Reconstitution de la dynamique forestière par l'analyse de la matière organique des sols par spectroscopie proche infrarouge : l'exemple d'un terroir médiéval abandonné, l'Elmerforst (Bas-Rhin)

Damien Ertlen[a] – **Lucie Froehlicher**[a] – **Boris Dottori**[b] – **Dominique Schwartz**[a]

SITUATION ET CONTEXTE

La forêt de l'Elmerforst

La forêt de l'Elmerforst se situe dans le département du Bas-Rhin sur le piémont vosgien à l'interface entre le massif du Schneeberg et le fossé rhénan. Elle devient progressivement propriété de l'Œuvre Notre-Dame entre la fin du XIII^{e} siècle et le début du XVII^{e} siècle (Dottori, 2011). Elle couvre une superficie de 362 ha et est comprise dans un vaste secteur forestier qui comprend, entre autres, la forêt de Westhoffen, la forêt de l'Oedenwald et la forêt domaniale de Haslach (figure 1, p. 456). La forêt est gérée par l'Office national des forêts (ONF). Elle est traitée en futaie régulière de Chêne sessile (70 %), Hêtre (17 %) et Pin sylvestre (10 %). Les peuplements et leurs évolutions sont bien connus depuis le XIX^{e} siècle grâce aux registres forestiers. Les proportions sont restées relativement stables même si certaines parcelles ont évolué. En revanche, pour les périodes antérieures très peu d'informations sont disponibles. Les sols sont tous développés sur des grès ou sur des formations superficielles issues du démantèlement des grès. Ce sont pour la plupart des sols bruns acides sableux et drainants (Alocrisols du *Référentiel pédologique*, Cambisols acides de la WRB) avec une tendance à la podzolisation pour certains.

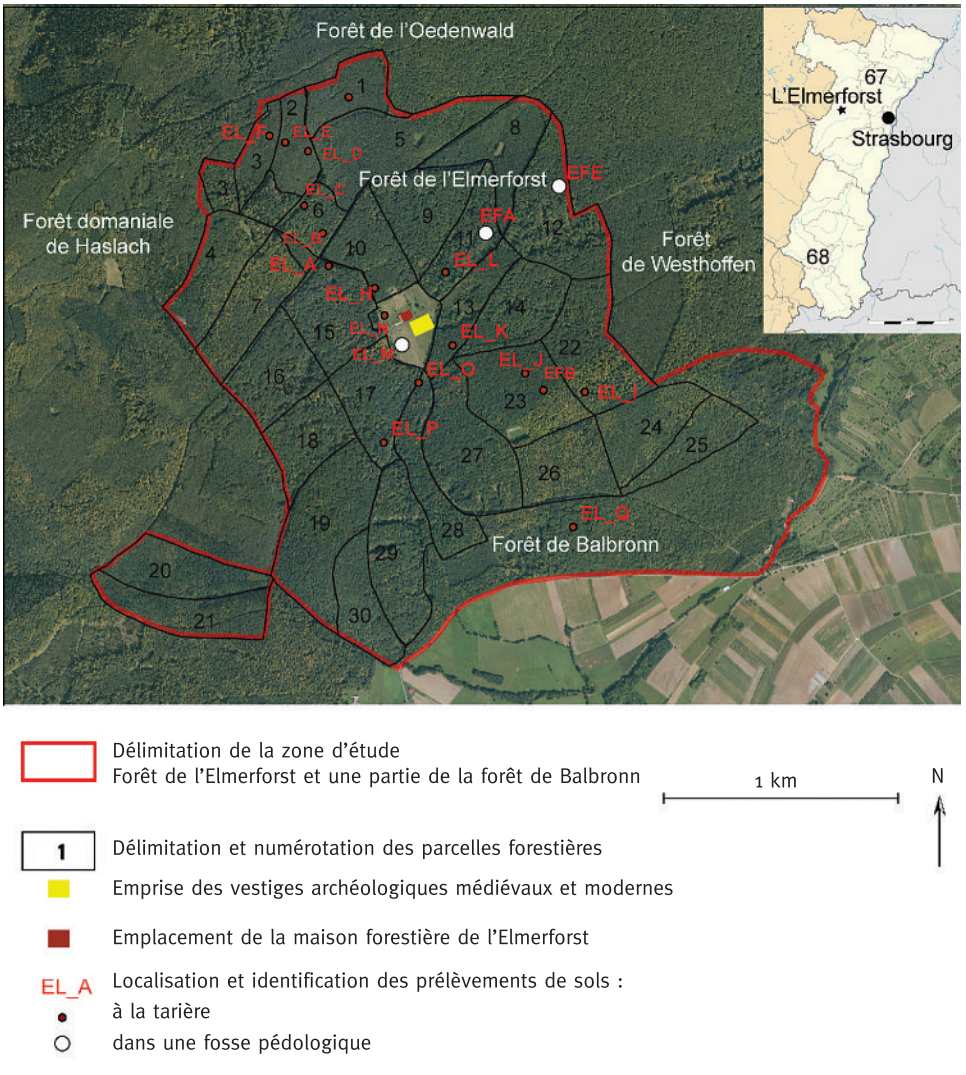
Le contexte scientifique

Des études pédologiques et paléoenvironnementales menées par l'université de Strasbourg y ont démarré en 2007. Dans le cadre d'un travail de thèse à portée méthodologique (Ertlen, 2009), des sites forestiers anciens étaient recherchés (Ertlen et Schwartz, 2010). Les titres de propriété anciens déjà mentionnés par certains historiens ont attiré l'attention et ont été considérés comme un gage d'ancienneté de la forêt. Dans un second temps, et de façon un peu fortuite, une collaboration s'est engagée avec un archéologue, qui avait démarré de son côté des recherches dans la clairière située au cœur de la forêt de l'Elmerforst. Des fouilles archéologiques ont confirmé la

a Laboratoire Image, Ville, Environnement, UMR 7362 Unistra/CNRS, F-67000 Strasbourg, France
b INRAP Grand Est Sud, F-67100 Strasbourg, France

présence d'un hameau médiéval, disparu à l'époque moderne et construit autour d'une chapelle qui a subsisté jusque dans les années 1940. La combinaison de ces éléments ainsi qu'un certain nombre de données cartographiques laissaient entrevoir un territoire forestier ancien avec, en son centre, un modeste terroir agricole qui s'est progressivement refermé pour ne laisser que la clairière actuelle où se trouve la maison forestière. C'est cette dynamique de l'occupation du sol que nous avons voulu vérifier et nous avons fait l'hypothèse que ces occupations anciennes étaient encore détectables dans les sols et plus particulièrement dans leur matière organique. En effet, la matière organique des sols (MOS) est renouvelée en permanence par l'activité biologique, mais plus ou moins rapidement en fonction de la profondeur. Dans nos régions, le temps moyen de

Figure 1 **PARCELLAIRE ACTUEL DE LA FORÊT DE L'ELMERFORST ET LOCALISATION DES PRÉLÈVEMENTS DE SOLS**



résidence de la MOS présente un gradient de l'ordre de 250 ans par 10 cm (Guillet, 1979). Il est dès lors possible de retrouver des constituants (macromolécules, marquage isotopique naturel en ^{15}N ou ^{13}C…) témoignant de végétations anciennes ou d'une occupation du sol passée (Schwartz, 1991 ; Koerner, 1999 ; Schwartz *et al.*, 2015). Ici nous avons testé la signature des MOS dans le proche infrarouge.

Une méthode innovante

La spectroscopie proche infrarouge (SPIR) est très utilisée en science du sol depuis une quinzaine d'années parce qu'elle permet de prédire à moindre coût et simultanément un grand nombre de paramètres pédologiques. Le spectre proche infrarouge est aussi considéré comme l'empreinte digitale de la matière organique (Palmborg et Nordgren, 1996). Partant de ce constat, une approche qualitative a été développée (Ertlen, 2009 ; Ertlen *et al.*, 2010) afin de reconnaître l'origine de la matière organique. Un référentiel de spectres mesurés sur des sols couvrant un large panel d'écosystèmes du domaine tempéré permet par comparaison de classer des échantillons de sols dont l'histoire est inconnue. La matière organique des sols provenant en grande partie de la végétation, cet outil permet de reconstituer les dynamiques de la végétation. Comme d'autres archives pédologiques (Schwartz, 2012), cet outil présente l'avantage de fournir un signal local et ainsi d'offrir la possibilité de spatialiser finement les informations paléoenvironnementales collectées. En revanche, la bioturbation des matières organiques rend compliquée la lecture du temps dans les sols (Schwartz, 2012) et ne permet pas d'obtenir des résultats avec une grande résolution temporelle. Cependant le croisement avec des données historiques et archéologiques nous permet de tester l'hypothèse énoncée plus haut.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les sols échantillonnés

Les sols ont été échantillonnés sur le territoire de l'Elmerforst en 20 points différents suivant deux transects orientés respectivement NO-SE et NE-SO (figure 1, p. 456). Les prélèvements ont été effectués à la tarière à gouge, sauf pour les points EFA, EFE et EL_M, pour lesquels une fosse pédologique a été creusée. L'échantillonnage s'est fait de façon systématique par tranches de 5 cm de profondeur jusqu'aux altérites du grès, qui ont été toujours atteintes à moins d'un mètre de profondeur. Il en résulte un total de 248 échantillons prélevés.

Les mesures en laboratoire

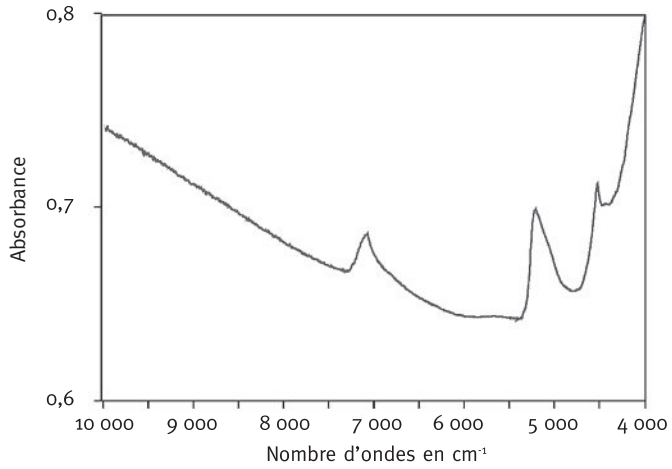
Au laboratoire, les sols ont été séchés à l'air libre pendant 7 jours puis tamisés à 2 mm. Des mesures de pH et de carbone organique ont été effectuées sur une partie des échantillons. Les profils O, P, Q, E et K ont des pH compris entre 3,4 et 4,4 tandis que les profils A, B, C, D, F, G, H, I, J et L ont des pH compris entre 5 et 6. Seuls les profils actuellement sous prairie (M et N) ont des pH supérieurs à 6 qui traduisent très probablement la pratique d'amendements. La répartition verticale de la matière organique est très similaire pour l'ensemble des profils et typique des sols bruns forestiers, à savoir, des teneurs importantes en carbone organique comprises entre 2 % et 8 % dans des horizons A peu épais et une décroissance rapide avec la profondeur. Les deux sols sous prairie ont des taux de matière organique autour de 3 % dans des horizons A plus épais et des taux très similaires aux profils forestiers en profondeur.

Pour la totalité des échantillons, la réflectance dans le proche infrarouge a été mesurée à l'aide d'un spectromètre à transformée de Fourier en utilisant une séparatrice au KBr et un détecteur

de type InGaAs et une coupelle rotative d'un diamètre de 9 cm (Frontier, PerkinElmer, États-Unis). Le spectre obtenu est la moyenne de 30 balayages sur une surface d'environ 1 cm². Grâce à la coupelle rotative chaque balayage est effectué sur un sous-échantillon différent, ce qui équivaut à 30 répétitions de la mesure.

La réflectance (R) est ensuite transformée en absorbance (A) suivant la formule A = log(1/R) (figure 2, ci-dessous). L'ensemble des spectres sont ensuite standardisés (centrés et réduits), puis une dérivée d'ordre 1 est calculée afin de s'affranchir de l'effet des variations de quantité de matière organique et se focaliser sur la qualité et l'origine de la matière organique (Ertlen, 2009).

Figure 2 **EXEMPLE D'UN SPECTRE PROCHE INFRAROUGE MESURÉ SUR UN ÉCHANTILLON DE SOL ET TRANSFORMÉ EN ABSORBANCE (A)**



Le référentiel de spectres proche infrarouge

En l'état actuel, le référentiel utilisé comprend 1 315 spectres correspondant à autant d'échantillons de sols provenant de 86 sites et prélevés dans les horizons de surface (0-4 cm). Ils ont été collectés dans le cadre des travaux d'Ertlen (2009), Vyslouzilova (2014) et Froehlicher (2016). Parmi les 86 sites, 9 sont des sites cultivés, 40 sont des sites prairiaux et 36 des sites forestiers. Les sites sont répartis entre le massif vosgien et les plaines hongroises. Ils couvrent une grande partie de la diversité pédologique et biogéographique de l'Europe tempérée. Le sols bruns forestiers, tels que ceux échantillonnés à l'Elmerforst, sont représentés dans le référentiel sans être dominants. Pour chacun des 86 sites, une étude historique a permis de garantir une ancienneté et une stabilité minimale du couvert végétal de 150 ans (Ertlen et Schwartz, 2010 ; Ertlen *et al.*, 2010). Pour certains sites remarquables la stabilité a été attestée au-delà de 150 ans. La forêt de Salajka, par exemple, située dans le massif des Beskidy en République tchèque est attestée depuis au moins 500 ans (Žárník *et al.*, 2006) tandis que les chaumes vosgiennes sommitales du massif du Hohneck sont attestées depuis l'âge du Bronze (Goepp, 2009). Pour séparer les différents groupes d'occupation des sols, nous utilisons des analyses discriminantes (Ertlen *et al.*, 2010). Les spectres proche infrarouge sont constitués de 350 bandes spectrales et chacune de ces bandes est introduite dans le modèle en tant que variable. Les trois principaux groupes de sols sont séparés sans erreur de classement pour le groupe de sols cultivés et avec moins de 1 % de sols mal classés pour les sols sous prairie et les sols sous forêt (figure 4, p. 461). La distance la plus grande sépare, sur la fonction 1, les sols cultivés des autres sols. Cependant,

Vyslouzilova (2014) et Froehlicher (2016) ont mis en avant un certain nombre de limites concernant la fiabilité du référentiel de sols cultivés. En particulier, ces sols sont presque tous carbonatés. Or les carbonates absorbent également une partie de l'énergie dans le proche infrarouge. Ainsi, Vyslouzilova (2014) observe une tendance forte des sols peu organiques et fortement carbonatés à se classer dans le groupe des sols cultivés y compris quand cette hypothèse est fortement remise en question par d'autres données indépendantes. Dans le cas des sols de l'Elmerforst, exclusivement acides, ce biais devrait être évité. La fonction 2 permet de séparer les sols sous forêt des sols sous prairie.

LE TERRITOIRE DE L'ELMERFORST AU MOYEN ÂGE ET À L'ÉPOQUE MODERNE

Les données historiques et cartographiques

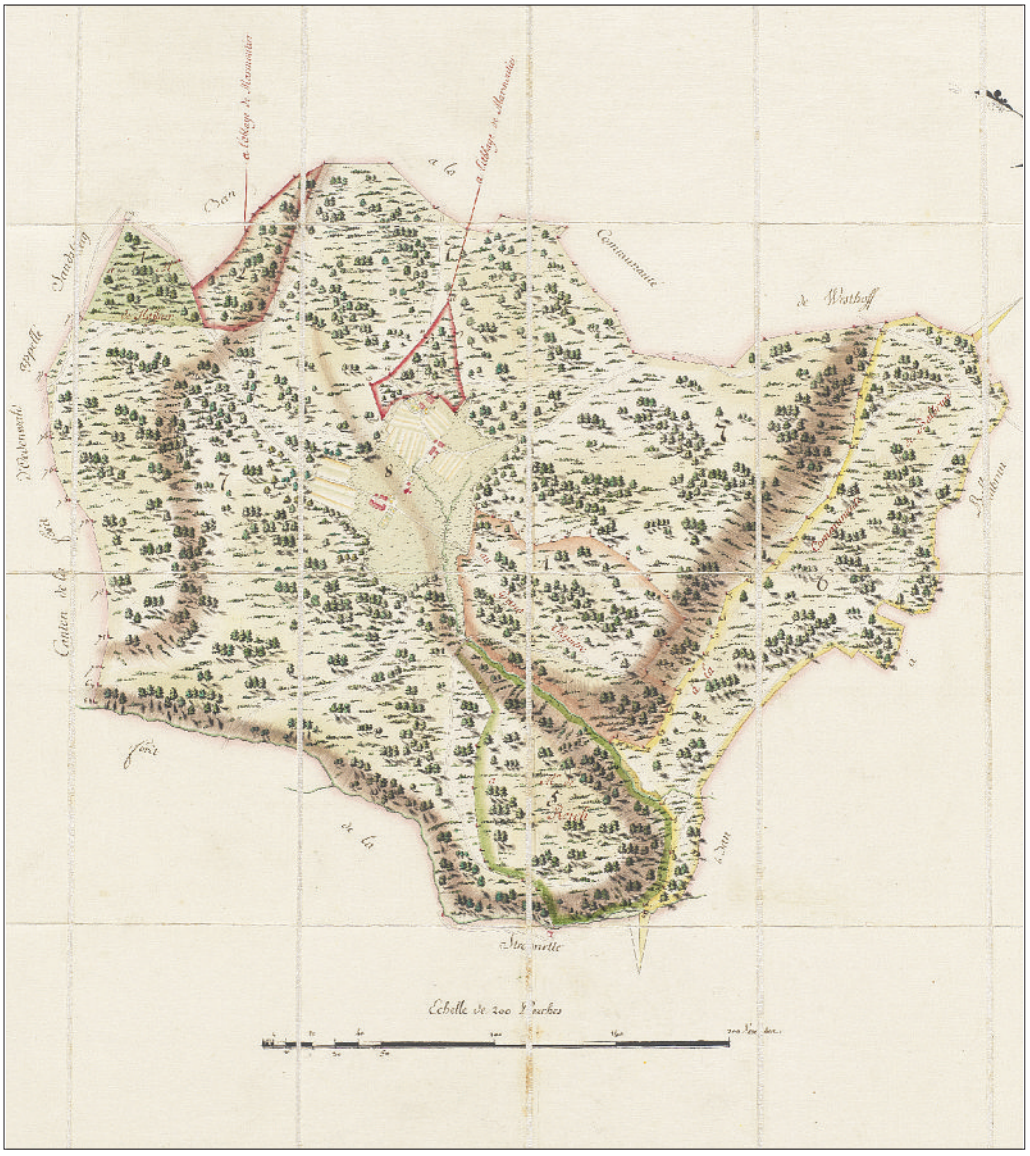
Les données historiques n'apportent qu'une vision partielle des cultures pratiquées à Elbersforst au cours de la période médiévale. L'élément qui revient le plus souvent dans les sources d'époque médiévale est la forêt. Le nom même de la localité, *Elbersforst*, évoque la forêt (*forst* signifiant forêt en allemand). La plus ancienne mention de la présence d'une forêt à cet endroit remonte à 1287. Nous disposons d'autres occurrences de forêts au XIV^{e} siècle : ainsi, en 1344, une forêt est citée sur la colline du Glossberg, au sud-ouest du finage. D'autres forêts sont mentionnées au XV^{e} siècle au nord-ouest, à l'est et au sud-est du ban communal. Les sources historiques relatent également la présence de prés en 1344 ; des prés sont ainsi cités, en même temps que la forêt, sur le Glossberg. D'autres prés sont mentionnés en 1365 en contrebas du village, entre l'église et le ruisseau et, en 1469, au sud du finage (Dottori, 2011). Ces données, bien que lacunaires, indiquent que la part de forêt au sein de ce territoire paraît avoir été relativement importante dès les XIII^{e}-XV^{e} siècles.

Comme évoqué, le village disparaît dans le premier tiers du XVI^{e} siècle, pour être remplacé par une exploitation forestière relevant de la fondation de l'Œuvre Notre-Dame. Nous disposons pour l'époque moderne de plusieurs plans et cartes du village et de son territoire. La première série de plans date des années 1570-1580 (Archives municipales de Strasbourg (AMS), série 1OND501 à 506). On peut ainsi citer le plan daté de 1579 réalisé par D. Specklin, qui présente une vue légèrement oblique depuis le nord-nord-ouest. Réalisé suite à un litige entre les propriétaires du domaine, le territoire est représenté avec une attention particulière accordée au bornage, tandis que sur la gauche du dessin sont représentés des bâtiments, en l'occurrence la maison forestière de l'Œuvre Notre-Dame et ses dépendances, ainsi que l'ancienne chapelle du village. Un second plan du même auteur met en avant un vaste domaine forestier ceinturé par un réseau de bornes. Les zones ouvertes sont ici représentées tout autour du massif forestier. Enfin, un troisième plan, toujours du même auteur est daté de 1582. Il présente également un bornage d'une forêt avec des zones ouvertes à l'est et à l'ouest et les mêmes bâtiments que ceux du plan précédent en partie ouest. Les tentatives de géoréférencement et de superposition de ces informations cartographiques anciennes se sont révélées infructueuses (Froehlicher, 2012). Même si certaines bornes sont encore présentes sur le terrain, il est très difficile de les associer avec celles présentes sur le plan. Quant aux bâtiments, ils semblent avoir une fonction plutôt décorative et leur position relative au massif forestier pose question. Enfin, l'extension des zones ouvertes dans lesquelles on trouve les bâtiments semble plus appartenir aux marges du document qu'à des objets cartographiés.

Le dernier document utilisé est un plan de finage datant de 1786 attribué à J. Striedbeck (figure 3, p. 460). La qualité de l'arpentage et de sa représentation cartographique est incomparable avec les documents précédents. Cette fois, la totalité du territoire de l'Elmerforst est représentée et les limites qui y apparaissent correspondent en grande partie aux contours actuels. Les bâtiments

figurés sont ceux de l'actuelle maison forestière, construite en 1755 et de l'ancienne chapelle, dont l'emplacement est connu. Par conséquent, de nombreux points d'ancrage sont à disposition pour un géoréférencement et une bonne comparaison avec la situation actuelle. Ainsi nous pouvons constater que l'extension de la clairière centrale était légèrement supérieure au XVIII^{e} siècle (de l'ordre de 10 %). La majorité de la clairière est figurée en vert évoquant des prés, tandis que deux petits secteurs au nord de la clairière ont des figurés qui sont habituellement utilisés pour des champs sur les plans du XVIII^{e} siècle.

Figure 3 **PLAN DE FINAGE DATÉ DE 1786 RÉALISÉ PAR JEAN STRIEDBECK**
Source : archives municipales de Strasbourg (AA2291)

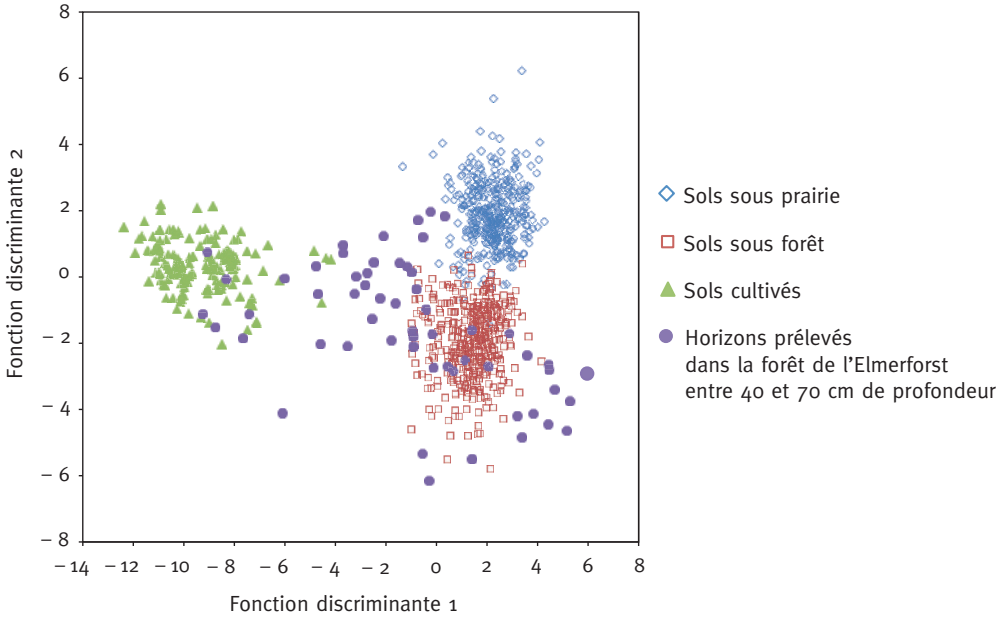


Ce que disent les sols

Les spectres mesurés à partir des sols du territoire de l'Elmerforst sont confrontés aux spectres du référentiel de sols des milieux tempérés. On calcule la position des 248 échantillons de l'Elmersforst dans le plan des axes discriminants 1 et 2 établis à partir des 1 315 spectres de référence. Sur la figure 4 (ci-dessous), par souci de clarté, nous avons choisi de présenter uniquement les échantillons de référence et les échantillons prélevés entre 40 et 70 cm de profondeur. En effet, dans les horizons superficiels, le renouvellement de la matière organique est rapide (temps moyen de résidence de l'ordre de 50-100 ans). De ce fait, la probabilité de conservation d'un signal d'occupation ancienne du sol est faible. Dans les horizons de surface, à quelques exceptions près, le signal témoigne de la végétation actuelle. Quant aux horizons les plus profonds, ce sont souvent des altérites contenant très peu de matière organique. Or Froehlicher (2015) a montré qu'en dessous de 0,25 % de carbone organique les résultats des analyses spectroscopiques devenaient incohérents. Par ailleurs, des mesures du temps moyen de résidence de la matière organique par radiocarbone effectué sur le profil EFA, indiquent des âges moyens de 300 ans à 25 cm et de 1 700 ans à 65 cm. À partir d'un modèle de décroissance de la matière organique couplé au signal proche infrarouge, Ertlen *et al.* (2015) ont proposé, pour ce profil, un changement d'occupation du sol autour de l'an mille.

Figure 4

RÉSULTATS DE L'ANALYSE DISCRIMINANTE POUR LES SPECTRES PROCHE INFRAROUGE DES SOLS DE RÉFÉRENCE (SOUS PRAIRIE, SOUS FORÊT ET CULTIVÉS) ET DES HORIZONS PROFONDS PRÉLEVÉS DANS LA FORÊT DE L'ELMERFORST

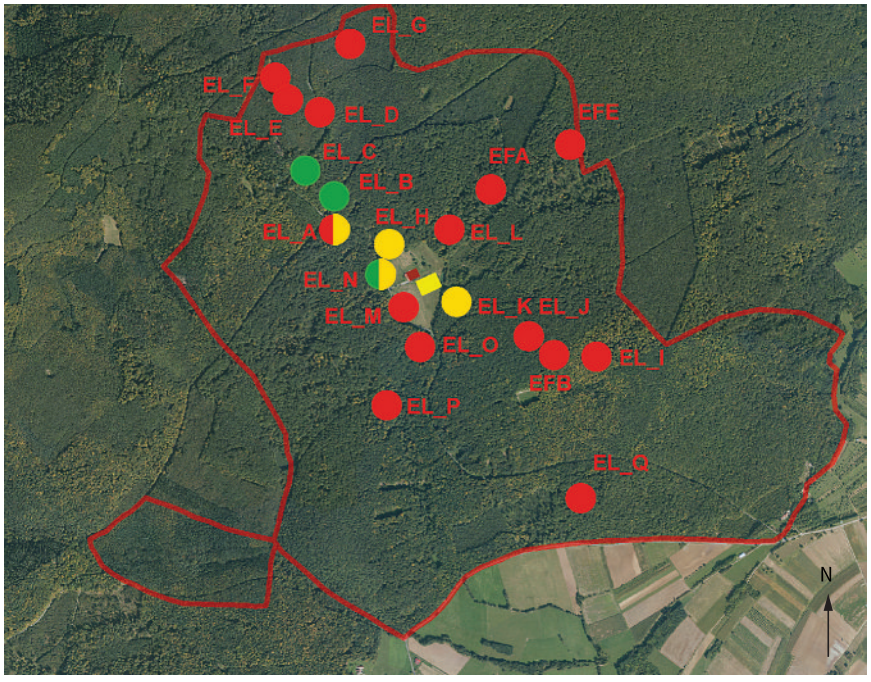


Une majorité des échantillons entre 40 et 70 cm sont classés dans la catégorie des sols sous forêt. Une partie de ces échantillons se superpose avec la population de référence tandis que d'autres ont des scores particulièrement élevés sur la fonction 1. Quelques rares échantillons sont très proches du nuage de points des sols sous prairie et sont classés comme tels par le modèle. Six échantillons se superposent au nuage de points de sols cultivés. Ceci confirme que, malgré

la relative faiblesse des références de sols cultivés et malgré le biais lié à leur nature carbonatée, des nouveaux échantillons provenant de sols acides de l'Elmerforst se classent dans la catégorie sols cultivés. Les propriétés des matières organiques provenant de sols cultivés seraient donc suffisamment spécifiques pour être isolées. Ceci étant, des travaux encore en cours tentent d'élargir cette portion du référentiel. Par ailleurs, un nombre important d'échantillons occupent une position intermédiaire, principalement entre les références sous forêt et les références cultivées. En tenant compte de la bioturbation, plutôt limitée dans ces sols très acides, il n'est pas surprenant de retrouver un nombre important de situations intermédiaires qui peuvent être interprétées comme un mélange de matière organique ancienne provenant de sols cultivés et de matière organique plus récente provenant d'une forêt installée depuis quelques siècles à peine.

En analysant la répartition spatiale de ces échantillons (figure 5, ci-dessous) nous constatons que les profils situés à la périphérie du territoire de l'Elmerforst ont un signal exclusivement forestier, y compris en profondeur.

Figure 5 **SPATIALISATION DES RÉSULTATS DE L'ANALYSE DES SOLS PAR SPECTROSCOPIE PROCHE INFRAROUGE**



Les profils EL_H et EL_K, situés sous forêt à proximité de la clairière, ont des signaux de sols cultivés en profondeur. Le profil EL_A se rapproche également du nuage de points des sols cultivés. Enfin les profils EL_B et EL_C ont des signatures prairiales en profondeur. Paradoxalement les profils EL_M et EL_N actuellement sous prairie présentent respectivement une tendance forestière en profondeur et un seul échantillon classé comme sol cultivé. Ainsi, cette carte permet d'esquisser le territoire de l'ancien village de l'Elmerforst. Au nord et au sud de l'actuelle clairière se trouvaient des zones cultivées. Les traces de cultures retrouvés au nord dans le profil EL_H pourraient correspondre à la zone encore cultivée en 1786 (*cf.* § « Les données historiques et cartographiques », p. 459). Plus au nord se trouvaient des zones de prairies, le tout ceinturé par un massif forestier.

IMPLICATIONS POUR L'HISTOIRE ET LA GESTION DES MILIEUX FORESTIERS

Ces résultats fondés principalement sur l'analyse d'archives pédologiques permettent d'esquisser des dynamiques forestières en remontant jusqu'au bas Moyen Âge. Sans remonter beaucoup plus loin dans le temps que les études fondées sur l'analyse des cartes anciennes, et tout en restant à des échelles pluriséculaires, cela permet de relativiser la notion de forêt ancienne. En effet, l'exemple du territoire de l'Elmerforst est un peu à contre courant des schémas classiques d'évolution de la forêt française puisqu'il a connu une dynamique de fermeture d'un finage à la fin du Moyen Âge et au début de l'époque moderne puis une grande stabilité au courant des XIX^{e} et XX^{e} siècles. Ainsi les forêts de l'Elmerforst sont bien anciennes si l'on se réfère au minimum forestier du XIX^{e} siècle, mais ont été pour partie cultivées à des dates antérieures. Elles n'ont une très longue continuité de l'état boisé que dans les zones périphériques du territoire.

Les archives pédologiques bien que très intéressantes du point de vue de la résolution spatiale n'offrent pas de résultat « au premier coup d'œil » comme le permettent certaines séries cartographiques. Cependant l'outil que nous développons et proposons d'appliquer plus largement permet également d'aborder les dynamiques spatiales. Ces dynamiques couplées aux résultats de l'archéologie permettent d'améliorer la compréhension des terroirs médiévaux en dépassant le périmètre des vestiges archéologiques bâtis. La résolution temporelle demeure le point faible de l'outil présenté. Cette faiblesse est inhérente à la dynamique des constituants du sol. Par conséquent, le croisement avec d'autres données historiques ou archéologiques est préférable pour mieux caler les résultats dans le temps.

Enfin, nous pouvons nous interroger sur l'état écologique actuel de ces forêts à très longue continuité de l'état boisé, et sur les différences qu'elles pourraient présenter avec les « forêts anciennes » qui se réfèrent au minimum forestier du XIX^{e} siècle. Bien que le sol semble avoir enregistré ces histoires différentes, nous ne sommes pas en mesure, faute d'études suffisantes, de les différencier sur le plan écologique. Ces forêts anciennes, et certainement gérées depuis au moins le bas Moyen Âge, ont sans doute connu des gestions et des peuplements différents au cours du temps. Le développement de notre outil qui devrait aller vers la reconnaissance de différents types de couverts forestiers devrait à terme nous permettre de retracer l'histoire du peuplement au sein des massifs forestiers anciens.

Damien ERTLEN – Lucie FROEHLICHER – Dominique SCHWARTZ
Laboratoire Image, Ville, Environnement, UMR 7362 Unistra/CNRS
3 rue de l'Argonne
F-67000 STRASBOURG
(damien.ertlen@live-cnrs.unistra.fr)
(froehlicherlucie@hotmail.fr)
(dominique.schwartz@live-cnrs.unistra.fr)

Boris DOTTORI
INRAP Grand Est Sud
Centre archéologique de Strasbourg
10 rue d'Altkirch
F-67100 STRASBOURG
(boris.dottori@inrap.fr)

BIBLIOGRAPHIE

DOTTORI B., 2011. Elbersforst (commune de Balbronn, Bas-Rhin). Histoire et archéologie d'un village aux périodes médiévale et moderne (XII^{e}-XVIII^{e} siècles). *Cahiers alsaciens d'Art, d'Archéologie et d'Histoire*, 54, pp. 79-105.

ERTLEN D., 2009. *Archivage pédologique et dynamiques environnementales : Mise au point d'une méthode de reconnaissance des paléovégétations, fondée sur l'analyse spectroscopique dans le proche infrarouge (SPIR) des matières organiques de sols et paléosols*. Université de Strasbourg. 382 p. (Thèse de doctorat).

ERTLEN D., SCHWARTZ D., 2010. Utilisation d'archives géohistoriques pour la mise au point d'une nouvelle méthode paléoécologique. *Géocarrefour*, vol. 85, n° 1, pp. 55-66.

ERTLEN D., SCHWARTZ D., TRAUTMANN M., WEBSTER R., BRUNET D., 2010. Discriminating between organic matter in soil from grass and forest by near-infrared spectroscopy. *European Journal of Soil Science*, vol. 61, n° 2, pp. 207-216.

ERTLEN D., SCHWARTZ D., BRUNET D., TRENDEL J.-M., ADAM P., SCHAEFFER P., 2015. Qualitative near infrared spectroscopy, a new tool to recognize past vegetation signature in soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 82, pp. 127-134.

FROEHLICHER L., 2012. *Paléovégétation et impact anthropique sur le terroir du village disparu de l'Elberforst*. Université de Strasbourg. 192 p. (Mémoire de master Géographie environnementale).

FROEHLICHER L., 2016. *Les haies, une alternative à l'openfield dans les zones lœssiques d'Alsace ? Perspectives historiques, systèmes agraires du futur, érosion, effets sur le colluvionnement et le stockage du carbone*. Université de Strasbourg. 466 p. (Thèse de doctorat).

GOEPP S., 2007. *Origine, histoire et dynamique des Hautes-Chaumes du massif vosgien. Déterminismes environnementaux et actions de l'Homme*. Strasbourg : Université Louis Pasteur. 286 p. (Thèse de doctorat).

GUILLET B., 1979. Étude du renouvellement des matières organiques des sols par les radioisotopes (^{14}C). pp. 210-226. *In* : *Pédologie 2. Constituants et propriétés du sol* / M. Bonneau, B. Souchier. Paris : Masson.

KOERNER W., 1999. *Impacts des anciennes utilisations agricoles sur la fertilité du milieu forestier actuel*. Paris : Université Diderot. 188 p. (Thèse de doctorat).

PALMBORG C., NORDGREN A., 1996. Partitioning the variation of microbial measurements in forest soils into heavy metal and substrate quality dependent parts by use of near infrared spectroscopy and multivariate statistics. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 28, n° 6, 1996, pp. 711-720.

SCHWARTZ D., 1991. Intérêt de la mesure du $\delta^{13}C$ des sols en milieu naturel équatorial pour la connaissance des aspects pédologiques et écologiques des relations savane-forêt. Exemples du Congo. *Cahier de l'Orstom, série Pédologie*, vol. 26, n° 4, pp. 327-341.

SCHWARTZ D., 2012. Les temps du sol : interprétations temporelles de l'archivage pédologique dans les approches paléoenvironnementalistes et géoarchéologiques. *Étude & Gestion des Sols*, vol. 19, n° 1, pp. 50-66.

SCHWARTZ D., ERTLEN D., FROEHLICHER L., VYSLOUZYLOVA B., BASTIEN C., COUREL B., SCHAEFFER P., TRENDEL J.-M., LIAUD C., MOTSCH E., ADAM P., SEFRNA L., HAJDAS I., GIERGA M., BERNASCONI S., 2015. Les archives pédologiques : des concepts de base à la gestion des écosystèmes. Nouvelles approches en spectroscopie proche infrarouge (SPIR) et sur les marqueurs moléculaires lipidiques. Apports du programme GESSOL Apogee. *Collection EDYTEM*, vol. 18, pp. 19-32.

VYSLOUZYLOVA B., 2014. *Steppes ou forêts ? Les conditions environnementales de la formation et de l'évolution des chernozems en Europe Centrale*. Prague : Université Charles ; Université de Strasbourg. 400 p. (Thèse de doctorat).

ŽÁRNÍK M., SAMEC P., FRIEDL M., 2006. *Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem, pobočka Frýdek*. The Forest Management Institute Brandýs n. L., branch Frýdek, Místek, Czech Republic. 5 p.

RECONSTITUTION DE LA DYNAMIQUE FORESTIÈRE PAR L'ANALYSE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DES SOLS PAR SPECTROSCOPIE PROCHE INFRAROUGE : L'EXEMPLE D'UN TERROIR MÉDIÉVAL ABANDONNÉ, L'ELMERFORST (BAS-RHIN) (Résumé)

La forêt de l'Elmerforst se situe sur le piémont alsacien du massif vosgien. Le nom de cette forêt garde le souvenir d'un lieu du nom d'*Elbersforst*, créé par défrichement au XII^e^ siècle et ayant disparu dans le premier tiers du XVI^e^ siècle. Le territoire de l'ancien village est progressivement racheté par la fondation de l'Œuvre Notre-Dame — institution chargée de la construction et de l'entretien de la cathédrale de Strasbourg — aux XVI^e^ et XVII^e^ siècles. Actuellement, c'est un territoire exclusivement forestier à l'exception d'une clairière centrale. Des fouilles archéologiques réalisées dans la clairière ont permis la mise au jour de vestiges relatifs à cette localité. Les archives historiques et cartographiques n'apportent quant à elles que des informations sporadiques sur les cultures pratiquées au sein de ce terroir à la période médiévale. En revanche, vingt profils de sols ont été prélevés et analysés en laboratoire par spectroscopie proche infrarouge afin de déterminer l'évolution ou la stabilité de l'occupation du sol et, le cas échéant, de cerner l'extension du terroir villageois. Plusieurs profils sous forêt proche du village témoignent d'une histoire forestière récente, postérieure à l'abandon, tandis que les profils périphériques indiquent une histoire forestière plus ancienne. À partir de ces analyses, il est possible de proposer une carte du terroir tel qu'il était exploité au Moyen Âge par une petite communauté villageoise. Les résultats permettent également de discuter de la notion de forêts anciennes qui n'ont pas toutes le même âge.

RECONSTRUCTING FOREST DYNAMICS BY NEAR-INFRARED SPECTROSCOPIC ANALYSIS OF ORGANIC MATTER IN SOILS — THE EXAMPLE OF ELMERFORST, AN ABANDONED MEDIEVAL LOCALITY (BAS-RHIN, FRANCE) (Abstract)

The Elmerforst forest is located in the Alsatian foothills of the Vosges massif. The name of this forest derives from the name of a place called Elbersforts that was created by clearing in the 12th century and disappeared in the first third of the 16th century. The territory encompassed by this ancient village was purchased piece-by-piece by the Œuvre Notre-Dame foundation — the institution that was in charge of the construction and maintenance of Strasburg Cathedral — in the 16th and 17th centuries. The territory is currently entirely covered by forest, with the exception of a central clearing. Archaeological excavations conducted in the clearing uncovered remnants of this locality. As for the historical archives and maps, they provide only sporadic information about the crops grown on this land during the medieval period. However, twenty soil profiles were collected and analysed by near-infrared spectroscopy in a laboratory so as to assess changes or stability in land uses and, where applicable, to establish the boundaries of the territory spanned by village. Several profiles from woodland areas close to the village attest to a recent forest history, occurring after abandonment, whereas more peripheral profiles point to a more ancient forest history. On the basis of these profiles, a map of the territory as managed by a small village community during the Middle Ages can be proposed. The results also provide input for discussions on the notion of ancient forests that are not all of the same age.