



P R O G R A M M E



LES ARCHIVES PEDOLOGIQUES, UN OUTIL POUR LA GESTION DES ECOSYSTEMES (APOGEE)

NOUVELLES APPROCHES, LIMITES TEMPORELLES ET RESOLUTION ECOSYSTEMIQUE

SOIL ARCHIVES AS A TOOL OF ECOSYSTEM MANAGEMENT

Dominique Schwartz *coord.*
Université de Strasbourg
LIVE, UMR 7362, 3 rue de l'Argonne, 67083 Strasbourg cedex
dominique.schwartz@live-cnrs.unistra.fr

Synthèse du rapport final
06 novembre 2013

Contexte général

Parmi les différentes *Fonctions des sols et services rendus à la Société*, la fonction de mémorisation des dynamiques environnementales est sans doute la moins étudiée, et la potentialité des « archives pédologiques » en tant qu'outil d'aide à la gestion des écosystèmes la moins bien connue. Certes, les paléosols et de nombreux constituants du sol sont depuis longtemps utilisés pour les reconstitutions paléoenvironnementales, mais les nouvelles approches conceptuelles, consistant à analyser le sol en tant qu'indicateur du fonctionnement intégré des systèmes écogéographiques, restent marginales malgré le développement généralisé d'outils analytiques de plus en plus performants. Cette thématique est pourtant loin d'être seulement « académique ». La connaissance de leur histoire et des changements qui les ont affectés est indispensable pour mieux connaître le fonctionnement des milieux. C'est donc un outil de gestion, particulièrement précieux lorsqu'il s'agit de milieux fragiles, à fort intérêt patrimonial ou écologique. Les archives pédologiques ont de ce point de vue un potentiel encore mal connu, et donc sous-évalué.

Objectifs généraux du projet

L'objectif général d'APOGEE est de contribuer de façon significative au développement de la fonction d'**outil d'aide à la gestion écosystémique** des sols, en participant à l'amélioration de la connaissance des potentialités et des conditions d'utilisation des archives pédologiques. Dans ce cadre, nous nous sommes focalisé sur les matières organiques des sols (MOS). En effet, celles-ci sont des constituants abondants dans les sols, relativement faciles à extraire et analyser. Elles sont quasi exclusivement d'origine végétale, et bon nombre d'entre elles ont une signature spécifique des végétaux dont elles dérivent. Cette signature peut se conserver malgré les transformations qui ont eu lieu lors de l'humification. L'espérance de vie des MOS est variable, selon leur nature biochimique, les conditions édaphiques (pH, activité biologique, composition granulométrique,...) et climatiques. Cependant, bon nombre d'entre elles ont une espérance de vie plurimillénaire dans les sols. L'ensemble de ces caractéristiques fait qu'elles permettent donc d'aborder directement la composition et la dynamique des formations végétales qui se sont succédé au cours du temps sur un sol. Leur étude permet d'aborder de façon très synthétique la dynamique environnementale d'un écosystème donné. En effet :

- les changements de composition végétale d'un écosystème sont un indice fort de changements environnementaux, naturels (variations climatiques) ou anthropiques (modes d'utilisation du milieu) ; il est ainsi possible de remonter aux processus qui sont directement à l'origine de ces changements (par exemple défrichements liés à une expansion démographique, ou colonisations forestières liées à une déprise agricole) ;
- les changements de végétation sont à leur tour susceptibles d'induire des changements de fonctionnement du milieu (phases d'érosion par exemple), avec des conséquences sur son évolution à long terme.

Pour mener à bien cet objectif, nous avons cherché à identifier des compartiments et constituants des MOS particulièrement intéressants en termes de potentiel d'archivage. Dans un premier temps, nous avons étudié leur répartition au sein des profils pédologiques : sont-ils répartis sur toute l'épaisseur du profil ou préférentiellement en profondeur ? De la réponse à cette question peut en effet dépendre l'élaboration de protocoles d'échantillonnage et de production de données plus généralisés, notamment lorsqu'il s'agira de passer à une phase d'application à la gestion des écosystèmes. Nous avons également cherché à identifier les échelles temporelles auxquelles peuvent être utilisés les marqueurs étudiés, échelles qui sont fonction de leur plus ou moins grande stabilité. Nous avons enfin cherché à évaluer le degré de résolution écosystémique des méthodes employées : peut-on

simplement distinguer de grandes catégories, telles que prairies et forêts, ou bien arrive-t-on à un niveau supérieur (par exemple, la distinction forêt de feuillus, forêt mixte, forêts de résineux), voire à une résolution bien plus importante (chênaie, charmaie, hêtraie,...).

L'étude s'est fondée sur trois approches méthodologiques innovantes développées dans le point ci-dessous.

Quelques éléments de méthodologie (et éventuelles difficultés rencontrées)

Notre étude du potentiel d'archivage écosystémique des matières organiques de sols s'est appuyée sur 3 approches différentes.

1. **La spectroscopie proche infrarouge qualitative** est une toute nouvelle méthode, mise au point en 2009 (Ertlen *et al.*, 2010), qui consiste à associer la signature spectrale d'un échantillon à la végétation qui a donné naissance aux MOS. Pour ce faire, il est nécessaire de disposer d'une base de données d'échantillons de référence. Ces échantillons sont pour l'essentiel des horizons de surface de sols, échantillonnés sous des couvertures végétales dont la stabilité a pu être vérifiée pour au moins 100-150 ans (soit environ 3 fois le temps moyen de résidence des MOS), afin de disposer d'un signal « pur ». S'il a été relativement facile de trouver des échantillons de prairies ou de forêts répondant à ces critères, il a été en revanche impossible de procéder de la même manière pour les sols cultivés, d'où la nécessité, pour ce dernier type d'occupation de sols, d'utiliser une approche indirecte (voir chapitre « résultats »). Les échantillons « inconnus » de profils complets de sols sont ensuite comparés à ce référentiel par des analyses statistiques, de manière à identifier le couvert végétal représenté majoritairement ou exclusivement dans les MOS d'un niveau donné.
2. **Les biomarqueurs moléculaires lipidiques** sont nombreux dans les matières organiques des sols. Ils représentent généralement moins de 10 % de la masse des MOS et sont très variés en terme de constituants chimiques. Ils sont en général considérés comme faisant partie des matières organiques relativement stables. L'objectif de leur étude est double. D'une part, l'analyse de leur distribution fournit une "empreinte digitale" spécifique des différents apports organiques issus de la couverture végétale. Si de nombreux marqueurs sont peu spécifiques d'une essence végétale donnée, d'autres sont en revanche utilisés en tant que marqueurs chimiotaxonomiques. Par ailleurs, la distribution de certaines classes de composés majeurs (série des hydrocarbures linéaires, n-alcools, n-acides, etc) apparaît comme discriminante et la prédominance systématique d'un homologue donné en fonction de l'essence principale de la couverture végétale, permet, sur la base de ces distributions, de distinguer les sols de végétations telles que les prairies, chênaies ou hêtraies, etc (Trendel *et al.*, 2010). D'un point de vue pratique, le protocole d'étude passe par l'extraction et la purification par chromatographie liquide des constituants lipidiques des sols, puis par leur analyse et identification par des techniques de chromatographie gazeuse (CG) et CG couplée à la spectrométrie de masse (CG-SM). Notons que si l'analyse des biomarqueurs lipidiques est largement développée dans le cas des sédiments et paléosols, elle l'est nettement moins dans celui des sols fonctionnels.
3. **Les temporalités** ont été abordées via une méthode de datation ^{14}C novatrice. La collaboration instituée dans le cadre de ce programme avec l'ETH de Zurich (voir *infra*) nous a donné accès à l'un des deux spectromètres de masse atomique existant actuellement au monde capable de dater des quantités de carbone de l'ordre de 10-15 microgrammes. Pour rappel, la méthode « historique » (comptage des

désintégrations) mise au point par Libby dans les années 1950 permettait de dater des objets sur la base d'environ 1 à 5 g de carbone. Dans les années 1980, l'apparition des spectromètres de masse atomique (AMS) a permis de développer des méthodes de datation, par séparation des atomes de ^{14}C présents, sur des quantités de l'ordre de 1 à 10 milligrammes. Le saut technologique représenté par les accélérateurs de dernière génération permet de diviser pratiquement d'un facteur 100 à 1000 les quantités nécessaires pour la datation par AMS classique. Ceci permet désormais de déterminer l'âge moyen (^{14}C) de « molécules individuelles ». L'utilisation de cette technique de pointe était inédite à ce jour pour les sols. Il convient de donner ici une précision importante. Par « molécule individuelle », nous désignons non pas une molécule prise en tant qu'individu, mais un type de molécules précis, identifié par sa structure moléculaire après extraction et purification. Les molécules qui composent l'extrait peuvent être hétérochrones. Tout comme pour la MOS totale, la mesure d'âge donne donc un temps moyen de résidence dans le sol et non pas un âge absolu.

Dans le programme initial, il était prévu qu'en plus de l'étude du sol brut, nous procéderions à celle de fractions particulières du sol, pour isoler des fractions particulièrement stables de matières organiques : cutanes, agrégats stables de la taille des limons, matière organique très fortement liée aux argiles. Ces approches n'ont pu être effectuées, car nous avons sous-estimé, sur un programme d'une durée de 2 ans seulement, le temps nécessaire pour rendre opérationnel le matériel nouvellement acquis (spectromètre proche-infrarouge), le temps passé à la mise au point de certains protocoles d'analyses biogéochimiques sur les sols et les contraintes pédologiques telles que les quantités de carbone disponibles dans les horizons profonds de sol. Ces approches seront développées ultérieurement, soit dans un futur appel d'offre de GESSOL, soit dans un autre cadre (ANR).

En revanche, des opérations non programmées au départ ont été menées à bien, soit à titre de test, soit parce qu'elles se sont avérées indispensables dans une perspective de progression scientifique sur le moyen terme :

- extension indispensable du référentiel de spectroscopie proche-infrarouge aux sols cultivés
- premiers tests de validation de ce nouveau référentiel dans un sol actuellement forestier (sur un des sites prévus dans le programme initial)
- essai d'identification des charbons de bois des sols en spectroscopie moyen-infrarouge (test)
- utilisation de la NIRS sur des chernozems en contexte naturel, archéologique et cultivé (test).

Résultats obtenus

Les résultats sont présentés de manière détaillée dans les annexes. Nous en donnerons ici les grandes lignes.

1. Approches en spectroscopie proche-infrarouge

La première année du programme a été consacrée à l'acquisition et à la prise en main d'un nouveau spectromètre IR. Auparavant, les travaux étaient effectués dans un autre laboratoire (Eco & Sol, Montpellier). Cette acquisition nous a donné une plus grande autonomie et nous a permis de poursuivre notre démarche de développement méthodologique de la SPIR qualitative appliquée au sol. Elle a toutefois nécessité de repasser dans le spectromètre tous les échantillons (54 sites couvrant plus de mille spectres) de la bibliothèque spectrale de référence, le transfert d'un spectromètre à un autre pouvant

créer des distorsions du signal. Cette base a également été complétée par de nouveaux sites de référence. Nous disposons maintenant d'une librairie spectrale homogène de 84 sites couvrant une large gamme de végétation représentative des écosystèmes tempérés. Tous ces sites ont été sélectionnés sur la base d'une grande stabilité du couvert végétal, avérée au moins depuis 100-150 ans. En effet, le temps moyen de résidence (TMR) des matières organiques des sols (MOS) étant de l'ordre de 50 ans dans les horizons de surface, la persistance du même écosystème sur une durée de l'ordre de 3 TMR donne l'assurance d'avoir un signal écosystémique pur à plus de 95 %.

La faiblesse de notre référentiel résidait dans l'absence de milieux cultivés. Cette lacune était principalement due au fait que la généralisation de la monoculture donne un signal fortement marqué par une culture précise et ne permet pas de comparaison avec des signatures d'agricultures traditionnelles, dans lesquelles la rotation des cultures est la règle. Le travail de master de L. Froehlicher (2013) a permis de combler cette lacune en intégrant dans le référentiel des échantillons de colluvions agricoles historiques, dont on a fait l'hypothèse que leur signature spectrale était celle des horizons de surface cultivés érodés. Les analyses discriminantes ont permis de distinguer cette catégorie des deux autres catégories (Fig. 1) et une validation a été effectuée sur quelques échantillons indépendants.

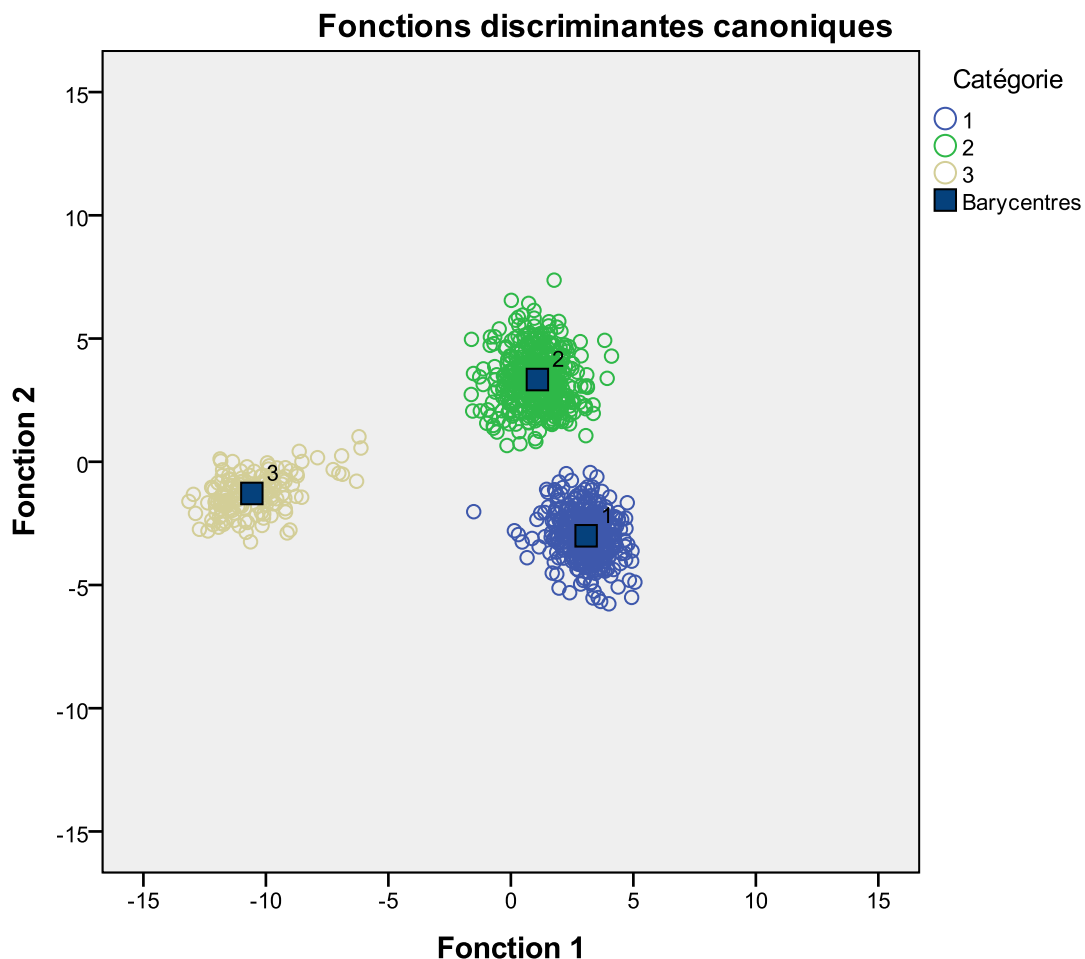


Fig. 1. Scores des deux fonctions canoniques discriminantes. 1 : sols sous prairie ; 2 : sols sous forêt ; 3 : colluvions agricoles.

Ce nouveau référentiel est fondamental. De facto, le référentiel bi-partite forêt – prairie ne peut s'appliquer que dans des milieux dans lesquels le couvert végétal a toujours oscillé entre ces deux pôles. En effet, dans le cas où la MOS de certains horizons du sol aurait une signature de sol cultivé, le traitement statistique effectué sur la base d'un référentiel bi-partite aboutirait automatiquement à ranger ces échantillons dans la classe, « forêt » ou « prairie », dont ils seraient les moins éloignés. Le référentiel tripartite élimine donc un risque de biais tout en donnant une précision supplémentaire sur les couverts végétaux.

Appliquée à l'ensemble des profils pédologiques de référence retenus dans le programme, l'évolution du signal spectral avec la profondeur peut être comparée avec l'histoire connue de la végétation sur ces sites (fig. 2). Sur le Falimont, le profil prairial NIRS est relativement stable. On observe à peine un léger signal forestier en profondeur. Ceci est relativement conforme (1) à l'ancienneté de ces prairies qui ont succédé à de la forêt à l'Age du Bronze et (2) au fait que l'occupation du sol soit restée prairiale depuis cette date. Dans la forêt de la Salajka (République Tchèque), considérée comme « primaire », le signal NIRS reste très stable avec la profondeur. A Wegscheid, l'évolution est conforme avec l'histoire connue (forêt ayant succédé à des prairies). Sur l'Elmerforst (800 ans d'histoire forestière documentée), la NIRS montre un signal prairial dans les horizons profonds du sol, suggérant un passé prairial avant le dernier épisode forestier. Une comparaison a été effectuée entre le signal réel enregistré en NIRS et un modèle théorique de transformation du signal en relation avec les différents temps moyens de résidence de la MOS, augmentant avec la profondeur (détails en annexe). La bonne coïncidence observée ouvre des perspectives vers des applications chronologiques dans des contextes où des changements de végétation documentés dans le sol n'ont pu être datés précisément en contexte sédimentaire.

Par ailleurs, concernant le site forestier de l'Elmerforst, en plus du profil EFE sur lequel nous avons concentré une partie des moyens du programme APOGEE (analyse lipidique et datation notamment), nous avons procédé à une première tentative de spatialisation des occupations du sol anciennes sur la base des profils NIRS. Ainsi, 17 profils de sols répartis sur le terroir d'un ancien village médiéval disparu ont permis de tracer le contour de secteurs dont l'évolution des occupations de sol ont été différentes (Froehlicher, 2013 ; Froehlicher *et al.*, en préparation). Ces secteurs ont pu être comparés à des cartes anciennes du XVIII^e siècle, et une bonne corrélation se dégage de ces comparaisons. Ceci ouvre des perspectives intéressantes pour des applications ultérieures de la méthode à l'approche spatialisée de sites remarquables variés (terroirs anciens, réserves naturelles, sites archéologiques,...).

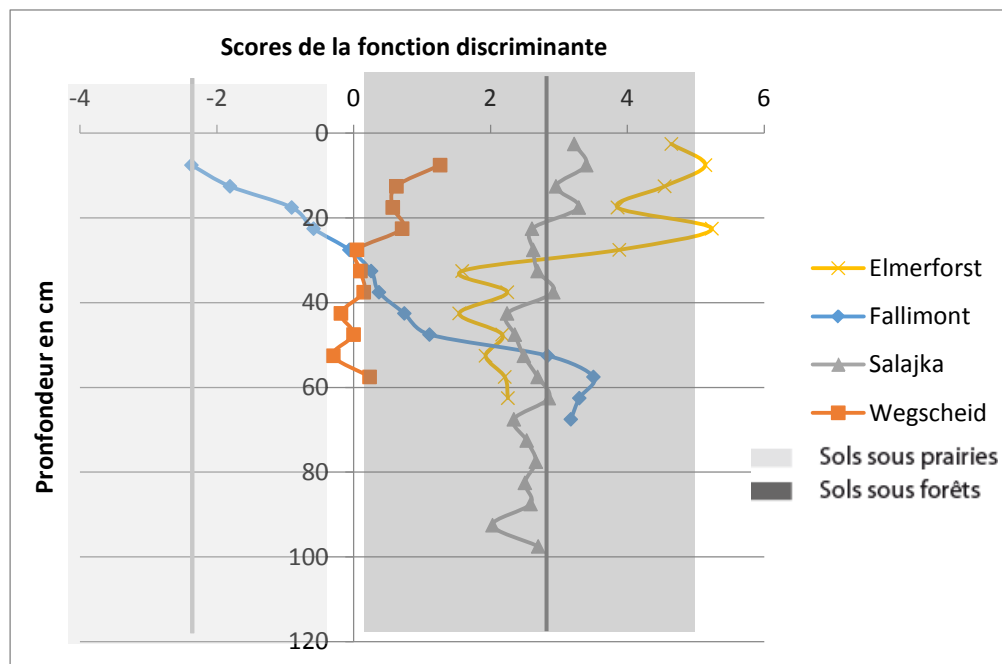


Fig. 2. Profils NIRS des quatre sols retenus dans le programme APOGEE

A titre de tests, la SPIR a également été utilisée sur des sols non inclus dans le cadre d'APOGEE, mais la thématique traitée est la même. Il s'agit de chernozems, sols très représentés en Europe centrale (République tchèque, Hongrie,...) et de l'Est (Ukraine, Russie,...). Ces sols relativement caractéristiques des biomes continentaux sont censés s'être formés sous végétation de type prairial (steppes méditerranéennes, pampas, prairies américaines,...). Mais la question d'une formation ou d'une évolution ultérieure sous végétation forestière, comme celle de leur transformation en luvisol à l'Holocène en conséquence de leur envahissement par une végétation forestière ou de leur maintien en chernozem par un défrichement précoce et la permanence d'une activité agricole est posée. Cette réflexion est au cœur d'une thèse en cours (B. Vyslouzilova), et la SPIR fait partie des méthodes employées pour y répondre. De nombreux profils ont été analysés dans ce cadre, dont plusieurs dans des réserves naturelles d'Europe centrale), et il semble bien qu'une partie au moins des végétations steppiques censées être « primaires » ne le soient pas. Il est difficile d'être plus affirmatif pour le moment, les résultats étant en cours de traitement.

2. Approches en spectroscopie moyen-infrarouge

A titre de tests, deux approches ont également été menées en spectroscopie moyen infrarouge, l'appareil acquis permettant aussi cette utilisation.

Un premier test a consisté à identifier des charbons de bois. Le test a été très positif sur des charbons de bois actuels, fabriqués pour la circonstance (500 charbons pour une vingtaine d'espèces végétales) afin de constituer la banque de référence. La corrélation avec des charbons actuels « inconnus » est excellente. Le spectre moyen infrarouge de ces charbons a ensuite été comparé à une première série de charbons de bois archéologiques d'âges variés, identifiés par les méthodes classiques de l'anthracologie. Les résultats sont alors moins probants (Wilt, 2011). Ceci est peut-être lié à une altération des charbons dans les sols. Les tests n'ont pas été davantage poussés à cette heure.

Par ailleurs l'identification d'oxalate de calcium dans des plantes a été réalisée avec succès dans un projet connexe à APOGEE (cf. rapport complet).

3. Extraction et identification de biomarqueurs moléculaires

Les lipides de végétaux ont montré leur potentiel en tant qu'outils chimiotauxonomiques, et l'étude de leurs distributions dans la matière organique sédimentaire récente ou ancienne a notamment permis à ce jour de déterminer, par exemple, la nature des principaux apports végétaux dans des sédiments anciens, les changements de végétations en relation avec les variations climatiques ou environnementales, ou encore la nature de pratiques agricoles passées. Une étude préliminaire nous a montré que les signatures lipidiques d'horizons superficiels de sols pouvaient être liées à la nature du couvert végétal et permis d'établir, ainsi, un référentiel moléculaire des horizons de surface (Trendel *et al.*, 2010). Suite à ces résultats, nous avons réalisé, dans le cadre du programme APOGEE, l'étude moléculaire d'une série de quatre profils de sols dont l'évolution au cours du temps est bien documentée afin de vérifier si les signatures moléculaires sont préservées en profondeur et peuvent être utilisées pour reconstituer l'histoire du couvert végétal.

Le jeu de profils de sols étudiés comprend :

- Alocrisol (forêt de l'Elmerforst, EFE, Bas-Rhin). Cette forêt (chênaie-hêtraie) est attestée par écrit depuis au moins 800 ans.
- Rankosol (prairie du Falimont, FAL, Hautes-Chaumes vosgiennes). Ce type de sol caractérise les Hautes-Chaumes. Les forêts initiales ont été défrichées à l'Age du Bronze et remplacées en permanence par de la prairie depuis.
- Brunisol (forêt du Wegscheid, VJF, Haut-Rhin). Cette forêt (hêtraie-sapinière) mise en réserve en raison de sa biodiversité a connu un passé prairial encore attesté en 1760.
- Brunisol (forêt de Sajka, SJK, République Tchèque). Cette forêt (hêtraie-sapinière) est considérée comme « primaire » par les naturalistes tchèques. C'est une des rares forêts en Europe dans ce cas.
-

Parallèlement à l'analyse moléculaire des différents horizons de ces quatre profils de sol nous avons également réalisé la datation ^{14}C par AMS de différents compartiments de la matière organique (EFE, FAL, VJF, SJK) (Tableaux 1 et 2) ainsi que de biomarqueurs moléculaires conservés au sein de la matière organique des sols (EFE, FAL) (Tableaux 1 et 2) afin de pouvoir distinguer, dans les horizons profonds, lipides originels stables et bien préservés en profondeur et lipides ayant pour l'essentiel une origine récente (apports racinaires, m.o. de surface entraînée par bioturbation et lessivage, ...). L'utilisation de la technique de datation ^{14}C par AMS "MICADAS" à l'ETH-Zürich (Synal *et al.*, 2007 ; Ruff *et al.*, 2007), inédite à ce jour en sciences du sol, permet, en effet, à partir de molécules cibles isolées de sols, d'évaluer le temps moyen de résidence (TMR), et de mieux comprendre les processus de transfert de la matière organique dans les sols. Il convient toutefois de noter ici que l'isolement de composés individuels à partir de mélanges complexes tels que ceux représentés dans le cas des fractions lipidiques de sols, où co-existent des centaines de composés, représente un "challenge" analytique, et est très chronophage (voir les deux rapports des stagiaire de master 2 fournis en annexe).

Les résultats obtenus apparaissent relativement contrastés selon les caractéristiques des profils de sol étudiés.

Tableau 1 : Teneur en carbone organique et temps moyen de résidence (^{14}C) de fractions organiques et de biomarqueurs isolés d'échantillons provenant de deux profils de sol EFE et FAL.

	EFE 1 0-4 cm	EFE 2 10-20 cm	EFE 3 25-35 cm	EFE 4 45-60 cm	FAL 1 0-10 cm	FAL 2 20-30 cm	FAL 3 40-50 cm	FAL 4 50-60 cm
C. organique (%)	3,3	1,3	1,0	0,3	23,5	5,8	2,2	0,4
Sol non extrait	moderne	n.d.	n.d.	1735 ^b	-961	x	x	4256
Sol extrait	-602 ^a	-192 ^a	-143 ^a	466	-929 ^a	x	x	4272
Extrait lipidique	-690 ^a	-480 ^a	-269 ^a	-237 ^a	-874 ^a	x	x	5353
Sol hydrolysé	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	x	n.d.	x
Hydrolysat	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	x	n.d.	x
Diploptene	-534 ^a	n.d.	n.d.	-514 ^a	—	—	—	—
Friedeline	-1127 ^a	n.d.	n.d.	-472 ^a	—	—	—	—
n-C₂₄ alcool	-925 ^a	n.d.	-762 ^a	n.d.	—	—	—	—
n-C₂₇ alcane	-660 ^a	-1108 ^a	-963 ^a	-717 ^a	—	—	—	—
n-alcane totaux	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	-516 ^a	n.d.	3352	n.d.
Alkyldiméthoxybenzène 1^c	—	—	—	—	-965 ^a	n.d.	-866 ^a	n.d.
Acétate de baurenyle 4^c	—	—	—	—	-167 ^a	n.d.	n.d.	n.d.
br-GDGTs	—	—	—	—	165	n.d.	1543	n.d.
i-GDGTs	—	—	—	—	—	n.d.	1527	n.d.

^a une valeur négative indique un carbone organique moderne (i.e., après 1950 AD). n.d.: non mesuré; ^b valeur pour un horizon à 60-70 cm dans une fosse voisine (Ertlen (2009)); ^c le numéro fait référence à la structure représentée sur la Fig. 4a dans le rapport détaillé —: composé non présent dans l'échantillon; x: valeurs en cours de détermination.

Tableau 2 : Teneur en carbone organique et temps moyen de résidence (^{14}C) de fractions organiques isolées d'échantillons provenant des deux profils de sol VFJ et SJK.

	VFJ 1 5-15 cm	VFJ 2 15-25 cm	VFJ 5 45-60 cm	SJK 1 0-10 cm	SJK 2 25-40 cm	SJK 3 55-70 cm	SJK 4 90-110 cm
C. organique (%)	4,5	2,2	1,0	6,6	1,2	0,6	0,4
Sol non extrait	-614	x	781	-362	x	x	3112
Sol extrait	-852	x	832	-552	x	x	3157
Extrait lipidique	-665	x	532	-552	x	x	3305

^a une valeur négative indique un carbone organique moderne (i.e., après 1950 AD); n.d.: non mesuré; x: valeurs en cours de détermination.

Dans le cas du profil de sol de l'Elmerforst, les résultats obtenus par l'analyse moléculaire des extraits lipidiques et par datation au ^{14}C (AMS) de différents compartiments de la matière organique (sol total, sol extrait, extrait lipidique), de fractions et de composés individuels isolés à partir des extraits organiques indiquent que les signatures lipidiques trouvées en profondeur sont typiques de chênaie-hêtraie (Tableau 1). Celles-ci sont identiques à celles des horizons de surface, et ne sont pas issues d'un couvert végétal ancien mais correspondent à une contribution de matière organique récente, constituée d'apports d'origine racinaire (et/ou écorce?) et foliaire transférés en profondeur par lixiviation et bioturbation. La matière organique totale des horizons profonds est un peu plus ancienne, ce qui tend à montrer que la m.o. dans les horizons profonds de ce sol est hétérogène et constituée à la fois d'un "pool" de m.o. ancienne et réfractaire de nature non lipidique et d'un "pool" labile, comprenant notamment l'extrait lipidique.

L'étude du profil de sol de prairie du Falimont a montré, au contraire, une évolution des profils moléculaires avec la profondeur. La datation au ^{14}C de différents compartiments de la matière organique, de fractions chromatographiques et de composés individuels montre un gradient d'âge marqué et a permis de conclure que la matière organique dans les

horizons profonds de ce sol est constituée d'un mélange de matériel ancien et de matériel récent d'origine racinaire ou amené en profondeur par bioturbation et/ou lixiviation (Tableau 1). Les résultats obtenus nous ont conduit à proposer que les signatures moléculaires trouvées en profondeur, anciennes en bonne partie d'après les mesures de TMR, doivent pouvoir s'interpréter en termes d'évolution du couvert végétal au cours du temps (ici, conifères en profondeur vs. système prairial actuel).

Dans le profil de sol de la forêt du Wegscheid, une légère évolution des distributions des biomarqueurs lipidiques est notée entre l'échantillon de sol profond et les autres horizons, pouvant suggérer le passage d'une forêt de type sapinière vers une forêt mêlée de type hêtraie-sapinière. Par contre, nous n'avons pas décelé de biomarqueurs traduisant la présence passée d'une couverture végétale de type prairie. Nous n'avons, à l'heure actuelle, pu effectuer qu'un nombre limité de mesures de TMR de fractions organiques (Tableau 2). Ainsi, les mesures de datation de trois compartiments de l'horizon de surface indiquent un âge moderne (Tableau 2). En revanche, les valeurs obtenues pour ces mêmes fractions organiques dans le cas de l'échantillon le plus profond indiquent une matière organique globalement assez ancienne (environ 800 ans), comprenant une composante non lipidique (i.e., non extractible) ancienne et une composante lipidique plus jeune correspondant à un mélange de lipides anciens et de lipides plus récents d'origine racinaire ou provenant des horizons moins enfouis.

Les quantités d'extrait lipidique obtenues dans le cas des prélèvements provenant de la forêt de Salajka (République Tchèque) sont généralement extrêmement faibles. Le profil lipidique obtenu dans le cas de l'échantillon de surface est dominé par des constituants provenant du hêtre avec une contribution limitée provenant de conifères. En profondeur, la prédominance des composés caractéristiques du hêtre a totalement disparu au profit de composés linéaires et diterpéniques (traces) que l'on pourrait associer aux conifères. Par ailleurs, on observe en profondeur une contribution importante de contaminations que l'on peut expliquer par la très faible quantité d'extrait lipidique obtenue à partir de cet échantillon de sol. Étant donné les très faibles quantités d'extraits lipidiques dans le cas des sols profonds, l'isolement de composés individuels afin de déterminer leur temps moyen de résidence n'a pu être envisagé. Toutefois, les mesures de TMR sur des fractions organiques (Tableau 2) à partir des échantillons SJK1 et SJK4 montrent qu'il y a apparemment un gradient d'âge avec la profondeur et qu'il n'y a pas de différences réellement significatives en terme d'âge entre les trois compartiments organiques.

Les mesures de TMR sur les horizons intermédiaires des profils du Falimont, des forêts du Wegscheid et de Salajka sont en cours, seront obtenues en fonction de la disponibilité de l'instrumentation très certainement courant novembre 2013 et permettront d'évaluer les gradients d'âge des différents compartiments de la matière organique dans ces profils.

Il apparaît donc clairement à partir des profils de sol étudiés que les paramètres contrôlant la préservation des lipides et plus généralement la dynamique de la matière organique dans les sols sont très complexes et dépendent de nombreux facteurs dont le rôle et l'importance sont difficiles à évaluer pour l'instant. Selon les situations et en fonction des caractéristiques des sols, il n'est pas toujours possible de trouver des biomarqueurs fiables et exploitables dans les horizons de sol profonds, puisque la présence de biomarqueurs avec un âge ^{14}C moderne en profondeur indique un transport vertical important de ces composants jusqu'à des profondeurs considérables dans certains profils de sol (Elmerforst). Cependant, dans certains cas, illustrés par l'exemple du Falimont, la signature lipidique dans les horizons profonds, suffisamment stable et relativement peu diluée par des apports de la surface, pourrait être utilisée pour reconstituer l'histoire du couvert végétal. Les résultats obtenus sont également intéressants en terme de dynamique des matières organiques parce qu'ils indiquent, notamment, que même des composants qui sont en général considérés comme résistants aux processus d'altération peuvent avoir un temps moyen de résidence relativement court. Ces résultats ont montré également la grande variabilité dans la

préservation des différents compartiments de la matière organique selon le contexte et les caractéristiques des sols.

En ce qui concerne le déroulement du projet, il faut noter que l'isolement de composés individuels à partir des mélanges complexes que constituent les extraits lipidiques de sols pour les mesures de TMR (datation ^{14}C par AMS « MICADAS ») a représenté un travail très important et très coûteux en temps puisqu'il s'est agi de mettre en œuvre sur les extraits lipidiques des séquences d'étapes de purification par différentes techniques chromatographiques. D'autre part, compte tenu des quantités parfois très faibles d'extrait organique, il a été nécessaire dans certains cas de travailler sur des quantités très importantes de sol. Dans le cas des échantillons du Wegscheid et de Salajka, l'isolement de composés individuels pour des mesures de datation n'a pas été possible. Le fait que ce volet de l'étude ait été extrêmement chronophage explique également pourquoi, malgré l'implication de personnels non financés et non initialement prévus dans le cadre de ce projet (C. Liaud et B. Courel, stagiaires de master 2, avec un stage de laboratoire de 6 mois ; voir rapports en Annexe), nous n'ayons pas eu le temps d'aborder l'étude des biomarqueurs lipidiques sur des fractions granulométriques d'agrégats, un volet initialement prévu dans le programme APOGEE.

4. Réflexions sur les temporalités mises en évidence

Comme cela a été indiqué dans le paragraphe ci-dessus, les résultats des datations ^{14}C par AMS « MICADAS » sont quasiment les premières obtenues dans le monde sur des molécules individuelles. Il n'y a donc aucune comparaison possible avec d'autres travaux, et donc une absence de recul pour l'interprétation.

Rappelons également, qu'au même titre que pour la MOS totale, les datations ^{14}C sur fractions lipidiques ou molécules individuelles doivent s'interpréter en terme de temps moyen de résidence (TMR), c'est-à-dire d'espérance de vie de ces molécules entre leur entrée (par décomposition des matières organiques fraîches) et leur sortie (par dégradation et/ou minéralisation des produits humifiés) du sol. Ce TMR dépend de nombreux facteurs propres aux molécules concernées, et aux conditions édaphiques et environnementales. Ceci dit, les résultats obtenus permettent pour le moins de poser quelques éléments importants.

- Il est clair que le comportement de la fraction lipidique ne reflète pas celle de la MOS totale. On peut en première hypothèse supposer que la stabilité de cette fraction lipidique est différente de celle de la MOS. Il semblerait que bon nombre de ces constituants soient en fait peu stables. L'absence de biomarqueurs de végétation prairiale, pourtant documentée par les archives historiques et la NIRS il y a 250 ans à Wegscheid, les TMR très jeunes de l'Elmerforst plaident par exemple en ce sens. Il ne faut cependant pas oublier un autre facteur. Les TMR de la MOS totale couvrent l'ensemble de l'histoire du sol, ce qui n'est pas le cas de certaines molécules individuelles. Ainsi, à Wegscheid, la forêt ayant succédé à la prairie il y a moins de 250 ans, il est vain d'attendre que les TMR de composés lipidiques spécifiques de la forêt actuellement présente soient supérieurs à 250 ans, alors que la MOS totale pourra avoir un TMR > 1000 ans dans les horizons profonds (analyses encore en cours). Qu'il y ait des différences entre extraits lipidiques, molécules individuelles et MOS totale est donc une règle tout à fait normale, qui ne préjuge –dans l'absolu- pas de la stabilité des lipides.
- Ceci posé, dans certains nombres de cas, il est possible de trancher. Ainsi, sur l'Elmerforst, la présence d'une forêt de feuillus est attestée depuis au moins 800 ans. Que le TMR de molécules spécifiques du chêne, comme la friedeline, soit très moderne, démontre à l'évidence que, au moins dans les conditions locales, cette molécule est très dégradable... et n'est donc pas un bon marqueur paléoenvironnemental.

- A l'inverse, le fait que sur le Fallimont certaines molécules individuelles aient un TMR élevé prouve que la proportion de molécules modernes est très faible. Pourtant, des transferts de matière organique, depuis la surface, sous forme de complexe organo-métallique (liée à du fer et de l'aluminium) sont avérés analytiquement dans ces sols qualifiés de « rankers cryptopodzoliques ». Ceci démontre que certaines fractions lipidiques sont susceptibles d'être préservées sur le long terme.

Ainsi, ces premières analyses démontrent la nécessité de poursuivre ce type d'étude pour identifier des molécules qui soient (1) spécifiques de végétations données et (2) susceptibles de vieillir dans les sols.

Implications pratiques, recommandations, réalisations pratiques, valorisation

- Implications pratiques :

Le côté pionnier des recherches entreprises dans le cadre d'APOGEE ne permet pas encore d'envisager des implications pratiques de grande ampleur. Les données obtenues sont encore lacunaires et il est donc impossible d'établir des lois « générales ». Ceci est notamment le cas pour les datations de composés individuels, dont le comportement diffère notablement selon les sols. En revanche, sur le plan méthodologique, en spectroscopie proche infrarouge, le fait d'avoir pu compléter la base de données forêt-prairie par un référentiel de sols cultivés permet d'envisager des interprétations paléoenvironnementales plus fiables dans l'avenir sur les profils complets de sols en situation d'avoir été à un moment donné de leur histoire cultivés. Par ailleurs, les travaux effectués à partir de l'extrait lipidique des sols ont conduit à la mise au point de procédés analytiques applicables dans le futur dans le cas d'autres types de sols, permettant ainsi l'isolement de composés individuels à partir de mélanges complexes et donnant accès à la détermination de leur TMR.

- Recommandations :

Il importe donc dans un proche avenir de compléter les études effectuées dans le cadre du présent programme. Cela étant, le potentiel représenté par les archives pédologiques en tant qu'outil de meilleure gestion des écosystèmes est réel. Il est important de sensibiliser les gestionnaires du milieu à ce fait, en insistant sur les points suivants :

- les utilisations passées d'un écosystème et d'une manière générale tous les événements qui s'y sont déroulés peuvent rester inscrits durablement dans la composition floristique et faunistique, la structure des populations, la biodiversité, à des échelles de temps largement pluriséculaires ;
- le fonctionnement actuel de ces systèmes s'inscrit dans une dynamique sur le long terme, qu'on qualifiera de trajectoire temporelle. Ces trajectoires se traduisent de façon tout à fait normale par des évolutions. La « stabilité » écosystémique ou paysagère est un leurre ;
- la connaissance du passé et des trajectoires temporelles des systèmes est un moyen de mieux les comprendre et donc un moyen d'anticiper/prévoir leur évolution et de mieux les gérer. Il est donc important pour les gestionnaires de pouvoir s'appuyer sur un socle de connaissance important dans ce domaine ;
- les « archives » naturelles sont un des moyens de renforcer ce socle. Et parmi ces archives naturelles, les archives pédologiques ne sont pas à négliger. Certes plus

difficiles à interpréter en terme de temporalités que les archives sédimentaires, elles ont l'énorme avantage d'être ubiquistes (la couverture pédologique étant généralisée) et le plus souvent locales, ce qui est fondamental à l'échelle de la gestion de sites dont l'extension est souvent de quelques milliers d'hectares.

- Réalisations pratiques et valorisation :

L'équipe APOGEE a tenu, dès la conception du programme, à y inclure un colloque de restitution ouvert à un public de gestionnaires. Une partie (5000 euros) du budget du programme avait été fléchée en ce sens. Ce colloque s'est tenu les 25 et 26 septembre 2013. De l'avis des participants, il a été un réel succès. Outre les résultats du programme, encore trop neufs pour pouvoir être appliqués dans l'immédiat, les intervenants ont présenté des études de cas permettant d'illustrer les recommandations soulignées ci-dessus. Le programme du colloque, la nature et le nombre de participants sont détaillés dans les annexes du présent rapport.

L'action que nous avons entreprise doit être considérée comme une phase préliminaire, de sensibilisation, de ce public spécifique. Pour étrange que cela paraisse, des concepts tels que «trajectoires temporelles des écosystèmes», «les archives pédologiques et leur intérêt» sont peu familiers d'une partie importante des gestionnaires. Ceux-ci ont dans l'ensemble été très intéressés par la thématique, mais la distinction était nette entre quelques organismes (en général plutôt des structures tels que les Parc Naturels) qui ont déjà été confrontés à de tels questionnements et les autres, pour lesquels le colloque a pu servir de prise de conscience, de détonateur : de nombreux participants nous ont fait part du fait que les exposés qu'ils ont entendus étaient pour eux quelque chose de réellement neuf, qu'ils ne connaissaient pas. Il est certain que pour que le message porte, il conviendra de réitérer de telles opérations à l'avenir.

Un frein identifié par ailleurs est celui des moyens financiers des gestionnaires. Ceux-ci sont de plus en plus réduits, notamment en ce qui concerne la part « investissement scientifique ». Dès lors, même s'il existe la volonté de mettre en application des idées tirées de la thématique exposée lors du colloque, il devient difficile de passer au stade concret du travail de recherche effectif. A titre d'exemple, il y a quelques années, le Parc Naturel régional des Ballons des Vosges a largement financé le volet scientifique (terrain, analyses) de la thèse de S. Goepf sur l'origine des pelouses des Hautes-Vosges, étudiée sur la base d'une approche pédoanthracologique. De l'avis même des responsables scientifiques du Parc, il n'est pas sûr que cette opération puisse être possible actuellement.

Pour ce qui est de l'avenir, ce colloque et les discussions informelles qui ont pu être nouées à cette occasion ont aussi été pour les organisateurs l'occasion de réfléchir aux moyens les mieux appropriés pour faire le lien entre recherche et « société civile » dans le domaine de la gestion/protection des milieux remarquables. Voici quelques pistes que l'on peut évoquer :

- En ce qui concerne le contact oral, une réflexion doit porter sur le type de manifestation le plus approprié. Le colloque/réunion de travail n'est peut-être pas la forme la plus appropriée vis-à-vis d'un public qui ne fréquente pas toujours ces lieux. Ils n'en demeurent pas moins indispensables, à condition peut-être de les organiser avec une certaine rythmicité (tous les 2 ans ?) et peut-être hors murs. Où tenir alors les débats : dans les locaux d'une structure partenaire ? mais peu de structures possèdent en propre des salles adaptées, et la location de salles extérieures coûte cher. Pour des raisons symétriques, les conférences tardives le soir ne sont pas efficaces : elles ne peuvent porter que sur un public (a) local (b) de passionnés. Il n'est pas certain que des techniciens se déplacent en masse pour cela en dehors de

leurs heures de travail. Une solution pourrait être la tenue de réunions de travail spécifiques au sein de structures demandeuses et identifiées. Il est toutefois clair que de telles actions sont limitées par la disponibilité en temps des intervenants, et par le fait que le déplacement au sein des structures éloignées doit être financé. Une dernière idée est d'organiser de sessions de formation concentrées sur quelques jours, auxquelles le personnel des structures de gestion conservatoire des milieux pourrait participer dans le cadre de la formation permanente. Enfin, il est indispensable, de temps en temps, de participer à des Journées d'Etudes régionales organisées par des structures diverses (Sociétés Philomatiques, Sociétés savantes locales, Associations diverses).

- En ce qui concerne la transmission par l'écrit, il est clair qu'il est nécessaire de produire de la littérature qui sorte du cadre strict des circuits scientifiques classiques : journaux associatifs, revues de vulgarisation tels que « La Recherche », « Pour la Science », revues d'association (la Revue du Club Vosgien est lue par plus de 30000 membres, passionnés de nature,...). Un support à privilégier est sans doute celui des monographies régionales qui sont encore éditées régulièrement à l'occasion de journées d'étude qui se tiennent très fréquemment. Ces ouvrages sont très lus localement et régionalement, et bien connus par un public de naturalistes, d'historiens, d'historiens des paysages et de gestionnaires de milieux naturels. L'article de Schwartz et al. (2014, sous presse – cf. rapport complet) est un essai en ce sens. Le frein ici est celui de la volonté des scientifiques de publier dans de tels supports non valorisés en termes de progression de carrières, notamment pour les jeunes qui doivent construire leur dossier scientifique.
- Un autre point devrait être développé : c'est de susciter davantage de contacts scientifiques entre organismes gestionnaires et scientifiques, par le biais de programmes de recherche nationaux les mettant explicitement en partenariat sur des appels d'offre spécifiques. En période de restrictions budgétaires, cette proposition a sans doute peu de chances d'être entendue...

Partenariats mis en place, projetés, envisagés

La collaboration entre le Laboratoire de Biogéochimie Moléculaire (UMR 7177, Institut de Chimie) et l'équipe Dynamique des Paysages (UMR 7362, LIVE) est antérieure au programme APOGEE. Plusieurs programmes préalables (dont un programme EC2CO de l'INSU) ont permis de la mettre en place. Le financement par le MEDDE – GESSOL d'APOGEE a toutefois conféré à cette collaboration une autre dimension et scellé les bases d'un rapprochement thématique plus étroit. En revanche, la collaboration avec deux équipes de l'ETH de Zurich (Geologisches Institut – Prof. S. Bernasconi et Lab. of Ion Beam Physics – Dr. I. Hajdas) est nouvelle, sur la thématique de datation de molécules pédologiques. Elle est appelée à se développer, ce « consortium » présentant un projet d'ANR destiné à prendre le relais de GESSOL qui n'ouvre pas d'appel d'offres en 2014.

Liste des opérations de valorisation et de transfert issues du contrat (articles de valorisation, participations à des colloques, enseignement et formation, communication, expertises...)

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	
Publications scientifiques parues	1
Publications scientifiques à paraître	
Publications scientifiques prévues	5
COLLOQUES	
Participations passées à des colloques	11 communications et posters
Participations futures à des colloques	1
THESES	
Thèses passées	0
Thèses en cours	1 (Vyslouzilova)
ARTICLES DE VALORISATION-VULGARISATION	
Articles de valorisation parus	
Articles de valorisation à paraître	
Articles de valorisation prévus	1
AUTRES ACTIONS VERS LES MEDIAS	
Actions vers les médias (interviews...) effectuées	
Actions vers les médias prévues	
ENSEIGNEMENT – FORMATION	
Enseignements/formations dispensés	Résultats utilisés en cours de master
Enseignements/formations prévus	idem
EXPERTISES	
Expertises menées	néant
Expertises en cours	
Expertises prévues	
METHODOLOGIES (GUIDES...)	
méthodologies produites	
méthodologies en cours d'élaboration	
méthodologies prévues	
AUTRES	
Précisez...	Un colloque de restitution sur l'intérêt des archives pédologiques en tant qu'outil de gestion des écosystèmes, à destination principalement des gestionnaires de milieux remarquables, a eu lieu à Strasbourg les 25 et 26 septembre 2013.