

Sol, patrimoine archéologique et usages anciens

par Benoît Renaux¹

¹ Conservatoire botanique national du Massif central
Le Bourg
43230 CHAVANAC-LAFAYETTE
Tél. : 04 71 77 55 65
Courriel : benoit.renaux@cbnmc.fr
Site Internet : <http://www.cbnmc.fr/>

Résumé :

En surface, on peut trouver trace d'usages non forestiers (restes de murs et de bâtiments, terrasses agricoles, terrassement ou excavations, épierrement...) mais aussi forestiers (plateformes ou chaudrons de charbonnage, bornes forestières, biefs utilisés pour le sciage en long). Des anomalies topographiques plus discrètes peuvent trahir des parcelles, bâtiments ou mares disparus depuis longtemps, mais ils nécessitent un œil de spécialiste voire l'usage du LiDAR aéroporté. Cette approche peut permettre de pré-identifier les secteurs à étudier par des méthodes plus précises mais aussi invasives et coûteuses. Dans le sol, l'archéologue peut en effet reconstituer la nature et la chronologie des occupations humaines successives, mais une telle approche ne peut être menée en plein sur de vastes zones. L'approche historique est également très pertinente, que ce soit par l'étude de bases de données nationales ou de savoirs plus locaux (travaux sur les usages locaux anciens...).

La pédologie permet d'identifier certains usages parfois très anciens, notamment agricoles. Les sols forestiers gardent ainsi la mémoire d'usages gallo-romains, alors que plusieurs générations d'arbres se sont succédé en surface et que la forêt est présumée présente depuis des temps immémoriaux. Labour, épierrement, pâturage, érosion résultats d'un sol mis à nu, fertilisation et chaulage ont laissé des traces dans la structure du sol (horizon remanié ou tassé, semelle de labour), mais aussi dans sa chimie. Ainsi les zones anciennement perturbées par des habitations, activités artisanales ou agricoles sont trahies par des pH, taux de phosphore assimilable, d'azote et d'abondance de l'isotope 15 de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) plus élevés que dans les forêts immémoriales ou anciens parcours extensifs (anciennes landes ou pelouses...). Le taux de carbone organique et le rapport C/N (Carbone/Azote) sont en revanche moins élevés. Aucun seuil n'existe dans l'absolu, et c'est la mise en évidence d'anomalies dans ces valeurs (valeurs localement différentes de celles d'autres secteurs pourtant situés dans des conditions écologiques et des peuplements comparables) qui permet de mettre en évidence des usages anciens non forestiers. Contrairement aux usages agricoles intensifs, un passé de parcours (lande, pelouse...) pâturé extensivement laisse peu de traces dans le sol.

Mots-clés : Forêts anciennes, pédologie, fouilles archéologiques, pH, P_2O_5 , C/N, $\delta^{15}\text{N}$, LiDAR

Le CBN Massif central coordonne la réalisation d'une « boîte à outils » spécifique aux **forêts anciennes du Massif central**. Ces outils permettent d'identifier et localiser les forêts anciennes du Massif central, de caractériser leur maturité, leur état de conservation et la biodiversité potentielle qu'elles abritent. Ils sont destinés à donner des éléments factuels pour identifier et hiérarchiser les enjeux locaux en termes de conservation, éclairer les choix de gestion et orienter les actions.

Retrouvez l'ensemble des indicateurs mis au point par le CBN Massif central et ses partenaires, ainsi que les résultats de l'enquête sur les forêts anciennes et matures du Massif central sur notre site internet http://cbnmc.fr/forets_anciennes

Conservatoire Botanique National



Conservatoire Botanique National



Rédaction

Coordination

Partenaires financiers



Le projet « Outils pour identifier et caractériser les forêts anciennes du Massif central » est cofinancé(e) par l'Union européenne. L'Europe s'engage dans le Massif central avec le fonds européen de développement régional.

La Région
Auvergne-Rhône-Alpes



R É G I O N
NOUVELLE
AQUITAINE
AQUITAINE LIMOUSIN POITOU-CHARENTES

Introduction

Les caractéristiques des sols forestiers diffèrent de celles des sols agricoles. Certains types de sols sont plus fréquents en forêt (sols bruns, sols hydromorphes, lessivés hydromorphes et sols podzolisés), d'autres en milieu agricole (sols lessivés non hydromorphes, sols alluviaux) (BADEAU *et al.* 1999). Mais les sols forestiers se distinguent surtout par leurs caractéristiques chimiques, avec une acidité souvent plus forte et une teneur en carbone plus élevée. Ces caractéristiques sont en partie dues au fait que la mise en culture a préférentiellement concerné des stations fertiles, alors que d'autres contextes ont davantage été « laissés » à la forêt (sols hydromorphes avec contraintes liées à l'engorgement, sols podzolisés très pauvres...) (BOURDET 2000 ; MAUSSION 2003). Mais elles s'expliquent surtout par les pratiques agricoles, qui, une fois le terrain défriché, transforment profondément le sol forestier d'origine : chaulage des sols acides afin de diminuer l'acidité, travail du sol entraînant une fragmentation des éléments grossiers calcaires et une minéralisation rapide de la matière organique, fertilisation, etc. (BADEAU *et al.* 1999). Or, même après abandon des pratiques agricoles et recolonisation forestière, plusieurs études indiquent que ces différences perdurent des siècles voire des millénaires, et peuvent donc en théorie permettre de différencier forêt ancienne/forêt récente.

Synthèse des études réalisées

Les effets à long terme sur le sol d'une discontinuité forestière avec usages agricoles, artisanaux ou d'habitation sont bien documentés, en France, comme ailleurs en Europe (COMPTON & BOONE 2000 ; PETERKEN & GAME 1984) et en Amérique du Nord (BELLEMARE *et al.* 2002; COMPTON *et al.* 1998). La plupart des études ont combiné une approche archéologique, pédologique et floristique¹. Les caractéristiques du sol sont ainsi confrontées aux différents usages anciens, attestés, localisés et datés par des indices physiques : microtopographie due à différents aménagements (bâtiments, terrasses...), mobilier archéologique...

Un rapport réalisé par l'INRA pour le GIP ECOFOR (DUPOUEY & DAMBRINE 2004) a fait la synthèse des résultats obtenus à cette date. Une des conclusions des auteurs est, qu'en plus des traces d'occupation humaine dans les forêts récentes ayant recolonisé des terres abandonnées entre le XIX^e siècle et le XX^e siècle (ou ayant été plantées), on trouve des traces de peuplements médiévaux ou gallo-romains dans de très nombreux massifs, à des échelles plus ou moins importantes (du peuplement diffus dans une ambiance forestière à des défrichements plus importants). Des recherches préliminaires effectuées dans les bases des données archéologiques (MAUSSION 2003) ont mis en évidence plus de 2000 mentions d'occupation Romaine ancienne à travers les forêts françaises. Des structures attestant d'une occupation parfois très ancienne ont été rapportées dans des massifs souvent réputés forestiers depuis des temps immémoriaux (PETRY 1977 ; GEORGES-LEROY *et al.* 2003 ; MEYER 2003). Quant aux traces d'occupation moderne, murets, terrasses ou fermes abandonnées, elles sont légions dans les forêts du Massif central. Il faut souligner que la forêt préserve davantage les vestiges archéologiques que les cultures ou zones d'habitations, puisque le sol n'est pas remanié par les travaux et labours (ce qui en plus d'abîmer le mobilier archéologique mélange les strates, rendant le site chronologiquement « illisible »). Les sols forestiers sont enfin beaucoup moins soumis à l'érosion qu'un sol nu. Les vestiges se trouvent ainsi parfois juste sous la couche d'humus. Pour les archéologues, la forêt est donc un milieu particulièrement riche d'informations.

Ces études relatives aux forêts anciennes combinant approche archéologique, analyses pédologiques (description de profils pédologiques et analyses chimiques) et relevés de végétation ont concerné des massifs forestiers différents de par leur contexte écologique, mais aussi la période d'utilisation agricole et la date d'abandon des pratiques. Elles ont porté surtout sur le nord-est de la France (BOURDET 2000; BURGER 2007; DUPOUEY *et al.* 2002a, 2002b; JUSSY *et al.* 2002; KOERNER *et al.* 1997, 1999; LEMOULAND 2002 ; MOARES *et al.* 2001; SCIAMA 1999), avec des contextes et des périodes d'abandon variés (tableau ci-après).

Référence bibliographique	Région géographique	Contexte écologique	Contexte historique
KOERNER <i>et al.</i> 1997 ; JUSSY <i>et al.</i> 2002; KOERNER <i>et al.</i> 1999 ; BURGER 2007;	Massif vosgien	Contexte montagnard acide	Déprise entre le XVII ^e et le XIX ^e siècle

¹ Cette dernière étant un bon indicateur des usages anciens, comme développé dans la partie "Des listes d'espèces indicatrices à un outil opérationnel pour identifier les forêts anciennes et récentes à partir de la flore vasculaire").

DUPOUEY <i>et al.</i> 2002a; MOARES <i>et al.</i> 2001; SCIAMA 1999	Petite Montagne Jurassienne	Étage collinéen supérieur et montagnard inférieur en contexte calcaire	Déprise au XIXe siècle
BOURDET 2000; DUPOUEY <i>et al.</i> 2002b; LEMOULAND 2002	Plateaux calcaires de Lorraine	Étage collinéen en contexte calcaire	Déprise à la fin de la période gallo-romaine
BERTRAND 1996; DAMBRINE <i>et al.</i> 2007; LAÛT 2007, 2011, LAÛT <i>et al.</i> 2004, 2015	Forêt de Tronçais	Plaine en contexte acide	Déprise entre le IVe et le VIIe siècle
PREVOSTO <i>et al.</i> 2004	Chaîne des Puys	Montagne volcanique	Déprise dans les années 1950
ROUAUD 2013	Vallée de la Dordogne	Collinéen en contexte acide	Contexte passé forestier

Figure 1 : liste des principales études ayant porté sur le sol et l'ancienneté.

Dans le Massif central, ces études ont en particulier concerné la forêt de Tronçais (BERTRAND 1996; DAMBRINE *et al.* 2007; LAÛT 2007, 2011, LAÛT *et al.* 2004, 2015), massif forestier de plaine en climat subatlantique et contexte acide à modérément acide (substrat gréseux ou dépôts alluviaux). Une étude a porté sur la chaîne des Puys, massif montagneux volcanique sous influences atlantiques, avec cendres de basaltes et de trachytes (PREVOSTO *et al.* 2004). Les deux contextes sont très différents, et la période d'occupation ancienne puis d'abandon tout autant. En effet, le massif de Tronçais aurait été défriché puis occupé à l'époque gallo-romaine et au début du haut Moyen-âge (entre le I^{er} et VII^e siècle) alors que l'abandon des pratiques agricoles date de l'après seconde guerre mondiale pour le second (DUPOUEY & DAMBRINE 2004). Des études sont actuellement en cours sur le plateau de Millevaches en Limousin, dans un contexte de plateau (étage collinéen supérieur) sur substrat cristallin, sous influences atlantiques. En dehors du sud du Massif central, et même si les plateaux et massifs montagneux les plus élevés n'ont pas été étudiés, ces trois contextes sont assez représentatifs du Massif central. En outre, une thèse a porté sur les anciens usages liés au charbonnage dans la haute vallée de la Dordogne (ROUAUD 2013), avec cette fois des forêts de pente, certaines anciennes et autrefois très intensivement exploitées.

En forêt de Tronçais, ce sont 112 fermes gallo-romaines qui ont été mises à jour, soit une moyenne d'un site par 95 ha (LAÛT 2007). Certains sites ont également été occupés jusqu'au haut Moyen-âge, avec une activité artisanale (LAÛT 2011). Contrairement à ce qui a été mis à jours en forêt de Haye sur le plateau Lorrain, où les surfaces défrichées étaient importantes et correspondaient à de grandes exploitations (LAFFITE *et al.* 2002), les zones de peuplement de Tronçais correspondaient de petites exploitations agricole ou bâtiments d'artisans dans des clairières, dans une ambiance globale toujours forestière (LAÛT 2001, 2007, LAÛT *et al.* 2015). Les analyses polliniques (RICHARD 2003) et paléoanthracologiques (HUMBERT 2003) indiquent que les défrichements se sont fait sous forme de clairières, en partie au moins par brulis (abondance de charbons de bois), dans une forêt préexistante qui était assez dense comme l'atteste l'absence de trace d'éricacées et de fabacées de lande comme *Calluna vulgaris*, *Erica* div. sp. ou *Cytisus scoparius*. Outre les activités artisanales et les bâtiments d'habitation, les surfaces défrichées ont été utilisées pour la culture de céréales et de légumineuses, d'arbres fruitiers, mais aussi pour l'élevage (DAMBRINE *et al.* 2007). On compte aussi dans les vestiges des sanctuaires religieux et des mardelles, petites mares creusées pour l'abreuvement du bétail (LAÛT 2007). Dans la chaîne des Puys, l'occupation du sol qui a perduré jusqu'au milieu du XIX^e siècle correspondait à un paysage de bois et de hautes chaumes pâturées, qui ont été recolonisées par des peuplements de Pin sylvestre et de Bouleau verruqueux après leur abandon (PREVOSTO *et al.* 2004).

Principaux résultats

Effet de l'occupation ancienne sur les caractéristiques chimiques des sols

Toutes les études convergent vers les mêmes résultats, et démontrent un effet à très long terme sur la chimie du sol de ces épisodes d'occupation humaine, sur plusieurs centaines d'années (BURGER 2007) voire plus de 1500 ans pour des sites abandonnés à la fin de la période gallo-romaine (DAMBRINE *et al.* 2007; DUPOUEY *et al.* 2002a). En forêt de Saint-Amond sur les plateaux calcaires de Lorraine, la sylviculture menée depuis et notamment la conversion de taillis-sous-futaie en futaie n'a pas estompé ces effets (DUPOUEY *et al.* 2004), et c'est probablement le cas sur de nombreuses forêts qui ont connu une exploitation intensive entre le Moyen-âge et l'avènement des énergies fossiles. La chimie du sol peut donc être une approche intéressante pour attester de l'ancienneté d'une forêt, et mettre en évidence certains types d'utilisation du sol.

Dans les Vosges, les modifications du sol ont été les plus importantes dans les anciennes parcelles cultivées, suivies des prés, des pâtures extensives² et des forêts anciennes (BURGER 2007). A Tronçais, ce sont les anciennes cultures et les zones fumées ou les enclos à bestiaux qui se distinguent des zones non déboisées (DAMBRINE *et al.* 2007). D'après la synthèse réalisée pour le GIP ECOFOR (DUPOUEY & DAMBRINE 2004), les analyses pédologiques réalisées en forêt au niveau de plusieurs sites occupés à l'époque gallo-romaine, médiévale ou moderne montrent des résultats globalement concordants, opposant les zones de forêts immémoriales³, landes et parcours extensifs aux zones anciennement cultivées, pâturées intensivement, habitées ou ayant connu des aménagements tels que des murs. Les analyses de sol mettent en évidence dans les sols des zones anciennement cultivées, pâturées intensivement ou habitées :

- des pH plus élevés, surtout en contexte acide ;
- des teneurs en carbone organique plus faibles et des taux de nitrate assimilable par les plantes plus élevés, induisant des rapports C/N plus faibles ;
- des taux de phosphore assimilable plus élevé,
- des rapports isotopiques en isotope 15 de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) plus élevé, associé à une nitrification plus intense lorsque le terrain a été fumé ou pâturé de manière importante (déjections animales),
- Dans certains cas, les taux de calcium (Ca^{2+}), de magnésium (Mg^{2+}) et de potassium (K^+) sont plus élevés, et les taux de saturation en base (S/T)⁴ sont plus élevés sur les anciennes cultures et prés amendés (BURGER 2007).

Les effets sont en revanche différents en fonction du contexte (calcaire ou acide), et du type d'occupation du sol. Plus que l'effet du déboisement ou la différence d'affectation culture / élevage, ce sont les différentes pratiques culturales qui sont à l'origine de ces différences, et distinguent les zones fumées par apport de fumier ou charge importante en bétail, chaulées, irriguées (cultures, prés fauchés ou pâturés), voire labourés (cultures), des anciennes forêts et parcours extensifs. Ces pratiques sont attestées dès l'époque antique (DUPOUEY & DAMBRINE 2004).

Sur roche acide, les pH plus élevés et les taux de Ca^{2+} et Mg^{2+} dans les anciennes parcelles agricoles s'expliquent par la pratique du chaulage des sols en culture ou prairie, ainsi que par une teneur plus faible en matière organique. La fragmentation des éléments grossiers en contexte calcaire peut aussi contribuer à une augmentation du Ca^{2+} et du pH. La présence d'anciens murs (murets séparant les parcelles ou murs d'habitations) a le même effet du fait de l'utilisation de mortier calcaire (DAMBRINE *et al.* 2007).

La fertilisation par du fumier dans les champs ou les déjections du bétail dans les enclos entraîne aussi un apport de potassium, lequel additionné à celui de calcium et de potassium évoqué plus haut entraîne des taux de saturation plus élevés sur les sites anciennement occupés que sur les forêts ou parcours (BURGER 2007). Le taux de phosphore est également plus élevé sur les anciens parcours ou parcelles fertilisées (LAÛT 2007). Du fait du caractère très fermé du cycle biologique des cations, l'influence des usages anciens sur ces teneurs en cation et sur le pH se maintient très longtemps (DUPOUEY & DAMBRINE 2004).

À conditions écologiques comparables, le rapport C/N est plus faible sur les anciennes terres agricoles, d'autant plus que l'utilisation agricole a été intensive (BURGER 2007). Ceci témoigne d'un turn-over plus rapide de la matière organique dans les anciens sols agricoles, et de taux de matière organique plus élevés dans les sols forestiers. Sur les sites vosgiens étudiés par l'auteur sur roche acide, le C/N était de 11 à 15 sur les anciennes cultures et prés, entre 15 et 20 sur les anciennes forêts et anciens parcours.

On observe une rétention beaucoup plus forte de l'azote dans les sols forestiers, et le défrichement s'accompagne d'une perte d'azote par lessivage du nitrate (HÜTTL & SCHAAF 1995). Il s'agit d'azote 14 (^{14}N),

² Le terme utilisé dans de nombreuses études est celui de « pâturage », par opposition aux « prés ». Les « pâturages » correspondent à des parcours extensifs, sans travail du sol, amendement ou fertilisation, et avec pression de pâturage modérées (et donc apport de déjections modéré). Les « prés » correspondent d'après les descriptions à des espaces en herbe gérés plus intensivement, avec irrigation, amendement (chaulage, fumure), épierrement, irrigation... Aucune différence n'est faite entre pré fauché ou pâturé, ces usages pouvant par ailleurs changer au fil du temps.

³ C'est-à-dire forêt ancienne qui n'a jamais été déboisée de mémoire d'homme.

⁴ Le taux de saturation du sol (S/T) est le rapport de la somme des cations échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+) par la capacité d'échange cationique apportée par l'argile et les matières organiques présentes dans le sol. La capacité d'échange cationique (CEC ou T pour capacité totale) est la quantité de cations qu'un sol peut retenir sur son complexe adsorbant à un pH donné.

isotope le plus répandu dans la nature. Du fait des phénomènes de nitrification, dénitrification et volatilisation d'ammonium (JOHANNISSON & HOEGBERG 1994), plus intenses en contexte agricole, le turnover de l'azote y est plus important, notamment lorsqu'il y a eu apport d'urée, et une partie de l'azote initial peut être perdu. On n'observe pas pour autant de taux d'azote plus faible sur les anciennes parcelles pâturées ou fertilisées. À Tronçais, les anciens secteurs cultivés ou les enclos sont ainsi caractérisés par la présence d'une flore plus nitratophile que dans les secteurs non perturbés (LAÜT 2007), ce qui se retrouve sur la plupart des études (DUPOUEY *et al.* 2002a; KOERNER *et al.* 1997). L'azote perdu est en effet remplacé par celui issu des déjections animales (par fertilisation ou apport direct), ce qui enrichit le sol en azote 15 (^{15}N) et fait augmenter le rapport isotopique en faveur de celui-ci. Ce phénomène est bien observé en contexte acide mais mériterait d'être mieux étayé en contexte calcaire (DUPOUEY & DAMBRINE 2004). Malgré le caractère plus ouvert du cycle de l'azote dans le sol –par rapport à celui des cations évoqué plus haut-, l'effet de l'enrichissement en azote perdure quand même longtemps, et le calcul du rapport isotopique $\delta^{15}\text{N}$ permet de déceler d'anciens usages agricoles (JUSSY *et al.* 2002; KOERNER *et al.* 1999).

Enfin, on observe une modification au niveau microbiologique entre sols anciennement cultivés et sols non perturbés (communautés bactériennes au niveau des rhizosphères), mais l'interprétation des différences observées reste cependant difficile (FREY-KLETT *et al.* 2003)⁵.

Effet de l'occupation ancienne sur les caractéristiques physiques des sols et la topographie

Le labour entraîne un remaniement et un approfondissement des sols, et la fragmentation des éléments grossiers, même lorsqu'il est réalisé avec une araire, outil qui était utilisé à l'époque antique (GEBHARDT 2004). Le labour laisse également des traces à la limite de l'horizon travaillé, avec des sillons creusés sur la roche et une semelle de labour⁶ (GEBHARDT 2004). Morphologiquement, on observe des différences nettes entre les profils des sols anciennement cultivés et ceux qui ne l'ont pas été. Pour les anciennes terres agricoles le premier horizon organo-minéral (appelé dans ce cas Ap) est plus épais et homogène que l'horizon A d'un ancien sol forestier, le labour ayant mélangé la matière organique avec le sol minéral ; la limite entre l'horizon A et l'horizon minéral B est en outre plus nette, alors qu'elle est ondulée et diffuse dans un sol de forêt immémoriale (BURGER 2007). Cette différence est d'autant plus visible en condition acide, avec en contexte de forêt ancienne un horizon A à forte teneur en matière organique (appelé Ah), avec une activité biologique réduite limitant le « mélange » de l'horizon A.

La culture d'un champ ou la fauche d'un pré peuvent être en outre accompagnées de l'épierrement manuel de la parcelle, les pierres étant rassemblées en tas ou sous forme de murets. Alors que les horizons des sols forestiers se sont différenciés progressivement et mettent des siècles à se structurer (DUCHAUFOR 1968), le labour abouti à la remobilisation des horizons profonds, mais aussi à la création d'une semelle qui demeure longtemps après abandon des pratiques agricoles (GEBHARDT 2004). Les chablis peuvent localement remobiliser les horizons mais sont répartis de manière ponctuelle, contrairement à un labour.

Le pâturage cause un tassement du sol d'autant plus important qu'il a été intensif et réalisé par des animaux lourds (cochons, vaches, chevaux). En diminuant la porosité du sol, le tassement et le colmatage de la porosité du sol peut mener à une réduction de l'infiltration qui augmente le ruissellement d'un rapport de 1 à 12 en comparaison avec des terrains similaires non pâturés (REY *et al.* 2004). Des indices de mise à nu ancienne du sol peuvent ainsi perdurer et être mis en évidence au microscope (GEBHARDT 2004, 2010).

Le pâturage entraîne une réduction du couvert végétal, et si la charge en bétail est trop importante (d'autant plus sur des végétations fragiles à croissance lente) le sol peut être mis à nu. Ceci s'observe également en cas de pâturage en sous-bois, notamment par des cochons (GEBHARDT 2004), qui mettent le sol à nu du fait de leur mode d'alimentation. Réduction de la végétation et mise à nu du sol augmentent l'érosion du sol, et les particules les plus fines sont entraînées vers l'aval (REY *et al.* 2004), dans les cours d'eau ou en bas de pente (LANGOHR 1990). L'analyse de profils pédologiques peut alors mettre à jour ces zones d'érosion et de dépôt. L'exploitation forestière entraîne aussi des phénomènes d'érosion (REY *et al.* 2004), notamment les coupes à blanc de grande taille. Ces phénomènes sont bien connus à l'époque moderne, surtout avec des engins lourds. De telles coupes étaient déjà pratiquées dans le passé, notamment lorsque les énormes besoins en bois de chauffe entraînaient une surexploitation des forêts françaises par des coupes de taillis régulières, mais la vidange des bois était

⁵ Voir aussi la partie « Champignons, ancienneté et maturité des forêts »

⁶ La semelle de labour est une couche compacte du sol située à la base du labour (sous le passage du soc). Elle mesure quelques centimètres d'épaisseur et est imperméable aux racines et à l'infiltration de l'eau.

réalisée à la force de l'homme ou de bêtes de trait (chevaux, bœufs). À notre connaissance, aucune étude portant sur l'incidence de ces coupes sur l'érosion des sols n'a été réalisée. Il est probable que si de telles coupes avaient un effet sur les sols, la mise à nu du sol était temporaire et l'effet n'était pas comparable à une mise en culture ou un pâturage intensif mettant le sol à nu sur une période longue.

La présence de charbons de bois anciens dans le sol peut attester d'épisodes d'anciens de défrichements par le feu (HUMBERT 2003). Dans des contextes où les incendies de forêts sont rares (hors zone méditerranéenne), l'étude au microscope des charbons de bois contenus dans les sols⁷ peut ainsi être utilisée pour attester d'anciens épisodes de défrichement par le feu (GEBHARDT 2010). Il a ainsi été prouvé que les hautes chaumes des Vosges, longtemps réputées primaires, étaient autrefois forestières, et qu'elles avaient été défrichées par le feu à l'Âge du Bronze, avec ensuite des épisodes de déprise et de réexploitation successifs (GOEPP 2007). Les charbons de bois ne sont pas les seuls restes végétaux contenus dans le sol. Des phylolithes, résidus siliceux de plantes, peuvent ainsi demeurer dans le sol et donner des indices sur la végétation passée (GEBHARDT 2010).

Si les sols peuvent garder la trace d'activités agricoles passées, c'est aussi le cas de certaines pratiques forestières, actuelles ou disparues. La présence de places de charbonnage peut attester de pratiques forestières, et de la présence à cette époque d'une partie au moins des forêts alentours. On peut ainsi trouver en forêt d'anciennes places de charbonnage, comme cela a été le cas lors d'études dans les gorges de la Dordogne (ROUAUD 2013) ou sur le Mont Lozère (PARADIS-GRENOUILLET *et al.* 2014). Le sol est alors caractérisé par une accumulation importante de charbons de bois, et la topographie du lieu est modifiée par l'aménagement de terrasses. Sur les sites récents, on peut aussi trouver d'anciens chaudrons en fer.

La présence d'anciennes places de charbonnage peut indiquer de manière indirecte que des forêts étaient présentes à proximité immédiate, et donc de l'ancienneté de ces forêts. Elle renseigne aussi sur la gestion passée de la forêt, le charbonnage étant associé à une exploitation très intensive de la forêt avec coupe de taillis régulière prélevant alors tout le capital sur pied (ROUAUD 2013). Même si le compartiment « vieux bois » et « bois mort » peut être présent dans certaines de ces forêts aujourd'hui, une rupture de la continuité de cette niche écologique indispensable à ¼ des espèces forestières (STOKLAND *et al.* 2004; VALLAURI *et al.* 2002) a pu avoir lieu à l'époque où le charbonnage était pratiqué, et maintenait les forêts à des stades très jeunes. Par ailleurs, les coupes liées au charbonnage ont probablement eu une incidence sur la composition en essence des peuplements, puisque les essences n'ont pas la même attractivité pour ce charbonnage (selon les contextes bioclimatiques, Chêne, Charme ou Hêtre ont été privilégiés). Les places de charbonnages sont parfois reconnaissables dans les forêts de pente car elles ressemblent aujourd'hui à d'anciennes terrasses semi-circulaires, et sur le sol desquelles les charbons sont bien présents. De tels cas de figures se rencontrent régulièrement dans la plupart des massifs montagneux du Massif central comme dans le massif du Sancy, les gorges de la Sioule, le Livradois et le Forez (LATHUILLIERE 2016, com. pers.).

D'autres indices d'anciennes pratiques forestières peuvent être mis en évidence. D'anciennes voies de vidange des bois (rigoles formées par le passage régulier des grumes qui y étaient trainées) dans lesquelles les bois étaient descendues par schlittage⁸ ou lancées dans la pente. On peut aussi citer les biefs et leurs réservoirs, qui étaient aménagés en forêt afin d'y positionner des scies hydrauliques portatives pour scier les bois en long, comme dans les monts de la Madeleine (03-42). Pour finir sur les indices d'anciennes pratiques forestières, on pourrait également citer les bornes forestières ou les murets ou fossés périmétraux (notamment autour des forêts domaniales).

Les pratiques agricoles ou d'anciens aménagements ont aussi laissé de nombreuses traces en surface. Des parcelles anciens, agricoles ou d'habitation, ont pu être mis en évidence par prospection en surface, fouilles ou utilisation du LIDAR aéroporté⁹ (GEORGES-LEROY *et al.* 2011). D'anciennes pratiques agricoles peuvent être mises en évidence par la présence de terrasses aménagées pour les cultures (dont les vergers de fruitiers qui se retrouvent parfois intégrés aujourd'hui à des peuplements forestiers de reconquête). Des concentrations de mardelles peuvent être associées à des usages agricoles ou artisanaux. Enfin, la présence de murets de

⁷ L'étude de ces charbons de bois anciens, leur identification et leur datation, relève de la paléanthracologie.

⁸ La schlitte est un traîneau qui a l'aspect d'une grosse luge à l'armature légère et assez souple, et qui permettait de descendre du bois en bas du versant. Elle était conduite dans la pente par le schlitteur le long de pistes aménagées à cet effet, le schlitteur se positionnant devant pour en freiner la descente (pratique, très dangereuse, présente essentiellement dans le quart Nord-est de la France).

⁹ Le LIDAR, acronyme en langue anglaise de « light detection and ranging » ou « laser detection and ranging », est une technique de mesure à distance fondée sur l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière renvoyé vers son émetteur. Son utilisation par avion permet de dresser une carte de la topographie précise au décimètre, qui met en évidence d'anciens parcelles agricoles ou d'habitation, d'anciennes mardelles...

délimitation ou d'épierrement ainsi que des terrasses peuvent attester d'anciennes pratiques agricoles (KOERNER *et al.* 1999), même si des murets peuvent localement avoir été utilisés en forêt pour marquer des limites.

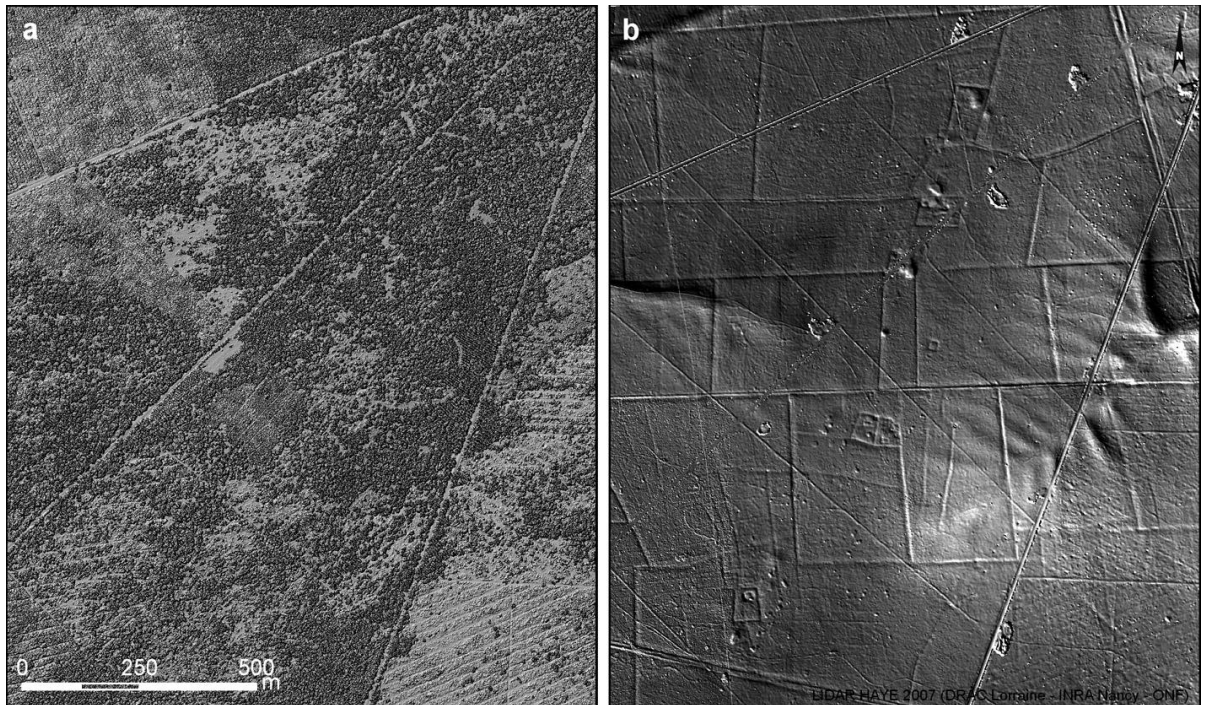


Figure 2 : Exemple d'utilisation du LIDAR, en forêt de Haye (54). A gauche, orthophotographie aérienne, à droite image LIDAR.

Humus, faune du sol et maturité

Plusieurs auteurs mettent en évidence l'évolution de l'humus au fil du cycle sylvigénétique, notamment dans les pessières de montagne ou boréales (BERNIER & PONGE 1994; PONGE & BERNIER 1995; SALMON *et al.* 2006), mais aussi dans une sapinière des Alpes, type de végétation présent également dans le Massif central (BOUDIN & BRUN 1999). Certaines de ces études ont également porté sur la faune du sol (CANER *et al.* 2000; SALMON *et al.* 2006).

Dans des forêts d'Épicéa commun (*Picea abies*) des Alpes italiennes, une étude a mis en évidence des modifications dans la chimie du sol au fil du cycle sylvigénétique, en comparant des peuplements en régénération âgés de 24 ans à des peuplements adultes âgés de 136 ans (SALMON *et al.* 2006). Les auteurs ont mis en évidence une augmentation du taux d'azote et surtout de carbone, une augmentation du rapport C/N et une diminution du pH à mesure que le peuplement vieillit. Ces évolutions sont liées à l'évolution de l'humus au fil du cycle sylvigénétique, avec accumulation de litière au fil des années et passage d'un humus peu épais (type amphimull à dysmull) à des humus épais de type dysmoder, témoignant d'une décomposition incomplète et lente de la litière (SALMON *et al.* 2006). Ces changements ont également été constatés dans les autres sites étudiés (BERNIER & PONGE 1994 ; PONGE & BERNIER 1995). Artisans du recyclage de la matière organique, la faune du sol (mésosofaune et macroarthropodes) évolue également de manière importante avec la maturité, du fait de l'appauvrissement du sol, de l'accumulation de litière peu décomposée et de la diminution de la teneur en eau du sol (utilisée par les arbres adultes). Le fait que les jeunes peuplements aient des humus de type mull, avec des C/N faibles et des taux de carbone et d'azote faible indique une minéralisation assez rapide de la litière suite aux coupes de régénération. Ceci a également été observé en Allemagne (ZAITSEV *et al.* 2002), avec également une modification des communautés d'acariens oribatides dans le sol, qui se reconstituaient au bout d'une centaine d'années. La mise en lumière lors de coupes à blanc ou d'une grosse trouée de chablis induit également une minéralisation des placages d'humus en surface. Ces accumulations se forment progressivement à la base des troncs ou sur les rochers, et sont propices à l'observation de certaines communautés bryophytiques (CELLE *et al.*

2014)¹⁰. Les humus les plus épais, de type moder, nécessitant des décennies pour se former, leur présence exclue de fait un épisode de culture très récent, mais ce type d'humus peut aussi se former sous des landes.

De tels résultats montrent toute l'importance de l'humus et de la faune du sol dans le fonctionnement de l'écosystème forestier, et les liens dans certains contextes favorables à la formation d'humus épais (sol pauvre, climat de montagne défavorable à l'activité des décomposeurs...) entre humus et maturité. Quelques très rares exemples de liens suspectés entre ancienneté et humus apparaissent dans la littérature. Dans des forêts des Vosges, des podzols ont été observés dans des hêtraie-sapinières où on n'observe en principe pas ce type d'humus. Ce phénomène est possiblement attribuable à des épisodes de déboisement, avec présence de landes à callune (GUILLET 1974). Globalement, le lien est surtout fait dans la littérature entre humus et maturité. En effet, bien qu'un défrichage ou le pâturage intensif en forêt (notamment par des cochons) détruit rapidement l'humus forestier, c'est aussi le cas d'une trouée naturelle de taille importante ou d'une coupe à blanc. L'impact de l'ancienneté sur la faune du sol serait toutefois à explorer, étant donné, la probable faible capacité de dispersion de ces organismes¹¹.

Pistes de protocoles de terrain

Les études menées sur sol et ancienneté des forêts en France et dans le Massif central montrent tout l'intérêt de l'étude des sols et du patrimoine archéologique pour identifier les traces d'occupation ancienne, attestant d'un passé agricole, artisanal, d'habitation, mais parfois aussi forestier.

Les principales étapes ou approches qui ressortent des études sont les suivantes :

- Recherches historiques (KOERNER *et al.* 2001), exploitation des cartes et bases de données (DUPOUEY & DAMBRINE 2004) ;
- Recherches de surface par parcours sur le terrain (LAÛT 2007; ROUAUD 2013), et mobilisation des connaissances locales (notamment forestiers et usagers de la forêt) ;
- Utilisation sur LIDAR aéroporté¹² (GEORGES-LEROY *et al.* 2011)
- Fouilles archéologiques (LAÛT 2001, 2004) ;
- Description de profils pédologiques et analyses chimiques d'échantillons de sol (DAMBRINE *et al.* 2007; DUPOUEY *et al.* 2002b; KOERNER *et al.* 1997, 1999).

Recherche de surface

Le préalable le plus aisé à toute recherche des usages anciens fondés sur l'étude des restes archéologiques et des sols consiste à effectuer une recherche au sol des indices d'usages anciens. Des aménagements et reste d'aménagements peuvent en effet être recherchés en surface. Il s'agit de vestiges de constructions ou d'aménagement divers (bâtiments ou murs ruinés), ou d'anomalies topographiques (zone aplanie, surélévation ou excavation) trahissant d'anciens aménagements. On peut citer notamment pour les usages non forestiers :

- Murs de séparation ou de bâtiments

¹⁰ Voir aussi la partie « Bryophytes, ancienneté et maturité des forêts »

¹¹ Voir aussi la partie « les gastéropodes et les forêts anciennes ».

¹² Le LIDAR, acronyme en langue anglaise de « light detection and ranging » ou « laser detection and ranging », est une technique de mesure à distance fondée sur l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière renvoyé vers son émetteur. Son utilisation par avion permet de dresser une carte de la topographie précise au décimètre, qui met en évidence d'anciens parcellaires agricoles ou d'habitation, d'anciennes mardelles...



Figure 3 : Bâtiment en ruine en forêt des Allebasses (Forez, 63).
Source : Benoît Renaux

- Emplacement d'anciens bâtiments (zone aplanie et surélevée de quelques décimètres à près d'un mètre)
- Zone excavée correspondant à d'anciennes mardelles, utilisées notamment pour l'abreuvement du bétail
- Terrasses agricoles



Figure 4 : Ancienne terrasse agricole dans les gorges de l'Anse, affluent de l'Allier (43)
Source : Benoît Renaux

Certains indices peuvent trahir d'anciens usages forestiers :

- Les bornes forestières qui délimitaient les domaines forestiers des différents propriétaires. Les bornes forestières anciennes sont généralement des blocs de pierre taillée avec ou sans inscriptions, ou des inscriptions réalisées directement sur les rochers.



Figure 5 : Bornes forestière : à gauche en forêt de la Comté (63), à droite en forêt des Colettes (03)
Source : Laurent Lathuillière (gauche), Benoît Renaux (droite)

- Les plateformes de charbonnage sur lesquelles les charbonniers entassaient le bois en meule, recouvraient le tout de terre puis y mettaient le feu, ce qui permettait une combustion lente et la carbonisation du bois en charbon. Elles se caractérisent par des surfaces horizontales plus ou moins circulaires de quelques mètres de diamètre. L'abondance de résidus de charbon de bois dans les couches superficielles du sol permet de confirmer leur identification.



Figure 6 : Plateforme de charbonnage en forêt domaniale de l'Assise, avec restes de charbons de bois.

Source : Benoît Renaux

- Les marmites de chaudronnier témoignent d'une technique plus sophistiquée (et plus tardive) pour transformer le bois en charbon par carbonisation.



Figure 7 : Marmite de chaudronnier. Source : Romain Rouaud

- Sur les petits ruisseaux en forêt, des biefs ont pu être créés pour installer des scies hydrauliques portatives qui permettaient de scier le bois directement sur place.



Figure 8 : Bief de déviation de l'Eau Noire vers l'Étui (Saint-Priest-la-Prugne, 42). Source : Martin Pavlik

Ces indices sont bien sûr à interpréter avec prudence : la présence d'un bâtiment en forêt ou d'un mur ne signifie pas forcément que les terrains alentours étaient déboisés. A contrario, la présence d'une borne forestière n'implique pas que les deux côtés de la limite étaient forestiers. Une place de charbonnage ou un chaudron indique la présence de forêt à proximité, mais pas ses limites. Enfin, la distinction entre le type de bief décrit plus haut et d'autres aménagements hydrauliques (pour alimenter des moulins ou l'irrigation de parcelles agricoles) n'est cependant pas forcément très aisée.

L'utilisation du LIDAR aéroporté peut permettre d'identifier en plein les anomalies topographiques de surface, avec une résolution verticale de 8 cm (GEORGES-LEROY *et al.* 2011).

Enfin, du petit mobilier archéologique peut se trouver en surface. Ainsi, des tessons de poterie ou des reste de tuile peuvent être remontés en surface sur des taupinières (LAÛT *et al.* 2015) ou à la faveur de chablis.

Recherches historiques et bases de données archéologiques

En prolongement avec l'utilisation des cartes anciennes (Cassini, État-major...) s'ouvre tout le champ de la recherche archéologique et historique, développé par ailleurs pour les archives forestières¹³. Parmi les bases d'information disponibles à l'échelle nationale, on peut citer la carte archéologique de la Gaule, ainsi que les bases de données DRACAR¹⁴ et PATRIARCHE¹⁵. Un grand nombre de données et travaux historiques peut être mobilisé. L'appui d'historiens et archéologues peut vite s'avérer indispensable pour interpréter les documents, et l'accès complet aux bases de données peut en outre être limité (DUPOUEY & DAMBRINE 2004).

L'étude des usages anciens peut également être une piste intéressante, comme par exemple celle menée à l'occasion de l'atlas des paysages d'Auvergne¹⁶, sur le charbonnage dans les gorges de la Dordogne (ROUAUD 2013) ou encore le Pin sylvestre en Auvergne (LATHUILLIERE *et al.* 2015). Le lien entre ce qui est observé aujourd'hui et les usages anciens doit toutefois être étudié à la lumière non seulement de l'histoire mais aussi de l'écologie, faute de quoi les risques d'erreurs sont nombreux par ignorance de la part naturelle dans le déterminisme des végétations observées. L'inverse est également vrai, et RAMEAU 1996 rappelle l'importance

¹³ Voir les parties « Cartographier les forêts anciennes à partir des cartes d'État-major » et « Méthode d'identification et de caractérisation des forêts anciennes grâce aux archives forestières ».

¹⁴ DRACAR (acronyme de Direction régionale des affaires culturelles et d'archéologie) est une base de données archéologique créée en 1991.

¹⁵ PATRIARCHE pour « Patrimoine Archéologique », correspond à l'inventaire informatique de la carte archéologique nationale.

¹⁶ <http://www.paysages.auvergne.gouv.fr/>

de la prise en compte de l'histoire des peuplements forestiers dans l'interprétation des végétations actuelles. L'étude des archives forestières prend ici toute son importance¹², non seulement pour attester de l'ancienneté d'une forêt ou au contraire d'autres usages anciens, mais aussi pour identifier les secteurs susceptibles d'être matures, et surtout approcher l'évolution de la structure et de la composition des peuplements étudiés. Outre les travaux universitaires, on peut trouver de nombreuses publications locales sur les usages anciens, souvent disparus, qui paraissent parfois dans des revues d'histoire locale¹⁷. Ici aussi, la prudence est de mise dans l'interprétation du lien entre pratiques anciennes et végétations actuelles, face à un passé souvent idéalisé.

Etude pédologique

L'analyse des sols peut permettre d'identifier certains usages anciens. Si un pâturage extensif sans travail ni amendement du sol laisse peu de traces dans le sol, les apports minéraux et organiques liés au pâturage intensif, à la fertilisation ou l'amendement des sols, ainsi que le travail du sol, laissent des traces très durables dans la structure et la chimie des sols forestiers. Elle nécessite la réalisation de fosses pédologiques avec *a minima* prélèvement d'échantillon de sol (pour analyse chimique), voire description des caractéristiques du profil pédologique (couleur, structure, texture) des horizons et des transitions entre horizons. L'analyse au microscope du sol peut en outre mettre en évidence des indices invisibles à l'œil nu, ou non identifiables finement sans cet outil : charbons de bois, restes végétaux (phyolithes), débris de poteries, horizons compactés par le pâturage ou le labour, agrégats arrondis par le labour...(GEBHARDT 2004, 2010).

Les caractéristiques chimiques les plus pertinentes dans l'identification des usages anciens sont le taux de phosphore assimilable (P_2O_5) et le pH, car ce sont les modifications qui perdurent le plus longtemps dans le sol après abandon des usages agricoles, du fait du caractère très fermé du cycle biologique des cations en forêt (DUPOUEY & DAMBRINE 2004). On peut également ajouter le rapport isotopique $\delta^{15}N$, les taux d'azote de Carbone et le rapport C/N. Toutefois, pH et $\delta^{15}N$ peuvent parfois moins bien fonctionner en contexte calcaire. (DUPOUEY *et al.* 2002b; JUSSY *et al.* 2002; KOERNER *et al.* 1999). Il est possible également d'utiliser le taux de saturation du sol (S/T), ce qui nécessite la mesure des concentration cations échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+) et de la capacité d'échange cationique.

Les résultats des différentes études comparant les différents usages anciens (forestiers, pacage extensif, pré, culture, habitation...) ne donnent pas de valeurs absolues de taux de phosphore assimilable, de valeur de pH, de C/N ou de $\delta^{15}N$ qui pourraient permettre d'identifier à coup sûr les usages anciens du sol sans comparaison avec un témoin en forêt immémoriale. Il ressort systématiquement que, par rapport à des forêts immémoriales, ces valeurs sont d'autant plus élevées que l'usage non forestier était intensif (fertilisation, travail du sol, amendement calcaire...) et probablement aussi récent. L'utilisation de ces indicateurs ne peut donc ce faire qu'en comparant zones anciennement occupées et zone demeurées historiquement forestières. Ce sont des anomalies dans les caractéristiques chimiques des sols qui permettent d'identifier les anciens usages non forestiers, c'est-à-dire l'observation en un endroit de valeurs significativement supérieures à ce qu'elles sont dans des contextes écologiques identiques.

Les prélèvements de sols sont donc à effectuer dans deux types de secteurs, avec ou sans présomption d'occupation ancienne. La comparaison devant se faire à conditions écologiques comparables, il est crucial que les différents secteurs présumés occupés / non occupés soient également répartis dans les même types de peuplements, de végétation et de station. Les points d'analyse du sol sont donc à répartir autour des zones présumées occupées et non occupées, avec un gradient d'éloignement au centre. L'échantillonnage est de type aléatoire stratifié, des points de relevé de sol étant implantés aléatoirement dans les différents types de contextes en termes d'ancienneté et de contexte écologique (types de station et de végétation) et dendrologique (types de peuplements). A titre d'exemple, l'étude de 10 zones de peuplement antique en forêt de Tronçais a nécessité 186 relevés de sol et de végétation (DAMBRINE *et al.* 2007).

La délimitation des secteurs présumés d'occupation humaine est obtenue au préalable par les approches précédentes (recherches historiques avec étude des archives et cartes anciennes, parcours de terrain, fouilles, LiDAR...). La délimitation des différents compartiments écologiques peut s'appuyer sur les cartes locales de végétations ou d'habitats (en site Natura 2000 par exemple), les cartes de stations forestières, sur les cartes géologiques ou topographiques. La nature des peuplements peut être connue grâce aux aménagements forestiers (s'ils existent) ou dans une moindre mesure les photographies aériennes (distinction de certaines

¹⁷ Citons par exemple les cahiers de la Haute-Loire <http://new.cahiersdelahauteloire.fr/>

essences et de manière grossière de l'âge et de la structure des peuplements). Dans une certaine mesure, la couche d'information CORINE Land Cover peut apporter certaines informations. À défaut de tels documents, un parcours de terrain peut être nécessaire pour déterminer les grands types de compartiments écologiques. Les valeurs observées sur les placettes caractéristiques de certains types de végétation peuvent servir de témoin pour identifier les écarts entre valeur attendue en forêt immémoriale et valeur observée. C'est par exemple le cas des placettes RENECOFOR ou du réseau des hêtraies du Nord-Est (BRETHES & ULRICH 1994; DUQUESNAY 1999), pour lesquelles il est dans ce cas nécessaire de croiser localisation et type d'usages anciens. Les données de la base de données EcoPlant (GEGOUT *et al.* 2005) de l'AgroParisTech-ENGREF pourraient également s'avérer utiles.

Dans la recherche de possibles zones enrichies en azote qui pourrait témoigner d'usages anciens, il est possible d'utiliser le caractère bioindicateur de la flore. Des valeurs indicatrices ont été calculées (GEGOUT *et al.* 2002, 2003), et il est aussi possible d'utiliser les indices d'Ellenberg (ELLENBERG 1988), ou les caractéristiques données par les flores, notamment la flore forestière française (RAMEAU *et al.* 1989, 2000, 2008). Ceci fait néanmoins le lien vers l'approche flore développée par ailleurs, certaines espèces de forêt récente étant présentes du fait des caractéristiques des anciens sols agricoles¹.

Moyens humains, techniques et financiers

Certains indices de surface peuvent probablement faire l'objet de recherches préalables par des non spécialistes. L'identification des indices plus discrets, tels que de petites variations topographiques, nécessite un œil plus averti de spécialiste, ou l'utilisation du LiDAR aéroporté. L'exploitation des cartes anciennes et la spatialisation des données nécessitent les outils et compétences de la géomatique.

En ce qui concerne la recherche de mobilier archéologique, des prospections de surface peuvent permettre d'identifier des artefacts (par exemple des tessons ou des restes de tuiles) en surface, au niveau de taupinières ou de galettes de chablis. Toute recherche en profondeur doit en revanche être effectuée par des archéologues disposant des autorisations adéquates : la mise à jour de vestiges sans méthodologie et cadre est en effet non seulement illégale, mais elle rend ensuite impossible l'analyse du contexte et la datation du site. Concernant l'analyse du sol, la réalisation d'un profil pédologique avec description des différents horizons nécessite des compétences en pédologie. Les analyses des propriétés physico-chimiques du sol sont à réaliser par des laboratoires dûment équipés¹⁸. Les prélèvements nécessitent en revanche des compétences plus limitées en pédologie, moyennant le respect d'un protocole de prélèvement (choix de l'horizon à analyser, généralement dans l'horizon organo-minéral (A) situé juste sous l'humus, distinction entre humus et horizon A, etc.).

Les analyses chimiques de sol peuvent être réalisées par le Laboratoire d'analyse des sols (LAS) d'Aras (INRA), à l'exception du $\delta^{15}\text{N}$ pour lequel il faut s'adresser à l'INRA de Reims ou à la plate-forme technique d'écologie fonctionnelle de l'INRA de Nancy. Ces analyses nécessitent un certain budget, sachant qu'elles sont à multiplier afin de pouvoir être interprétées statistiquement. A titre indicatif et pour un seul échantillon, la préparation préalable aux analyses (prise en charge, broyage...) revient à une quinzaine d'euros, l'analyse du pH à quelques euros, le dosage du carbone organique et de l'azote total coûtent moins de dix euros, l'analyse du phosphore assimilable entre 6 et 15 € selon les méthodes employées (classement Duchaufour, Olsen, Joret-Hébert ou Dyer), ce qui porte l'ensemble de ces analyses à entre 30 et 40 €, auxquels il faut encore ajouter entre 15 et 25 € pour le taux de saturation (S/T) et certains cations, sans compter le $\delta^{15}\text{N}$.

Concernant le LiDAR aéroporté et pour la France métropolitaine, un opérateur disposant d'un avion équipé (équipe LiDAR-CIRCLE, CNRS-Université de Caen « Morphodynamique Continentale et Côtière ») indique¹⁹ un coût au km² de l'ordre de 250 € pour des surfaces d'études de plus de 100 km² (pour des surfaces plus petites, des frais incompressibles augmentent sensiblement les coûts). Enfin, l'interprétation des données brutes nécessite des outils et des compétences adaptées.

¹⁸ Elles peuvent par exemple être envoyées pour analyse au Laboratoire d'Analyses des Sols d'Arras (LAS)

¹⁹ http://www.unicaen.fr/circle/IMG/pdf/presentation_lidar_m2c_caen.pdf

Conclusion

En première approche, la recherche en surface d'indices d'usages anciens peut être la plus accessible financièrement et techniquement. Si les surfaces à prospector ne sont pas trop importantes, un opérateur au sol peut ainsi rechercher des traces d'usages anthropiques anciens (restes de murs, de bâtiments, de terrasses, terrassement ou excavations...), et orienter des recherches supplémentaires (utilisation d'indicateurs floristique, analyses de sol, prospections archéologiques...). Il est aussi possible de mettre en évidence d'anciens usages forestiers (bornes, traces laissées par le charbonnage...). Ces recherches peuvent utilement être faites en complément et en marge d'autres prospections de terrains pour d'autres approches (inventaires naturalistes, sylvicoles...)²⁰.

Des traces plus discrètes peuvent aussi témoigner d'aménagements anciens (anomalies de topographie par exemple), mais nécessitent un œil plus averti, engendrant des coûts plus importants. Si l'objectif est l'étude systématique d'un massif forestier de surface importante (une ou plusieurs centaines d'hectares), l'usage du LiDAR aéroporté peut être pertinent, surtout si les moyens peuvent être mutualisés avec d'autres partenaires (à l'occasion d'une campagne de recherches archéologiques par exemple).

L'analyse de la structure et de la chimie des sols peut aussi permettre d'identifier des usages anciens non forestiers, en particulier la mise en évidence d'anomalies dans les pH, le taux de phosphore assimilable, les taux de carbone organique et d'azote ainsi que le rapport entre les deux (C/N), et enfin l'abondance de l'isotope 15 de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$). Il est en effet bien avéré que le pH et le taux de phosphore assimilable demeure durablement plus élevé suite à un épisode d'occupation humaine (habitation, jardin, culture, pré amendé et fertilisé, pâturage intensif) que dans les forêts immémoriales. Ces activités laissent également des taux de carbone organique et des C/N plus faible, ainsi que des $\delta^{15}\text{N}$ plus élevés. Aucun seuil n'existe dans l'absolu, et c'est la mise en évidence de valeurs localement différentes dans des contextes écologiques et des peuplements forestiers différents (d'où le terme d'anomalie) qui peut permettre de mettre en évidence des usages anciens. Comme le LiDAR aéroporté, de telles analyses impliquent un coût important, la multiplication des points de prélèvement étant nécessaire pour avoir des résultats statistiquement interprétables.

Les différentes approches (indices présents en surface, archéologie, analyse pédologique) ont toutes deux points communs. En dehors de l'humus, aucune ne semble être une approche possible de la maturité des peuplements. En outre, elles permettent seulement la mise en évidence des usages anciens non forestiers les plus intensifs (habitation ou activité artisanale, culture ou prés avec amendement, fertilisation, irrigation, pâturage assez intensif voire travail du sol). Il est beaucoup plus difficile de mettre en évidence d'anciennes périodes de déboisement avec usage agricole extensif (pacage extensif), pratiques particulièrement répandues dans le massif central, et en maillage parfois intime avec les anciens massifs forestiers. Ces approches sont donc à croiser avec les autres, notamment l'utilisation de la flore indicatrice d'ancienneté¹.

La biodiversité du sol serait également à étudier, non seulement la flore et la fonge, mais aussi la microfaune du sol, élément indispensable de la vie du sol.

Bibliographie

BADEAU V., DAMBRINE E. & WALTER C. 1999. Propriété des Sols Forestiers Français : Résultats du premier Inventaire Systématique. *Etude et Gestion des Sols* 6 : 165–180.

BELLEMARE J., MOTZKIN G. & FOSTER D.R. 2002. Legacies of the agricultural past in the forested present: an assessment of historical land-use effects on rich mesic forests. *Journal of Biogeography* 29 :1401-1420.

BERNIER N. & PONGE J.-F. 1994. Humus form dynamics during the sylvogenetic cycle in a mountain spruce forest. *Soil Biology and Biochemistry* 26 183–220.

BERTRAND E. 1996. Les sites antiques. *La Lettre du Pays de Tronçais*, 1-48.

²⁰ Voir les autres indicateurs et outils, notamment « « Méthode d'identification et de caractérisation des forêts anciennes grâce aux archives forestières », « Cartographier les forêts anciennes à partir des cartes d'État-major », par Raphaël BEC (IPAMAC) & Anne VILLEMÉY (CBN Massif central) » et « Des listes d'espèces indicatrices à un outil opérationnel pour identifier les forêts anciennes et récentes à partir de la flore vasculaire.

BOUDIN G. & BRUN 1999. - *Ouvertures forestières et diversité fonctionnelle des humus. L'exemple d'une sapinière des Alpes intermédiaires du Sud : Le bois de Tavanet (Bassin de Gap-Chaudun, Hautes-Alpes)*. Cemagref, Grenoble.

BOURDET J.R. 2000. - *Analyse spatiale des relations entre utilisation ancienne du sol et caractéristiques du milieu forestier*. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du titre d'ingénieur des techniques agricoles, INRA-Nancy, 125 p.

BURGER K. 2007. - *Impact des anciennes formes d'utilisation sur les sols forestiers dans les Vosges et en Forêt Noire*. In : Actes du colloque « Forêt, archéologie et environnement » 14 - 16 décembre 2004 : 175-180.

CANER L., BOUDIN G. & BRIN J.-J. 2000. - Ouverture forestières et diversité fonctionnelles des humus - L'exemple d'une sapinière des Alpes intermédiaires du sud : le bois de Tavanet (Bassin de Gap - Chaudun, Hautes-Alpes) - Rapport intermédiaire n°2 - Problématique et objectifs scientifiques, premiers résultats (CEMAGREF GIP ECOFOR "Biodiversité et gestion forestière").

CELLE J., HUGONNOT V. & RENAUX B. 2014. - Intérêt des bryophytes des micro-habitats pour le diagnostic fonctionnel des phytocénoses forestières : l'exemple de la Forêt domaniale des Chambons (Ardèche, France). *Terre et Vie* **69** : 85-98.

COMPTON J.E. & BOONE R.D. 2000. - Long-term impacts of agriculture on organic matter pools and nitrogen transformations in central New England forests. *Ecology* **81** : 2314-2330.

COMPTON J.E., BOONE R.D., MOTZKIN G. & FOSTER D.R. 1998. Soil carbon and nitrogen in a pine-oak sand plain in central Massachusetts: role of vegetation and land-use history. *Oecologia* **116** : 536-542.

DAMBRINE E., DUPOUEY J.-L., LAÛT L., HUMBERT L., THINON M., BEAUFILS T. & RICHARD H. 2007. - Present forest biodiversity patterns in France related to former Roman agriculture. *Ecology* **88** : 1430-1439.

DUCHAUFOR P. 1968. - *L'évolution des sols: Essai sur la dynamique des profils*. Masson et Cie, Paris, 93 p.

DUPOUEY J.-L. & DAMBRINE, E.C. 2004. - Programme GIP-Ecofor "Biodiversité et gestion forestière". Variations de la biodiversité forestière résultant des pratiques agricoles passées : importance spatiale et mécanismes de maintien (INRA - GIP ECOFOR).

DUPOUEY J.-L., SCIAMA D., KOERNER W., DAMBRINE É. & RAMEAU J.-C. 2002. - La végétation des forêts anciennes. *Revue Forestière Française* **54** : 521-532.

DUPOUEY J.-L., DAMBRINE E., LAFFITE J.-D. & MOARES C. 2002b. - Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity. *Ecology* **83** : 2978-2984.

DUPOUEY J.-L., SCIAMA D., LAFFITE J.-D., GEORGES-LEROY M. & DAMBRINE E. 2004. - Impact des usages agricoles antiques sur la végétation en forêt de Saint-Amond: interaction avec le traitement sylvicole actuel. In Actes du colloque «La Mémoire Des Forêts», Nancy, 14-16.

ELLENBERG H. 1988. - *Vegetation ecology of Central Europe*. Cambridge University Press, Cambridge, 731 p.

FREY-KLETT P., BOUSSOUEL N., DUPOUEY J.L. & DAMBRINE E. 2003. - Impact of past land use on bacterial communities in forest soils. In *History and Forest Biodiversity - Challenges for Conservation*, IUFRO Symposium, 13-15 Janvier, Université Catholique de Leuven, Belgique [Poster].

GEBHARDT A. 2007. - Impacts anthropiques anciens sur les sols forestiers. Quelques études de cas en contexte archéologique et expérimental. In : Actes du colloque « Forêt, archéologie et environnement » 14 - 16 décembre 2004

GEBHARDT A. *et al.* 2010. - *L'histoire des forêts lues dans les archives du sol*. Poster réalisé pour le Festival International de Géographie « La forêt or vert des hommes ? Gestion, protection, exploitation durable. Adresse URL : <http://mappemonde-archive.mgm.fr/num27/fig10/fig10307.html>.

GEGOUT J.-C., COUDUN C., BRISSE H. & BERGES L. 2002. - *Comportement écologique des espèces forestières vis-à-vis du climat et du sol en France : Application à l'évaluation des charges critiques d'acidité et d'azote*. Rapport scientifique intermédiaire ADEME n° 9962003, 2001 : 104 p.

- GEGOUT J.-C., HERVE J.-C., HOULLIER F. & PIERRAT J.-C. 2003. - Prediction of forest soil nutrient status using vegetation. *Journal of Vegetation Science* 14 : 55–62.
- GEGOUT J.-C., COUDUN C., BAILLY G. & JABIOL B. 2005. - EcoPlant: a forest sites database to link floristic data with soil resources and climatic conditions. *Journal of Vegetation Science* 16 : 257–260.
- GEORGES-LEROY M., BOCK J., DAMBRINE É. & DUPOUEY J.-L. 2011. - Apport du lidar à la connaissance de l'histoire de l'occupation du sol en forêt de Haye. *ArchéoSciences* : 117–129.
- GOEPP S. 2007. - *Origine, histoire et dynamique des Hautes-Chaumes du massif vosgien. Déterminismes environnementaux et actions de l'Homme*. Sciences de l'Homme et Société. Université Louis Pasteur. HAL Id : tel-00553049, version 1
- GUILLET B. 1974. - Le problème de l'évolution des podzols vosgiens et ses relations avec l'histoire de la végétation. *Revue Forestière Française* XXVI(1) : 31-44.
- HUMBERT L. 2003. - *Évolution du paysage forestier à l'époque gallo-romaine, approche pédoanthracologique*. Diplôme supérieur d'écologie forestière, INRA et Université de Nancy I.
- HÜTTL R.F. & SCHAAF W. 1995. - Nutrient supply of forest soils in relation to management and site history. *Plant and Soil* 168 : 31–41.
- JOHANNISSON C. & HOEGBERG P. 1994. - ^{15}N abundance of soils and plants along an experimentally induced forest nitrogen supply gradient. *Oecologia* 97(3) : 322-325.
- JUSSY J.-H., KOERNER W., DAMBRINE É., DUPOUEY J.-L. & BENOIT M. 2002. - Influence of former agricultural land use on net nitrate production in forest soils. *European Journal of Soil Science* 53 : 367-374.
- KOERNER W., DUPOUEY J.L., DAMBRINE E. & BENOIT M. 1997. - Influence of Past Land Use on the Vegetation and Soils of Present Day Forest in the Vosges Mountains, France. *The Journal of Ecology* 85 : 351.
- KOERNER W., DAMBRINE E., DUPOUEY J.L. & BENOIT M. 1999. - $\delta^{15}\text{N}$ of forest soil and understorey vegetation reflect the former agricultural land use. *Oecologia* 121 : 421-425.
- KOERNER W., BENOIT M., DAMBRINE E. & DUPOUEY J.L. 2001. - Influence des anciennes pratiques agricoles sur la végétation et les sols des forêts créées dans le massif vosgien. *Revue Forestière Française* LI (2) : 231-238.
- LAFFITE J.D., DAMBRINE E. & LEROY M. 2002. - Le parcellaire Gallo-Romain de la Forêt domaniale de Saint-Amond à Favières (Meurthe et Moselle). *Revue Archéologique de l'Est* 51 : 465-476.
- LANGOHR R. 1990. - L'homme et les processus d'érosion des sols limoneux de Belgique et du Nord-Ouest de la France. In *Les Celtes en France du Nord et en Belgique, VIe-1er siècle avant J.-C.*, 211-222.
- LATHUILLIERE L., LE COQUEN M. & RENAUX B. 2015. Le Pin sylvestre en Auvergne: approche phytoécologique et historique. In *Actes des secondes Rencontres végétales du Massif central - Limoges, 2012* : 123–134.
- LAÛT L. 2001. - *L'occupation du sol dans l'Antiquité en forêt de Tronçais. Prospection-Inventaire - Prospection thématique annuelle – Sondages*. DFS, SRA Auvergne, 120 p.
- LAÛT L. 2004. - Le paysage antique de la forêt de Tronçais, bilan des travaux d'E. Bertrand et des recherches récentes. *Bulletin de la Société des Amis de la Forêt de Tronçais*, 49, Moulins, p.49-88.
- LAÛT L. 2007. - La mémoire des forêts. In *Actes du colloque « forêt, archéologie et environnement » du 14-16 décembre 2004*, (Nancy: Office national des forêts : Institut national de la recherche agronomique ; Direction régionale des affaires culturelles de Lorraine), 99-107.
- LAÛT L. 2011. - *Le site des Petits Jardins à Isle-et-Bardais (03), du sanctuaire antique à l'atelier de tuilier du haut moyen âge*. Auvergne. Circonscription des antiquités préhistoriques et historiques. Clermont-Ferrand : Circonscription des antiquités d'Auvergne, Archéologie en Auvergne (Collection). chalshs-00744300

LAÛT L., DUPOUEY J.L., DAMBRINE E. & HUMBERT L. 2015. - La forêt domaniale de Tronçais, approches archéologiques et environnementales de l'occupation antique, *actes du VIIIème colloque AGER de Rennes : Silva et Saltus en Gaule romaine : dynamique et gestion des forêts et des zones rurales marginales (friches, landes, marais...), 27-28 octobre 2004.*

LEMOULAND Q. 2002. - *Impact de l'occupation gallo-romaine sur la flore actuelle en forêt de Haye (54) : nouveaux outils pour la prospection et la détermination du risque archéologique en milieu forestier.*

MAUSSION A. 2003. - *Occupation ancienne du sol et milieux forestiers actuels en France métropolitaine - Synthèse bibliographique.* INRA, Nancy.

MOARES C., SCIAMA D., DAMBRINE E., DUPOUEY J.L., GEGOUT J.C. & BRECHET C. 2001. - Évolution des stocks de carbone et de la disponibilité de l'azote lors de la dynamique de recolonisation des prairies abandonnées du Jura. *Etude et Gestion des Sols 2* : 119-144.

PARADIS-GRENOUILLET S., ALLEE P., SERVERA VIVES G. & PLOQUIN A. 2014. - Sustainable management of metallurgical forest on Mont Lozère (France) during the Early Middle Ages. *Environmental Archaeology.*

PETERKEN G.F. & GAME M. 1984. - Historical Factors Affecting the Number and Distribution of Vascular Plant Species in the Woodlands of Central Lincolnshire. *The Journal of Ecology 72* : 155.

PONGE J.-F. & BERNIER N. 1995. - Changes in humus form and forest dynamics in the French Northern Alps. *Functioning and Dynamics of Natural and Perturbed Ecosystems*, 174-182.

PREVOSTO B., CURT T., DAMBRINE E. & COQUILLARD P. 2004. - Natural tree colonization of former agricultural lands in the French Massif Central: impact of past land use on stand structure, soil characteristics and understorey vegetation. *In Forest Biodiversity: Lessons from History for Conservation*, O. Honnay, K. Verheyen, B. Bossuyt, and M. Hermy, eds. (Wallingford: CABI) : 41-53.

RAMEAU J.-C. 1996. - *Réflexion syntaxonomiques et synsystématiques au sein des complexes sylvatiques français.* ENGREF, 230 p.

RAMEAU J.-C., MANSION D. & DUMÉ G. 1989. - *Flore forestière française, guide écologique forestier.* Tome 2 : plaine et colline, IDF, 1785 p.

RAMEAU J.-C., GAUBERVILLE C. & DRAPIER N. 2000. - *Gestion forestière et diversité biologique : France, domaine continental.* IDF, 114 p.

RAMEAU J.-C., MANSION D., DUME G. & GAUBERVILLE C. 2008. - *Flore forestière française, guide écologique forestier.* Tome 3 : Région méditerranéenne. IDF, 2426 p.

RICHARD H. 2003. - *Forêt de Tronçais, Le Brethon et Saint- Bonnet-Tronçais (03), tests polliniques* (Besançon). Rapport, 3 p.

ROUAUD R. 2013. - *Les forêts de pente de la haute vallée de la Dordogne: enjeux écologiques et énergétiques d'une ancienne forêt charbonnée (Auvergne, Limousin, France).* Thèse, Université de Limoges.

SALMON S., MANTEL J., FRIZZERA L. & ZANELLA A. 2006. - Changes in humus forms and soil animal communities in two developmental phases of Norway spruce on an acidic substrate. *Forest Ecology and Management 237* : 47-56.

SCIAMA D. 1999. - *Dynamique de la végétation forestière dans les terrains en déprise agricole en Petite Montagne jurassienne.* Thèse de Doctorat de l'ENGREF, 268 p. + annexes.

STOKLAND J., TOMTER S. & SÖDERBERG U. 2004. - Development of dead wood indicators for biodiversity monitoring: experiences from Scandinavia. *In Monitoring and Indicators of Forest Biodiversity in Europe - From Ideas to Operationality*, EFI Workshop, November 12th-15th 2003, Firenze, Italy, Vol. 51 : 207-226., (in Marchetti, M. (Ed)).

VALLAURI D., ANDRE J. & BLONDEL J. 2002. - *Le bois mort, un attribut vital de la biodiversité de la forêt naturelle, une lacune des forêts gérées.* WWF, 34 p.

ZAITSEV A.S., CHAUVAT M., PFLUG A. & WOLTERS V. 2002. - Oribatid mite diversity and community dynamics in a spruce chronosequence. *Soil Biology and Biochemistry 34* : 1919-1927.