (Magny *et al.* 2013). Les principales dégradations, celle du Hallstatt et celle du Petit Âge Glaciaire, semblent clairement associées à des changements dans la circulation polaire (débâcles d'iceberg). La circulation atmosphérique, dite oscillation nord-atlantique (NAO), influence le climat européen : quand la NAO est positive, l'anticyclone des Açores est fort et les dépressions passent au nord de l'Europe ; quand la NAO est négative, les vents d'ouest atteignent l'Europe moyenne et notre secteur d'étude est plus humide. À l'échelle de l'Europe, depuis 2000 a.C., la Scandinavie, comme le sud de l'Europe montrent des indices d'assèchement alors que, dans le Jura, le niveau des lacs est plus haut, témoignant de conditions plus humides. Pour la période romaine, le climat dans notre zone d'étude était relativement plus humide qu'en Italie du Sud et qu'en Scandinavie (Magny 2004 ; 2013).

92. Elle est mesurée en unité de puissance, le Watt, par unité de surface ici en W.m⁻².

93. Pulsation de Goschenen-1 et de Goeshenen-2.

94. Vers l'an 2000 p.C.

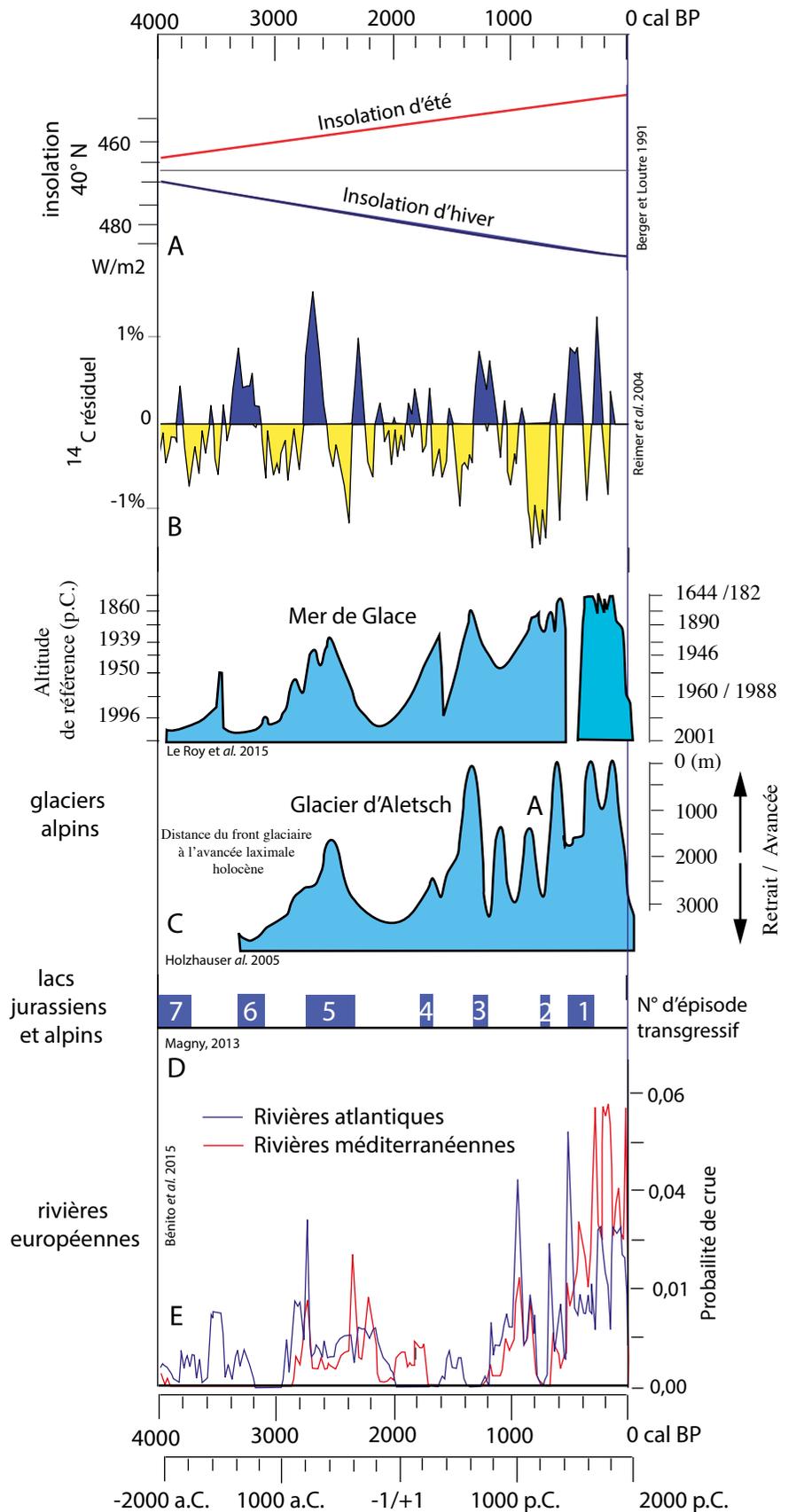


Fig. 26. Variabilités environnementales séculaires à millénaires pour les quatre derniers millénaires. Réponses des glaciers alpins (C) (Le Roy *et al.* 2015 pour la Mer de Glace, et glacier d'Aletsch (Holzhauser *et al.* 2005), des lacs jurassiens (D) (Magny 2013) et des rivières européennes (E) (Benito *et al.* 2015) aux fluctuations astronomiques (A) (insolation, Berger & Loutre 1991) et solaires (B).

L'épisode 5, dit du Bourget, entre 800 et 400 a.C., correspond à la dégradation climatique qui est reliée à l'augmentation du radiocarbone atmosphérique (Magny 1999). L'épisode 3, dit du Petit-Maclu-2, est attribué à la période de 350 à 850 p.C. (Magny 2004 ; 2013) et est corrélé avec la dégradation climatique de l'Antiquité tardive. Ces deux épisodes correspondent à des phases de péjoration climatique enregistrées par de hauts niveaux lacustres dans de nombreux lacs jurassiens et alpins. En outre, durant ces deux périodes, aucun bas niveau lacustre n'a été repéré dans les carottages littoraux des lacs (Magny 2004).

Les données pour la période romaine sont peu nombreuses ou mal caractérisées. Dans la région lyonnaise, le lac de Paladru, situé à basse altitude, présente une certaine stabilité tout au long de l'époque romaine (Brochier *et al.* 2007). Pour les lacs du massif du Jura, durant la période qui va de 400 a.C. à 700 p.C., les variations des hauteurs d'eau des lacs sont relativement peu nombreuses, soit 9 pour les 23 lacs analysés (Magny 2004 ; 2013). Dans les lacs de Morat (Suisse), Paladru, Clairvaux, Genin, Ilay, Petit-Clairvaux, Petit Maclu, Pluis et Cerin, l'identification de 20 niveaux de lac, haut ou bas, ont été datés par radiocarbone. La majorité des lacs (7/10) présente des niveaux bas, témoignant d'un bilan hydrique déficitaire, donc représentatif d'un climat plutôt sec et chaud. Seuls trois hauts niveaux lacustres ont pu être identifiés et approximativement datés puisque les dates présentées sont associées à une incertitude de plus ou moins un siècle environ :

- l'un, daté du milieu du III^e siècle p.C. au lac du Petit Maclu ;
- le second, daté du milieu du IV^e siècle p.C. au lac de Cerin ;
- le dernier est repéré au lac de Petit Clairvaux, vers le milieu du VII^e siècle p.C.

Ces hauts niveaux lacustres jurassiens ne semblent pas durer longtemps et il est encore difficile, malgré l'analyse de nombreuses séquences lacustres, de mettre en évidence des périodes de dégradations importantes durant l'époque romaine. L'épisode dit du Petit Maclu-1 qui est daté de c. 150 a.C.-250 p.C.⁹⁵ est une réponse peu marquée aux changements dans les circulations atmosphériques engendrées par la faible amplitude de la fluctuation du radiocarbone atmosphérique ; il reste isolé et mal calé chronologiquement. Ces fluctuations, repérées seulement dans de rares lacs, peuvent être également le reflet du fonctionnement spécifique du lac et de son bassin-versant, selon que celui-ci a été plus ou moins mis en culture.

Les enregistrements fluviaux

Les données issues du dépouillement des archives fluviales ne sont pas plus faciles à interpréter en termes de climat (fig. 26E). Mais un changement dans les précipitations et les températures a un effet systémique sur les bassins fluviaux, influençant le volume d'eau, la forme des chenaux et la saisonnalité des flux. Pour le xx^e siècle, il a été démontré qu'une augmentation de la température de 1°C, pouvait réduire le volume d'eau ruisselé de 15 %, réaction causée par une augmentation de l'évapotranspiration et une diminution de la pluviométrie (Hurkmans *et al.* 2010, 679). Des températures estivales plus hautes augmentent le risque de sécheresse ; une baisse des précipitations annuelles diminue l'érosion des versants et l'apport détritique aux rivières. À l'inverse, une diminution de 1°C de température, qui s'accompagne d'une augmentation des précipitations annuelles, augmente le volume d'eau atteignant les rivières, ce qui accroît la probabilité d'inondation, en particulier au printemps et à l'automne : les plaines alluviales sont engraisées de limons et les chenaux méandrisent davantage (Macklin *et al.* 2012). Ces fluctuations climatiques sont sous le contrôle de l'augmentation de la radiation solaire et des changements atmosphériques (Benito *et al.* 2015) (fig. 26E). Pour les rivières du pourtour méditerranéen, les crues étaient plus fréquentes à l'ouest de la Méditerranée entre 100 a.C. et 100 p.C., alors que, dans le bassin oriental, elles surviennent préférentiellement entre 100 p.C. et 400 p.C. Les données issues des travaux des géomorphologues qui ont analysé les archives sédimentaires alluviales de Grande-Bretagne et celles du bassin versant du Rhône, permettent de déterminer le contrôle climatique sur le régime des rivières européennes (Benito *et al.* 2015).

Pour la Grande-Bretagne, des périodes de forte activité fluviale sont identifiables, en particulier entre 350 et 150 a.C. puis entre 450 et 500 p.C. Elles coïncident globalement avec des périodes froides et humides (Macklin *et al.* 2005). De plus, l'impact anthropique sur la dynamique des rivières a été particulièrement important durant l'époque médiévale (Macklin *et*

95. Date radiocarbone calibrée : 1800-1700 cal BP.

al. 2010). Dans le nord de l'Europe, la fréquence des crues des rivières anglaises et du Rhin a augmenté peu avant 200 a.C., et s'est poursuivie jusqu'à la fin de la période romaine.

Pour le Rhône, trois pics de probabilité de forte activité fluviale sont datés : entre 1050 et 800 a.C., entre 350 a.C. à 200 p.C. et entre 450 et 600 p.C. Cette dynamique est également celle de la Durance et des rivières du sud des Alpes et des piedmonts alpins. La fréquence de crue élevée entre 100 a.C. et 200 p.C. témoigne de conditions humides expliquant une sédimentation accrue dans les plaines alluviales (Provansal *et al.* 1999). Cette phase d'aggradation des plaines dans le bassin du Rhône, durant les I^{er}-II^e siècles p.C., a été probablement accentuée par une activité humaine et un changement dans les modes d'occupation des sols (Provansal *et al.* 2002 ; Berger 2003 ; Salvador *et al.* 2005). Les dynamiques fluviales connues entre Rhône et Alpes montrent, du II^e au IV^e siècles p.C., un régime fluvial régulier sans débit extrême, excepté une recrudescence des crues du Rhône supérieur et inférieur du I^{er} siècle a.C. au I^{er} siècle p.C. (Provansal *et al.* 1999) et plus précisément, de 50 a.C. à 100 p.C. (Salvador *et al.* 2005).

Dans le nord de la France, l'identification et la datation précise de crues sont peu nombreuses, et seules des informations ponctuelles ont été acquises sur des sites archéologiques. Une crue datée de c. 20 p.C. a détruit une partie de l'établissement rural de Molesme "Sur-les-Creux" implanté en bordure de la Laigne, affluent de la Seine (Petit *et al.* 2006). Quatre dépôts de crue datés entre 20 et 150 p.C. ont été repérés dans l'agglomération d'Oedenburg, sur le Rhin, avant que la plaine ne devienne marécageuse durant l'Antiquité tardive et le Moyen Âge (Ollive *et al.* 2006). Aux portes de Clermont-Ferrand, dans le bassin de Sarliève (Limagne, Auvergne), un marais argileux intensivement mis en culture aux époques laténienne et gallo-romaine (Trément *et al.* 2007) est largement recouvert par un dépôt de crue sableuse datée approximativement des V^e-VI^e siècles (Vernet 2013, 122). Cette crise hydrologique de l'Antiquité tardive en Auvergne est illustrée par les propos de Grégoire de Tours :

"La cinquième année du règne de Childebert II [580 p.C.], il y eut en Auvergne une inondation qui causa de grands ravages. La pluie avait duré douze jours consécutifs et la Limagne fut tellement couverte d'eau, qu'un grand nombre de cultivateurs ne purent ensemer les terres. La Loire, l'Allier et les autres affluents de ces rivières s'enflèrent tellement qu'ils franchirent les bornes qu'ils n'avaient jusque-là jamais dépassées. Il y eut une perte énorme de bétail et de moissons, et un grand nombre d'édifices furent renversés" (Greg. Tur., *Franc.*, 5.34, trad. J.J.E. Roy).

L'interprétation paléo-climatique de ces différentes archives glaciaires, lacustres et fluviales reste délicate du fait de leur imprécision chronologique, d'une représentativité encore discutable, et parce que les entités géomorphologiques analysées ont des temps de réponse plus ou moins longs en fonction de l'inertie de chacun des géosystèmes étudiés.

Variabilité climatique interannuelle

Les données dendrochronologiques

La mise en évidence de fluctuations climatiques avec une résolution plus précise que celles dont nous venons de faire l'analyse, nécessite l'exploitation des données dendro-archéologiques. Ces dernières, extraites de l'examen des bois archéologiques et naturels recueillis en France, en Allemagne et en Suisse, ont permis de reconstituer les variations annuelles de la météorologie avec une résolution annuelle (Büntgen *et al.* 2011) (fig. 27B et C). Les 2880 séquences dendrochronologiques acquises depuis plus de vingt ans en Champagne, Lorraine et Vosges, ont permis d'établir une courbe de la température moyenne de trois mois (juin-juillet-août) et de la pluviométrie cumulée des mois d'avril-mai-juin depuis les années 400 a.C. (Tegel *et al.* 2010), en se référant à la station météorologique de Nancy. Ce graphe a été élargi aux séquences allemandes et suisses afin de proposer une courbe des anomalies de température et des précipitations pour les derniers 2400 ans (Büntgen *et al.* 2016).

L'analyse permet d'identifier des événements pluviométriques extrêmes : pour la période 1-500 p.C., dans le bassin du Rhin, 89 années qualifiées de "sévèrement humides" et 201 "sévèrement sèches" ont été mises en évidence (Cook *et al.* 2015). Pour l'est de la France entre 400 a.C. et 500 p.C., on observe des années d'événement hydrologique extrême avec une fréquence particulière entre 208 et 147 a.C. ; en revanche, les épisodes de sécheresse sévère se concentrent durant la période 71 à 272 p.C. (Tegel *et al.* 2016).

Pour la période allant de 400 a.C. à 600 p.C., l'anomalie de température oscille entre -2,5°C à +1,5°C et celle de la pluviométrie va de 50 à 350 mm (fig. 27). La forte variabilité météorologique interannuelle observée peut être moyennée sur

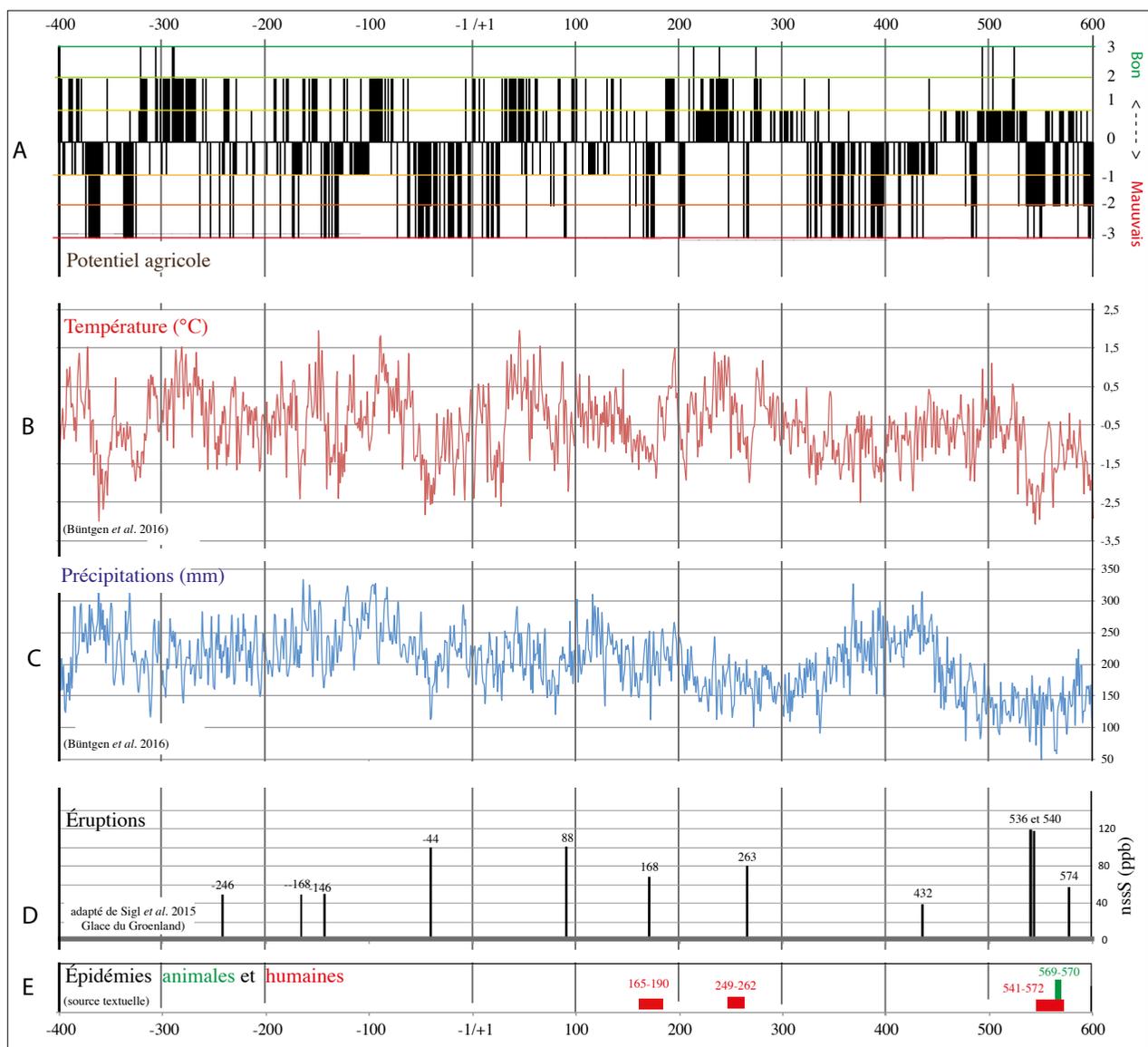


Fig. 27. Fluctuations rapides des conditions environnementales durant la période 400 a.C. à 600 p.C. A. Variabilité interannuelle du potentiel de production agricole dans le Bassin parisien, après déduction des (B) anomalies de température (mois de juin-juillet-août) et des (C) précipitations (mois d'avril-mai-juin) entre 400 a.C. et 600 p.C. (Büntgen *et al.* 2016) ; D. Périodes durant lesquelles sont repérées dans les glaces du Groenland des éruptions ayant eu une influence probable sur le climat de l'hémisphère nord (Sigl *et al.* 2015) ; E. Périodes durant laquelle des crises d'épidémies animales et humaines sont mentionnées dans les sources textuelles.

60 ans afin de faire ressortir des fluctuations pluri-décennales séculaires. La période 400-300 a.C. est fraîche (-1,5°C) et humide (200 mm). Vers 310 a.C., 100 a.C., 50 p.C., 225 p.C., les températures sont les plus chaudes (+ 0,25°C) ; par contraste, vers 350 a.C., 50 a.C., 180 p.C., les températures sont les plus basses (-1°C). De 300 p.C. à 600 p.C., le climat est différent, plus frais (-1°C) et humide (250 mm). Les précipitations sont plus élevées vers 350 a.C et 100 a.C. La période 200-300 p.C. est plus sèche (-25 mm). De 200 à 350 p.C. et de 451 à 500 p.C., la pluviométrie est faible (170 mm) alors qu'entre 1 et 200 p.C. et entre 350 et 450 p.C., la pluviométrie dépasse les 200 mm.

Les conditions climatiques de production annuelle de céréales

Ces données, recueillies au cœur de notre zone d'étude, peuvent être interprétées en termes de potentialités climatiques agricoles. La production céréalière annuelle peut en effet être estimée en fonction des valeurs de la température des mois de juin-juillet-août et de la pluviométrie des mois d'avril-mai-juin⁹⁶. La répartition statistique des valeurs des températures et de la pluviométrie montre une répartition gaussienne, centrée sur les moyennes calculées⁹⁷ (tab. 2 et 3). Nous attribuons ainsi à chacune des années un code :

- en fonction des valeurs de pluviométrie, des années extrêmement sèches (extC), très sèches (TS), sèches (S), humides (H), très humides (TH) et extrêmement humides (ExtH) ;
- en fonction des valeurs de température, des années extrêmement froides (extF), très froides (TF), froides (F), des années chaudes (C), très chaudes (TC) et extrêmement chaudes (ExtC) ;
- quand les données de pluviométrie et de température sont proches de la moyenne (soit plus de 68 % des valeurs), on peut considérer ces années comme moyennes (moyT et moyP).

Ces données climatiques permettent d'estimer des potentiels de production agro-pastorale, en particulier pour les céréales, quasi identiques à ceux de la vigne, des éléments qui caractérisent l'économie agricole gallo-romaine.

	%	P	Nombre cumulé		T	Nombre cumulé	
Min	0,00	46,88	1	Max S	-4,032	1	Max F
(-) 2 sigma	4,55%	127,23	110	Ext S	-1,903	114	Ext F
Q10	10,00	145,43	241	TS	-1,56	250	TF
(-) 1 sigma	15,87	157,29	382	S	-1,332	397	F
Moyenne	50,00	201,39	1204	P moy.	-0,487	1252	T moy.
(+) 1 sigma	84,14	245,05	2025	H	0,325	2106	C
Q90	90,00	257,08	2166	TH	0,549	2253	TC
(+) 2 sigma	94,45	271,4	2273	Ext H	0,846	2364	Ext C
Max	100,00	338,94	2407	Max S	4,008	2503	Max C
Nombre de valeur		2407			2503		
Intervalle		398 BC- 2008 AD			499BC-2013 AD		

Tab. 2. Répartition des années en fonction de la température sur un gradient froid-chaud et des précipitations sur un gradient humide-sec pour les 2,5 derniers millénaires (source Büntgen *et al.* 2016). Les classes sont définies en fonctions des caractéristiques des distributions gaussiennes (moyenne, un écart type, le quantile 10 et 90 %, deux écarts types et les valeurs maximales).

96. Les précipitations sont reconstruites pour la période 399 a.C. à 2008 p.C., soit 2407 années ; les températures pour la période 498 a.C. à 2003 p.C. soit 2503 années.

97. Précipitation moyenne de 201 mm et anomalie de température de -0,49°C par rapport à la moyenne 1970-2000 (données de Büntgen *et al.* 2011). La répartition statistique gaussienne d'une valeur signifie que la majorité des valeurs est proche de la moyenne et qu'elles sont de plus en plus rares à mesure qu'on s'éloigne de la valeur moyenne. De part et d'autre de la valeur moyenne, les valeurs d'un ou deux écart-types permettent de découper l'histogramme des fréquences (tab. 2).

	Ext F	T F	F	T moy.	C	T C	Ext. C	Total
Ext H	6	5	9	87	11	6	12	136
T H	6	5	6	70	5	6	8	106
H	6	8	8	92	9	9	8	140
P moy.	71	91	93	1142	98	67	76	1638
S	6	10	12	97	8	1	7	141
T S	9	8	7	97	3	5	2	131
Ext S	10	9	8	74	2	5	2	110
Total	114	136	143	1659	136	99	115	

Code	Conditions météorologiques expliquant le potentiel de production céréalière annuel	Nombre d'années
-3	Années extrêmement mauvaises, froides à extrêmement froides, et à précipitations moyennes à extrêmement fortes	314
-2	Années très mauvaises, froides à extrêmement froides, et sèches à extrêmement sèches	79
-1	Années mauvaises à températures moyennes, et humides à extrêmement humides	249
0	Années moyennes	1142
1	Années bonnes à températures moyennes, et sèches à extrêmement sèches	268
2	Années très bonnes chaudes à extrêmement chaudes, précipitations moyennes à extrêmement fortes	315
3	Années extrêmement bonnes chaudes à extrêmement chaudes, et sèches à extrêmement sèches	35

Tab. 3. Tableau de fréquence des années en fonction de la température sur un gradient froid- chaud et des précipitations sur un gradient humide-sec pour les 2,5 derniers millénaires (source Büntgen *et al.* 2016). L'estimation de la qualité de production potentielle climatique des récoltes de céréales est codée de -3 (extrêmement mauvaises années) à 3 (extrêmement bonnes années) en fonction des conditions annuelles de température et de pluviométrie.

Si l'on reprend les conclusions de E. Le Roy Ladurie (1960) reliant climat et récolte, on peut distinguer, d'une part, les bonnes et très bonnes années de celles qui sont mauvaises ou très mauvaises pour les récoltes céréalières. Printemps chaud, été sec, et généralement chaud, tels sont en gros, et abstraction faite de l'hiver, les facteurs climatiques qui conduisent à une bonne récolte de grain dans notre secteur d'étude et c'est l'excès de pluie qu'on doit craindre.

En fonction de la température, variable principale, modulée par la valeur de la pluviométrie, on peut alors caractériser la production céréalière climatique potentielle (PCpot)⁹⁸, suivant sept modalités⁹⁹ notées de -3 à +3 (tab. 3). On distingue pour toute la série analysée :

- les extrêmement mauvaises conditions qui correspondent aux années froides à extrêmement froides et à des conditions pluviométriques moyennes à extrêmement humides (314 années, en rouge dans le tableau, codées -3) ;
- les très mauvaises, correspondant à des années, froides à extrêmement froides, et des conditions sèches à extrêmement sèches (79 années, en orange, codées -2) ;
- les mauvaises années correspondant à des années humides¹⁰⁰ et à température moyenne (249 années, codé +1) ;

98. On réalise un tableau croisé de fréquence, combinant les répartitions des valeurs en fonction des variables température et pluviométrie.

99. Année codée de -2 (très mauvaises conditions de production) à +2, années de très bonnes conditions de récolte.

100. Années humides, très humides ou extrêmement humides.

- des années de production moyenne, de température moyenne, à pluviométrie moyenne) ou plutôt sèches¹⁰¹ (1142 années, en blanc, codé 0) ;
- les bonnes années, de température moyenne et plutôt sèches (268 années, en rose, codées +1) ;
- de très bonnes conditions, années chaudes à extrêmement chaudes et à pluviométrie moyenne à extrêmement forte (315 années, en vert moyen, codées +2) ;
- les excellentes conditions, correspondant à des années chaudes à extrêmement chaudes, sèches à extrêmement sèches (35 années, en vert foncé, codées +3).

Entre 400 a.C. et 600 p.C., le pourcentage relatif de très mauvaises, mauvaises, moyennes, bonnes et très bonnes années est le même que pour la chronique de 400 a.C. à aujourd'hui ; on peut ainsi distinguer des périodes, décennales à séculaires, plutôt favorables ou défavorables à la production céréalière. On peut identifier les crises frumentaires liées à une ou plusieurs années successives de mauvaises conditions météorologiques pour la production céréalière. On peut donc décliner l'histoire des potentialités climatiques agricoles en une suite de six périodes pluri-décennales à pluriséculaires¹⁰² (fig. 27) :

- De 399 à 366 a.C., les conditions climatiques pour la production de céréales étaient bonnes, durant des années extrêmement chaudes et humides ; aucune mauvaise année potentielle n'était à déplorer.
- De 365 à 317 a.C., la période présentait fréquemment de mauvaises années (en moyenne, plus d'une sur trois) et les bonnes conditions étaient rares (moins d'une année sur cinq). On peut repérer deux épisodes de mauvaises années agricoles, entre 365 et 351 a.C. et entre 328 à 317 a.C., durant lesquelles se succédaient de nombreuses années de très mauvaises conditions de production potentielle agricole, liées à des années très froides à extrêmement froides.
- De 316 à 57 a.C., cette période qui a duré plus de 2,5 siècles peut être considérée comme climatiquement favorable à la production agricole, avec des années à fort potentiel, entre 297 et 260 a.C., et entre 93 et 71 a.C. ; on peut noter la succession de trois années défavorables 167-165-164 a.C et une fréquence accrue d'années défavorables de 137 à 123 a.C.
- De 56 a.C. à 32 p.C. on est entré dans une période où le risque de mauvaises années est très fort ; on peut compter en effet 37 très mauvaises années¹⁰³ durant ces 86 ans, soit en moyenne plus d'une année sur trois. On identifie des successions de très mauvaises années extrêmement froides, durant une douzaine d'années consécutives (entre 47 et 35 a.C.), de quatre (entre 18 et 15 a.C.) et/ou de trois (entre 8 et 6 a.C. ; entre 2 et 4 p.C. ; entre 20 et 22 p.C.), épisodes qui ne pouvaient qu'être que catastrophiques pour le développement agricole.
- De 33 à 325 p.C., on observe une longue période favorable à la production agricole avec de nombreuses années chaudes à extrêmement chaudes, et sèches à extrêmement sèches. Les bonnes années étaient fréquentes (1/3 en moyenne). Elles se répartissent principalement par grappes, entre 35 et 68 p.C., entre 191 et 199 p.C., entre 213 et 250 p.C., et de 275 à 282 p.C. Les mauvaises années sont rares (1/5 en moyenne) et correspondaient au pire à des années froides. On peut noter les années isolées (57, 94-95, 156, 162 p.C.), les années consécutives 94-95 p.C., la décennie 169-179 p.C., puis la période entre 205 et 208 p.C., 251 p.C., et de 266 à 270 p.C.
- De 326 à 434 p.C., cette période de plus de 80 ans était caractérisée par un très fort risque de perte de production agricole avec une succession de très mauvaises années, selon une fréquence proche d'une année sur deux. On peut identifier quatre épisodes critiques, l'un¹⁰⁴ de 326 à 340 p.C., le suivant¹⁰⁵ de 349 à 360 p.C., les trois années 368 à 370 p.C. et la décennie¹⁰⁶, de 388 à 398 p.C..

101. Conditions sèches, très sèches ou extrêmement sèches.

102. Ces données sont issues d'un fichier des données des paléoclimatologues (Büntgen *et al.* 2011), qui indiquent une année "zéro" ; l'année "0" de Büntgen *et al.* équivaut à l'année "-1" des historiens ; -53 chez Büntgen *et al.* 2011 correspond à 52 a.C. pour les historiens. Nous présentons les données en fonction du calendrier des historiens (annexe 1).

103. Score de -3.

104. Épisode qui dure 15 ans, composé de six années de score -3 et deux avec un score de -2.

105. Huit années d'extrêmes mauvaises récoltes potentielles pour quatre années moyennes.

106. Huit années d'extrêmement mauvaises années (score de -3) et deux de très mauvaises conditions (score de -2) et seulement une année moyenne.

— La période de 434 à 535 p.C. était un siècle de conditions climatiques moyennes durant lequel le climat était plutôt sec, assez favorables à la production agricole, excepté quelques années très défavorables entre 483 et 487 p.C. puis quelques années très favorables (années 494, 503 et 523-524 p.C.).

— De 536 à 610 p.C., le risque climatique de mauvaises récoltes était très fort. On peut noter deux épisodes critiques entre 536 et 553 p.C., deux décennies durant lesquelles les températures étaient extrêmement basses tous les ans, puis un demi-siècle où les années très mauvaises ont été très fréquentes ; cette séquence s'est terminée par deux décennies, de 591 à 608-610 p.C. où le risque climatique de mauvaises récoltes était continuellement très fort. Cette période de fort risque frumentaire s'est terminée et le VII^e siècle a présenté des conditions de production céréalière moyennes à bonnes, avec de très rares années très défavorables. Un épisode de fort risque frumentaire n'est à signaler que durant les années consécutives de 825 à 832 p.C.

Pour conclure, les conditions climatiques de récolte céréalière dans le Bassin parisien durant l'époque romaine étaient bonnes de 32 p.C. jusqu'à 356 p.C., plus difficiles aux alentours du changement d'ère, de 56 a.C. à 31 p.C. et à partir de 326 p.C., première année du Petit Âge Glaciaire de l'Antiquité Tardive (PAG-AT) qui ne s'est pas terminé avant 610 p.C. Ce cadre climatique précis qui a déterminé le potentiel agricole de chaque année pour le Bassin parisien doit être pris en compte dans l'analyse archéologique des productions agro-pastorales. On peut noter que la période allant de la guerre des Gaules jusqu'à la fin du règne de Tibère se doublait d'une période où le risque frumentaire était élevé. Après une longue période favorable à la production agricole (de 32 à 356 p.C.), en particulier de l'épeautre, le risque frumentaire est resté important jusqu'au début du VII^e siècle p.C.

Convenons toutefois qu'il convient de se garder d'attribuer à cette analyse un caractère d'automatisme : de mauvaises récoltes peuvent se produire même dans des conditions écologiques favorables, notamment si l'on raisonne en prenant en compte des événements de portée locale ou régionale, et l'inverse est tout aussi vrai¹⁰⁷. Nous ne pouvons, en l'espèce, que déterminer des potentiels climatiques, faute d'archives écrites permettant de préciser la réalité des récoltes année par année, région par région.

PRINCIPAUX RÉSULTATS ET PERSPECTIVES

Les recherches menées dans le cadre de ce programme ont permis d'analyser les conditions environnementales du développement de l'économie rurale en Gaule du nord, entre La Tène D1 et l'Antiquité tardive. Les analyses régionales ont bien illustré la grande diversité des "pays" définis par leur topographie, leur géologie, leur climatologie et leur pédologie. L'exploitation gallo-romaine des terres agricoles se place au sein d'une longue histoire agraire qui avait commencé avec le Néolithique, avant que ne se mettent en place les premiers parcellaires à l'âge du Bronze. À l'échelle de notre zone d'étude, l'ouverture du milieu que traduisent les données polliniques est plus importante et plus précoce dans les zones de basse altitude qu'à plus haute altitude, où les conditions climatiques du développement des céréales sont moins bonnes. La dynamique de l'exploitation agro-pastorale laténienne puis gallo-romaine constitue de ce point de vue un même cycle, qui ne s'est achevé qu'au cours des V^e-VI^e siècles p.C., une période durant laquelle la forêt a regagné des zones récemment exploitées (plateaux de moyenne altitude et montagnes).

L'exploitation agricole a entraîné une modification progressive mais profonde de la couverture pédologique. Le phénomène d'érosion s'est en effet profondément accru, induisant par là même un rapide colmatage et un assèchement des milieux alluviaux, ainsi qu'une modification de la composition végétale des sols, généralement appauvris. Les agriculteurs de l'Antiquité ont toutefois tenté de lutter contre cette dégradation à l'aide de techniques diverses. Les informations archéopédologiques montrent en effet que la pratique des amendements et des fumures était connue dans le nord de la Gaule. Par ailleurs l'installation de systèmes de drainage a permis de mettre en valeur des terres jusqu'alors marginales. Le développement à venir de programmes de recherche sous les forêts actuelles, où les sols antiques sont potentiellement les

107. Ben Ari *et al.* 2008 ont ainsi démontré le caractère imprévisible des mauvaises récoltes survenues en France en 2016, à la suite d'un automne précédent anormalement chaud et de précipitations très élevées au printemps, ce qui relativise les modèles statistiques.

mieux conservés, permettra de se rendre compte de l'extension et de l'intensité de ces pratiques de bonification des sols. Le développement de nos connaissances sur l'exploitation des ressources forestières, des zones humides fluviales et littorales doit désormais prendre en compte les changements environnementaux liés aux activités humaines et les aléas climatiques (inondations, tempêtes) qu'ont subis les communautés rurales du nord de la Gaule (annexe en ligne 1).

L'analyse de l'ensemble des données environnementales pour la Gaule du nord montre que les périodes laténienne et gallo-romaine ont été des moments favorables au développement des productions céréalières sous un climat relativement chaud et sec. De courtes périodes de crises frumentaires ont pu, il est vrai, interrompre ou retarder temporairement le développement de l'économie gallo-romaine, en particulier durant la période politiquement complexe qui a suivi la guerre des Gaules, mais cette observation ne doit pas remettre en cause la mise en évidence d'un épisode climatique favorable pendant presque toute la durée historique qui est au cœur de ce programme de recherche. S'il existe un ralentissement ou un déclin du développement agricole au cours du III^e siècle, il ne peut guère s'expliquer par de mauvaises conditions climatiques et d'autres causalités doivent être évoquées; on peut citer, à cet égard, l'hypothèse d'épidémies animales et humaines, mais celles-ci restent difficiles à mettre en évidence archéologiquement (annexe en ligne 2). Les mutations d'ordre historique, économique et social doivent donc rester au cœur de nos interrogations. Les V^e et VI^e siècles ont achevé ce cycle de développement agricole, dans le cadre d'une profonde dégradation des conditions climatiques de la production céréalière. Les principales caractéristiques de l'environnement des espaces ruraux en Gaule du nord constituent donc un cadre indispensable à la compréhension du système agraire laténien et gallo-romain.

* On retrouvera les annexes de cet article sur le site <https://hal.archives-ouvertes.fr/EDITIONS SAUSONIUS>

