

Les temps du sol:

Interprétations temporelles de l'archivage pédologique dans les approches paléoenvironmentalistes et géoarchéologiques

Dominique Schwartz

Faculté de Géographie, Université de Strasbourg – Laboratoire Image, Ville, Environnement, ERL 7230, 3, rue de l'Argonne, 67083 Strasbourg cedex

Mail : dominique.schwartz@live-cnrs.unistra.fr

RÉSUMÉ

Les sols sont des systèmes ouverts, qui peuvent être considérés comme des réacteurs. La transformation y est la règle, à l'inverse des strates, qui fossilisent le passé et figent le temps. Dans les sols, la compréhension des dynamiques temporelles nécessite donc des approches particulières, qui prennent en compte la spécificité des phénomènes pédologiques et des archives naturelles qui en découlent. Nous rappelons quelques règles élémentaires qui permettent cette compréhension et les illustrons par des exemples de confusions, relativement fréquentes dans le domaine des approches paléoenvironnementales et géoarchéologiques, où la distinction entre phases de mise en place de matériaux et différenciation pédologique n'est pas toujours clairement perçue.

Mots clés

Archive pédologique, horizon, temporalités du sol, strate, pédostratigraphie, pédogenèse, archéopédologie, géoarchéologie, paléoenvironnement, approche conceptuelle.

SUMMARY

TIME IN SOILS: Temporal interpretations of soil archives in the field of paleoenvironmental and geoarcheological studies

Soils are open systems which can be considered as reactors. The general rule in soils is the raw material transformation, on contrary to strata which fossilize the past times. Understanding the temporal dynamics needs special approaches in soils, well adapted to the specific characteristics of both pedological processes and natural archives linked to these phenomena. Some elementary rules allowing to understand temporal dynamics in soils are given. They are illustrated by examples of errors in paleoenvironmental and geoarcheological studies, fields of research where distinguishing the phases of material deposits and soil evolution is not always clearly known.

Key-words

Soil archive, soil horizon, soil temporality, strata, pedostratigraphy, pedogenesis, archeopedology, geoarcheology, paleoenvironment, conceptual approach.

RESUMEN**LOS TIEMPOS DEL SUELO:*****Interpretaciones temporales del archivo pedológico en los enfoques paleoambientalistas y geoarqueológicos***

Los suelos están sistemas abiertos, que pueden estar considerados como reactores. Su transformación está la regla, a diferencia de los estratos que fosilizan el pasado y fijan el tiempo. En los suelos, la comprensión de las dinámicas temporales necesita por lo tanto enfoques particulares, que toman en cuenta la especificidad de los fenómenos pedológicos y de los archivos naturales resultantes. Recordamos algunas reglas elementarias que permiten esta comprensión, que ilustramos por ejemplos de confusiones, relativamente frecuentes, en el ámbito de los enfoques paleoambientales y geoarqueológicos, donde la distinción entre fases de depósito de los materiales y de diferenciación pedológicas no están siempre claramente percibidas.

Palabras clave

Archivo pedológico, horizonte, temporalidades del suelo, pedostratigrafía, pedogénesis, arqueopedología, geoarqueología, paleomedio ambiente, enfoque conceptual.

Certains enseignants marquent davantage les esprits étudiantins que d'autres. Jean Boulaine, ses cours, sa conception des sols et sa façon de transmettre son savoir m'ont profondément marqué et ont déterminé dès la première année d'Agro mon envie de travailler sur les sols. Deux points en particulier ont retenu mon attention (Boulaine, 1976). Le premier était le fait d'énoncer très clairement que le sol était un volume 4D, la quatrième dimension – le temps – devant nécessairement être prise en compte dans les études pédologiques. Le second point était le constat que le pédologue devait travailler à une double infinité de niveaux. La première infinité – spatiale – s'étend de l'angström (approches aux RX, par exemple) aux milliers de kilomètres (cartes mondiales); la deuxième – temporelle – va de la nano-seconde, temps de la réaction chimique, à la dizaine de millions d'années, échelle de la formation des latérites. Ces enseignements, une fâcheuse (pour un Agro) inclination naturelle à préférer l'archéologie et les études paléoenvironnementales à l'analyse du comportement physico-chimique des sols, et des opportunités de carrière ont fait que l'essentiel de mes travaux concernent l'utilisation des archives pédologiques pour reconstituer les paléoenvironnements et les dynamiques temporelles des écosystèmes. Un contact presque quotidien avec des géomorphologues, quaternaristes, géoarchéologues et archéologues me montre que de grandes ambiguïtés existent encore au sein de ces communautés dans la perception des sols, amenant à des confusions entre sols et formations superficielles, entre phases de mise en place de matériaux géologiques et processus de pédogenèse affectant ces matériaux. Ces confusions induisent des erreurs sur les interprétations temporelles. Elles sont donc susceptibles de fausser grandement les interprétations chronologiques. En hommage aux enseignements de Jean Boulaine, je voudrais illustrer quelques-uns de ces aspects, sans souci d'exhaustivité, en m'appuyant notamment sur des exemples tirés d'expériences personnelles. J'assume également le parti pris de certains propos.

ROCHES ET SOLS: TEMPS SUPERPOSÉS, TEMPS EMBOÎTÉS, TEMPS MÉLANGÉS

La stratigraphie est fondée sur quelques principes simples: principe de continuité, principe d'identité paléontologique, principe de superposition... qui permettent, entre autres, d'identifier les phases successives de mise en place de matériaux et les accidents qui ont affecté ces matériaux *a posteriori*. Sous une apparente simplicité, les processus sont en réalité très complexes: tous les sédiments ne se déposent pas horizontalement (environnements deltaïques, par exemple);

les constituants grossiers ou fins des conglomérats et grès ont une histoire préalable avant leur sédimentation, et sont donc plus anciens que la couche qui les contient; à l'inverse, la diagenèse aboutit à la formation de minéraux (dits de néoformation) plus récents, etc.

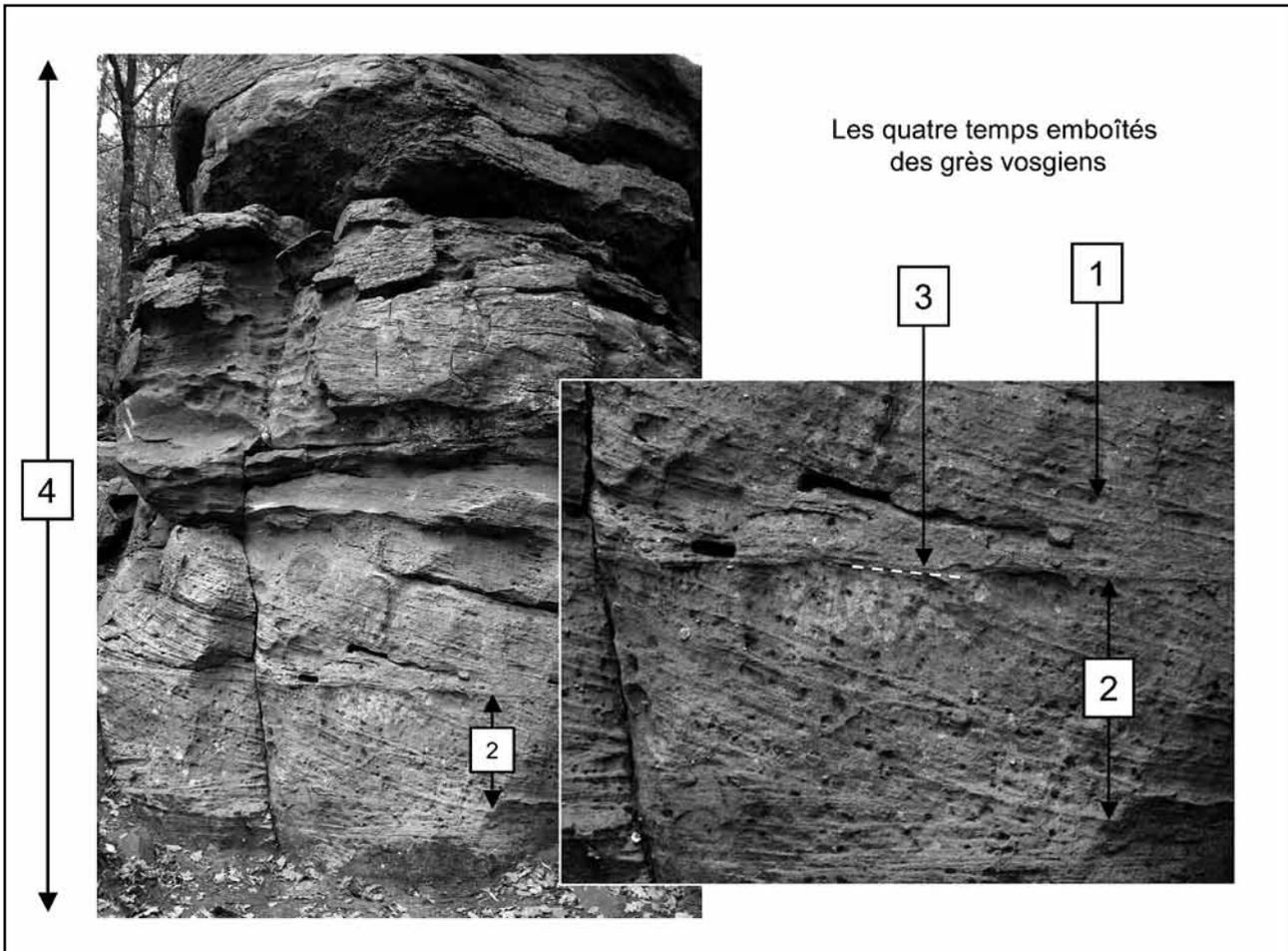
De plus, des temporalités différentes sont mises en jeu dans les phénomènes de dépôt. Ce point est illustré par la *figure 1*. La couche géologique photographiée ici est un grès vosgien, formation fluviatile à stratification oblique, résultant du dépôt par des cours d'eau à chenaux en tresses de matériel sableux, contenant parfois des galets. Différentes temporalités peuvent y être observées (Gall, 1995). L'unité temporelle de base (1) est celle de la séquence élémentaire de crue: quelques millimètres, un centimètre de sable, déposés en quelques heures, parfois en quelques jours. Ces séquences se succèdent au sein d'un chenal (2). La durée de vie de ces chenaux actifs, liés à un fonctionnement saisonnier très contrasté et dynamique, est variable: de la saison (crue) pour les plus petits, à sans doute quelques dizaines d'années pour les plus grands. Entre deux chenaux, des discontinuités nettes soulignent des ruptures stratigraphiques (3). Ces lacunes témoignent de l'érosion partielle ou totale de sédiments entre deux chenaux. La durée de ces épisodes érosifs est quasiment impossible à reconstituer, de même que l'épaisseur de sédiments enlevés, la durée nécessaire pour le dépôt de la tranche enlevée et bien sûr, les événements que ces couches avaient enregistrés. Ce temps n'est pas répertorié dans les strates restantes. L'empilement de tous les chenaux (4) forme la couche géologique: le grès vosgien, formation du Bundsandstein (Trias inférieur germanique, continental) moyen, dont la formation a duré quelques millions d'années au sein des 10 millions qui correspondent à la durée totale du Bundsandstein.

On voit bien ainsi que les temps géologiques sont complexes. Il n'empêche: il s'agit pour l'essentiel de temps (1) superposés, (2) relatifs et (3) emboîtés que des règles simples permettent d'appréhender, notamment grâce au fait qu'après leur dépôt, l'enfouissement fige, fossilise les structures... et leur contenu.

Dans les sols actifs, cette belle ordonnance n'existe guère. Visuellement, le passage d'une roche mère bien stratifiée à un sol se traduit par une disparition rapide des strates et par l'apparition d'une nouvelle organisation de nature différente, pédologique. Ce passage dans un « nouveau monde » doit s'accompagner d'une révolution dans la façon de penser le temps. Les sols peuvent en effet être considérés comme des réacteurs, dans lesquels de la matière – principalement des résidus végétaux et des minéraux – est en permanence altérée, transformée, détruite, néoformée, ingérée, mais aussi relarguée dans le milieu extérieur sous forme de gaz carbonique dans l'atmosphère et d'ions dans les cours d'eau, par un ensemble de processus biologiques, physiques et chimiques très divers. Ces processus se traduisent par toute

Figure 1 - Les quatre temps des dépôts de grès vosgien. 1 : le temps de la séquence élémentaire de crue (lamine) : quelques heures à quelques jours ou quelques semaines ; 2 : le temps du chenal : de la saison à quelques dizaines d'années ; 3 : le temps de la lacune : inconnu ; 4 : le temps de la couche géologique (million d'année). Escarpements de Gueberschwihr (Haut-Rhin).

Figure 1 - The four times corresponding to the deposit of the « Grès vosgien » sandstone. 1: the elementary rising sequence (some hours to some days); 2: the channel dynamics (seasonal rising to some decennies); 3: erosion hiatus (unknown duration); 4: the duration of the sandstone deposit (a few millions of years). Gueberschwihr (Dept. of Haut-Rhin, Alsace)..



une série de transferts, dont les principaux sont synthétisés par la *figure 2* Le cycle de l'eau et des éléments en solution qu'elle contient (en bleu sur le schéma) est suffisamment connu pour ne pas être détaillé ici, entre entrées (pluies, pluviollessivats, ruissellement amont), sorties (évapotranspiration, ruissellement aval) et dynamique au sein du système-sol (infiltration verticale, écoulement hypodermique, transferts latéraux). Le ruissellement s'accompagne de phénomènes érosifs (en brun), avec gain de terre par colluvionnement depuis l'amont ou perte par ablation vers l'aval. Au sein même du sol, le lessivage des argiles, les alternances humectation-dessiccation, gel-dégel sont des processus mécaniques qui déplacent terre fine et éléments grossiers. La descente du front d'altération (limite roche-altérite) et du front pédologique (limite altérite –

horizon S ou B) permet l'incorporation de nouveaux éléments au sol, à un rythme très lent. Enfin, la bioturbation est un phénomène essentiel de brassage de terre, dans les sens verticaux montant et descendant. Les chablis et de nombreux organismes animaux: vers de terre, termites, taupes, fourmis, rongeurs... concourent à ce processus majeur que l'on peut mettre facilement en évidence dans un vivarium (*figure 3*). Bref, dans les sols, le temps est un temps mélangé, moyenné, dont il est souvent difficile d'établir les règles. Nous en donnerons un exemple. Les sols contiennent souvent des charbons de bois, vestiges d'anciens incendies naturels ou de phases de mises en valeur du milieu par défrichement. Ces charbons entrent dans le sol *via* sa surface. Enfouis mécaniquement sous de la terre remontée en surface par la faune du sol, l'enfouissement

Figure 2 - Un schéma synthétique des transferts de matière dans les sols.

Figure 2 - Synthetic scheme of material fluxes in soils.

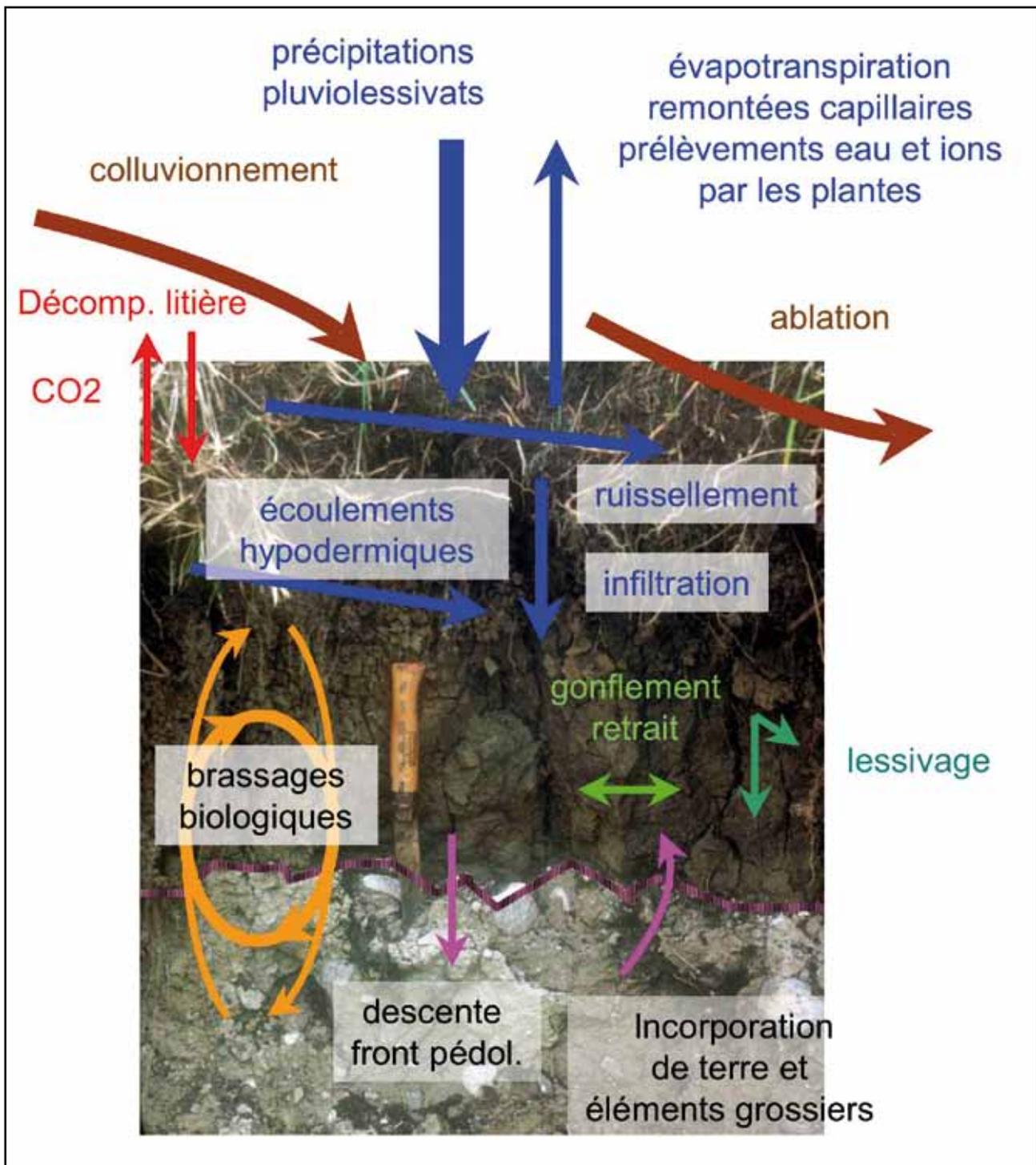
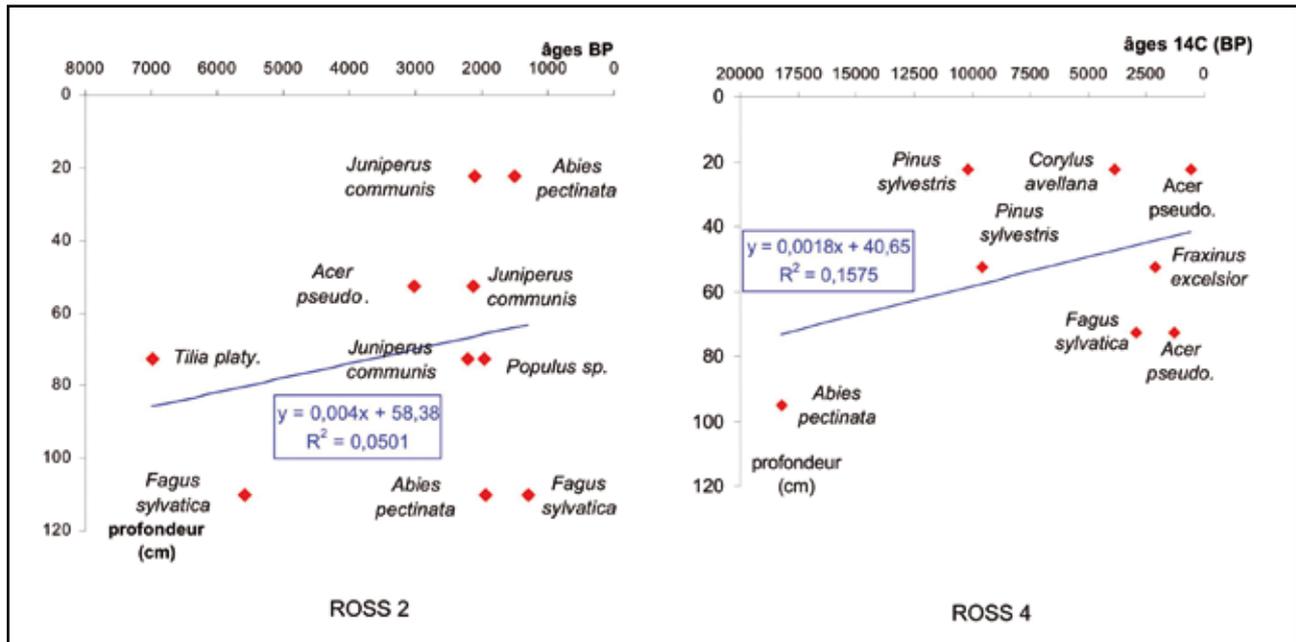


Figure 4 - Répartition de charbons de bois en fonction de leur âge dans deux profils de sols du massif du Rossberg (Vosges haut-rhinoises) (d'après Schwartz *et al.*, 2005 ; Goepf, 2007).

Figure 4 - Relationship between the ^{14}C age of charcoal and the depth in two soils of the Rossberg mountain (Vosges mountain, dept. of the Haut-Rhin; according to Schwartz *et al.*, 2005; Goepf, 2007).



Dans le premier exemple (figure 5), nous considérerons un sol idéal, non soumis à des épaissements par colluvionnement ou à de l'ablation de matériau, et nous nous intéresserons à l'ancienneté de la présence d'un constituant donné dans le sol. La photo montre une limite très nette entre l'horizon d'altération de la roche mère, qui est une moraine du Pléistocène supérieur, et l'horizon S_{ca} . Nous appellerons cette limite *front pédologique*, par analogie au front d'altération qui marque la limite entre altérite et roche mère saine. Cette limite a tendance à progresser lentement avec le temps, notamment grâce à la dissolution progressive des carbonates.

On considérera qu'un fragment de roche, élément grossier résiduel, entrera dans le système sol dès lors qu'il sera dépassé par la progression vers le bas du front pédologique. Il devient dès lors évident que les éléments grossiers résiduels entrés en dernier dans le sol sont ceux qui sont situés à proximité immédiate de ce front, tandis que ceux localisés dans les horizons de surface (et qui sont les plus altérés dans un sol idéal de ce type), sont en moyenne les éléments entrés précocement dans le système. Les plus « vieux » sont donc en surface, les plus « jeunes » en profondeur.

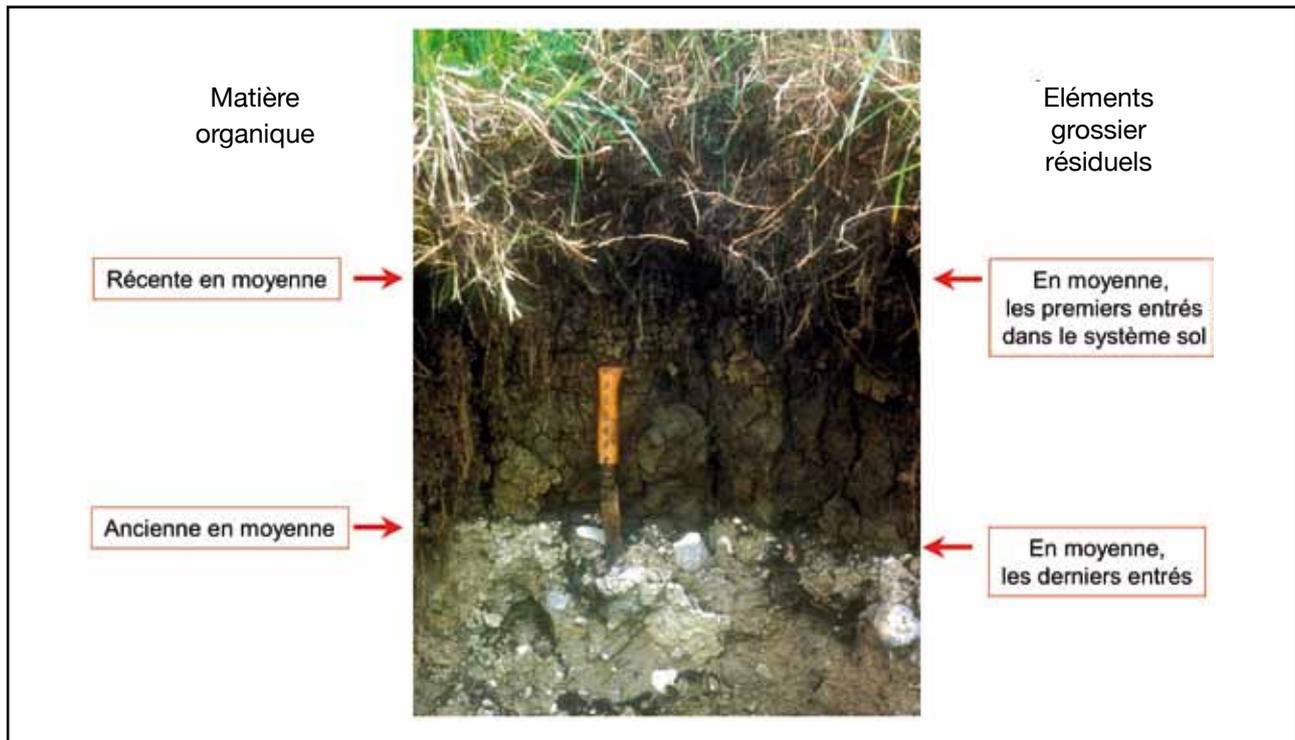
La matière organique a une dynamique exactement opposée. La source est située en surface (litière) ou dans les horizons supérieurs (rhizosphère), zones d'activité biologique maximale. La plus grande partie de cette matière organique sera rapidement biodégradée dès la zone de production et

seul un pourcentage statistiquement faible pourra migrer en profondeur par lessivage (matière organique liée aux argiles), solubilisation (complexes organo-métalliques des podzols) ou bioturbation. L'ensemble de ces phénomènes, que nous ne détaillerons pas (voir par exemple Balesdent et Guillet, 1982 ; Guillet, 1990), aboutit au fait qu'en moyenne la matière organique des horizons de surface est jeune, quelques années à quelques dizaines d'années, tandis qu'en profondeur elle peut avoir des âges plurimillénaires, avec un gradient variable selon le type de sol (Guillet, 1979), de l'ordre de 150 à 600 ans par tranche de 10 cm. La mesure de l'âge « moyen » des matières organiques de sols actifs, exprimé par le terme de Temps Moyen de Résidence (TMR, ou MRT en anglais) est dans la pratique non pas un âge moyen, mais une espérance de vie : c'est le temps passé en moyenne dans le compartiment sol entre l'entrée (par décomposition des matières organiques fraîches) et la sortie (par minéralisation). En faisant l'analogie décomposition = naissance et minéralisation = mort, on a bien la même définition que pour l'espérance de vie d'une population humaine.

Le deuxième exemple détaille le devenir de deux types de carbone différents dans un sol : celui des matières organiques, et celui des charbons de bois (fig. 6). Prenons là encore un sol idéal. Le TMR des matières organiques est donné à titre indicatif. Il n'a pas été mesuré, mais l'ordre de grandeur est celui de la réalité : 50 ans dans les horizons de

Figure 5 - La répartition des constituants en fonction de la profondeur et de l'ancienneté de leur présence dans le sol dépend le type de constituants.

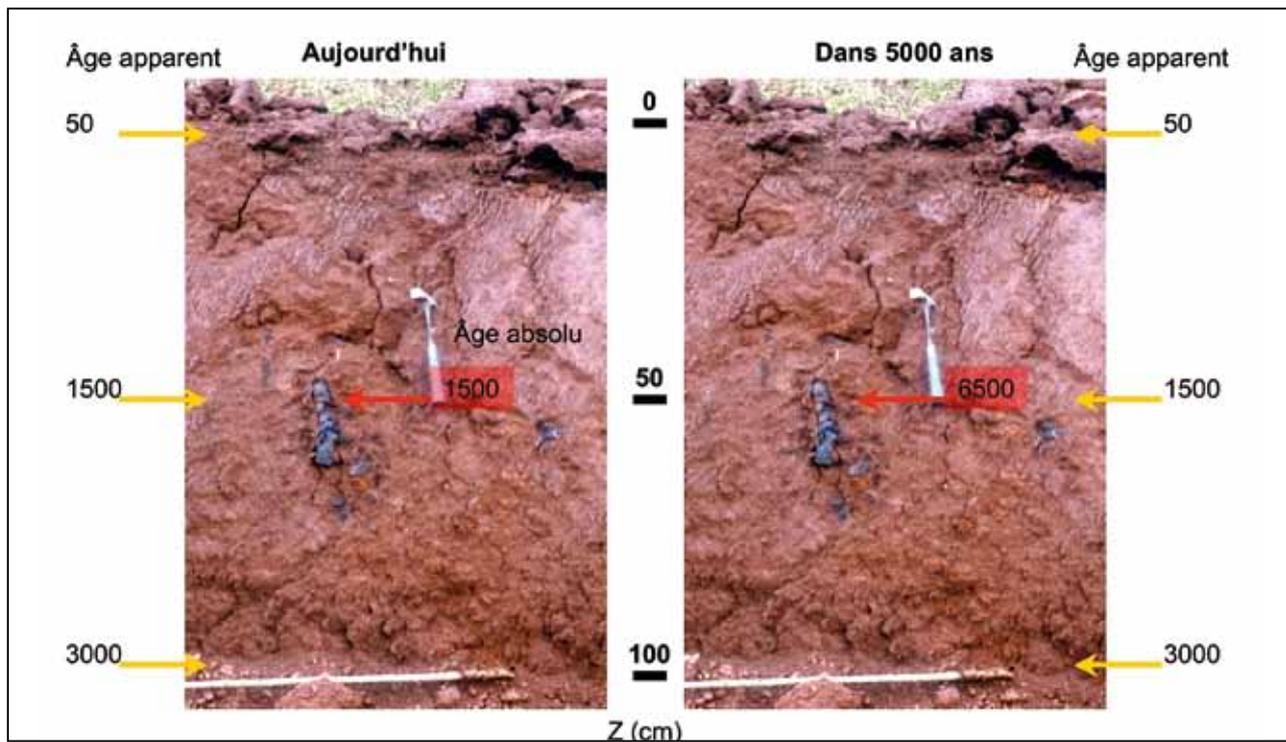
Figure 5 - The occurrence of soil components with depth and age depends of the kind of component.



surface, 1 500 ans à 50 cm de profondeur et 3 000 ans à 1 m. Dans ce sol, on a échantillonné à 50 cm de profondeur un charbon de bois, dont la mesure d'âge au ^{14}C a donné un âge de 1 500 ans: on a ici volontairement choisi une valeur identique pour la valeur du TMR de la matière organique et l'âge du charbon. Imaginons que nous puissions revenir, 5 000 ans plus tard, refaire les mêmes analyses. Si on fait abstraction des questions évidentes de calibration des âges ^{14}C , le charbon de bois aurait, sans surprise, un âge de 6 500 ans. En revanche, le TMR des matières organiques n'aurait pas évolué. Il serait resté à l'identique: 50, 1 500 et 3 000 ans. L'explication en est simple, et applicable dans de nombreux domaines. Dans un compartiment donné soumis à une évolution longue, les flux d'entrée et de sortie de matières ont, à l'issue d'une phase initiale de mise en route du système, tendance à s'équilibrer quand les flux de sortie sont une fonction de la taille du compartiment, ce qui aboutit à une stabilisation de la taille du compartiment. C'est ainsi que le TMR de la matière organique fraîche des litières forestières est de quelques mois à quelques années, et cela même dans des forêts âgées de plusieurs milliers d'années. C'est pour la même raison que la teneur de l'atmosphère en ^{14}C et celle des océans en sels sont relativement constantes.

Si on en revient au profil de sol de la *figure 6*, on retiendra deux faits importants de cette petite simulation: (i) si identité il y a entre TMR de matière organique et âge absolu d'un charbon, cela est le fait du hasard et n'est pas appelé à durer; (ii) dans des sols biologiquement actifs, on ne peut se servir d'âges obtenus sur des charbons pour dater des évolutions paléoenvironnementales mises en évidence par des variations des caractéristiques des matières organiques.

Le premier point (i) a été illustré par différentes études. Ainsi, Pessenda *et al.* (1997) montrent bien cette absence de relation entre les deux types de constituants dans un sol du Brésil. Dans les Vosges, l'âge des charbons de bois mesuré par Goepp (2007) ne coïncide pas du tout avec l'augmentation régulière du TMR des matières organiques avec la profondeur. La seule exception que nous connaissons à cette règle est donnée par Boulet *et al.* (1995), qui notent une coïncidence stricte entre les deux séries de mesure. On avancera ici une hypothèse explicative: les mesures de TMR données par ces auteurs n'ont pas été faites sur la matière organique totale, mais sur l'humine. Or, celle-ci est par définition la fraction non extractible par les solvants habituels. Dans un sol indiqué comme très riche en charbons par les auteurs, il est vraisemblable que la fraction « humine » soit en partie

Figure 6 - Vieillesse du carbone dans les sols en fonction du type de constituant, matière organique ou charbon.**Figure 6** - Age evolution of carbon in soils, as a function of the carbon type: organic matter or charcoal.

constituée de microparticules charbonneuses, ce qui pourrait être une explication au moins partielle.

Le deuxième point (ii) pose de grands problèmes méthodologiques, comme illustré par une étude menée par Oslisly *et al.* (1996) au Gabon. Dans cette étude, les auteurs tentent de montrer sur la base de la valeur du ^{13}C des matières organiques du sol que les savanes de la Lopé étaient héritées du Pléistocène. La chronologie leur est fournie par des datations de charbons de bois au contact de ces matières organiques. Mais, comme on l'a vu (*cf. supra*), le TMR de ces matières organiques ne peut être déduit des datations de charbons et n'a de toute manière pas la même signification. Au vu de la profondeur à laquelle ont été effectués les prélèvements, l'histoire enregistrée par les matières organiques ne dépasse pas quelques millénaires. Il s'agit donc d'un biais méthodologique majeur, qui ne permet pas de prouver l'hypothèse (Schwartz, 1997). En toute rigueur, il n'est pas non plus possible de conclure en sens inverse sur la base des éléments actuellement disponibles. Cependant, au vu du contexte régional, il est bien plus probable que ces savanes s'inscrivent dans le contexte de l'Holocène supérieur (Schwartz, 1997).

Par ailleurs, de façon plus générale, les éléments développés ici montrent bien que « dater » des matières

organiques ne renseigne pas sur l'âge du sol. Un TMR de 50 ans sur des matières organiques de surface ne signifie pas que le sol est jeune. Il peut avoir plusieurs millions d'années. Tout au plus, l'âge moyen le plus élevé mesuré dans un sol donnera l'âge minimum de ce matériau. Ceci est aussi une différence fondamentale avec les sédiments et – moyennant quelques hypothèses complémentaires (*cf. infra*) – avec les paléosols enfouis. Il est toutefois parfois possible de se rapprocher de l'âge absolu du sol. Ainsi, Favilli *et al.* (2009) ont daté des matières organiques réfractaires à l'extraction par les solvants dans des sols développés sur des moraines du dernier maximum glaciaire. Leur TMR est quasiment l'âge des dépôts morainiques. Ceci s'explique par le fait qu'elles se sont fixées très précocement sur des sites particuliers d'argiles dès les phases d'altération, ont saturé ces sites, bloquant ainsi la fixation de matières plus récentes. Leur stabilité les a préservées. Dans ce cas particulier, le TMR est quasiment l'équivalent d'un âge absolu.

COMPOTEMENT DES ARCHIVES PÉDOLOGIQUES PAR RAPPORT AU TEMPS

Les questions soulevées ici démontrent bien la nécessité de tenir compte de la dynamique des éléments étudiés. Pour cette raison, nous avons proposé de regrouper les différents types d'archives pédologiques en trois grandes catégories (Schwartz, 2004) dans les sols fonctionnels (les paléosols enfouis, scellés échappent à ce schéma). Nous les reprenons ici brièvement (fig. 7).

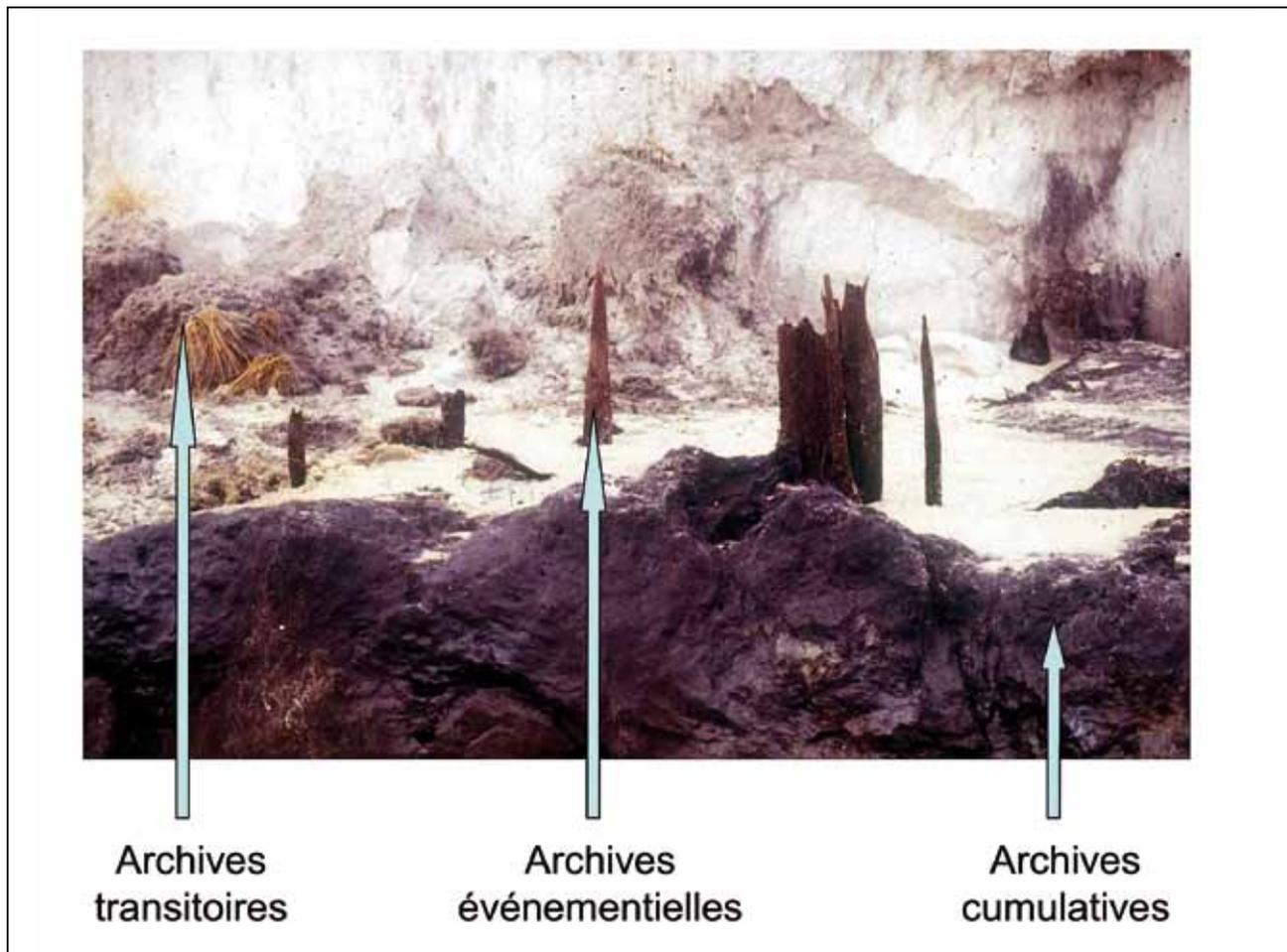
Le premier groupe est celui des « archives transitoires ». Il correspond à l'ensemble des éléments qui font partie du fonctionnement continu du sol, y entrent à un moment donné à un rythme relativement régulier, y séjournent pendant un laps de temps plus ou moins long (TMR), avant d'en être éliminés par différentes voies. Les matières organiques fraîches

des litières, la matière organique humifiée des horizons de surface, les nitrates libérés par la minéralisation des matières organiques sont quelques exemples de ce type d'archives, dont la mémoire recouvre une période variable, fonction bien évidemment du TMR.

Le second groupe (archives événementielles) correspond à des constituants qui ne relèvent pas du fonctionnement régulier du sol, mais y arrivent accidentellement lors d'événements particuliers, rares même s'ils peuvent être cycliques. On citera, par exemple, les charbons de bois qui résultent de brûlis anthropiques lors de phases de défrichements forestiers ou d'incendies de forêts naturelles, dont la plus ou moins grande fréquence est une fonction climatique. Le césium 137 produit par l'explosion des bombes atomiques ou par l'accident de Tchernobyl en 1986 fait aussi partie de ce type d'archive. Sur la *figure 7*, cette catégorie est illustrée par des restes racinaires datés d'entre 3000 et 6000 ans selon les individus. Ils appartiennent à des

Figure 7 - Les différents types d'archives pédologiques par rapport aux dynamiques temporelles.

Figure 7 - *The different kinds of soil archives as a function of temporal dynamics.*



essences de forêts ombrophiles et témoignent du passé forestier des podzols du littoral congolais, occupés par de la savane depuis 3000 ans environ (Dechamps *et al.*, 1988). Les investigations que ce type d'archives autorise à l'égard des temporalités sont très variables et dépendent de leur stabilité par rapport à la dissolution, la minéralisation ou à d'autres phénomènes comme la désintégration: ainsi, la période de ^{137}Cs étant de 30 ans, au bout de 300 ans, il ne subsiste plus que 0,2 % de la masse initiale. Les matières organiques récalcitrantes, stabilisées sur les argiles étudiées par Favilli *et al.* (2009), cités *supra*, font aussi partie de cette catégorie. Elles peuvent apporter des éléments chronologiques précis sur toute la période d'utilisation du ^{14}C , soit une durée totale de 40000 à 50000 ans selon les protocoles analytiques. Ces archives sont particulièrement utiles quand on peut les relier à des événements bien calés chronologiquement. Ainsi, la datation des macro-restes végétaux et des charbons permet la reconstitution d'évolutions paléoclimatiques ou d'actions anthropiques; les malheureuses contaminations au ^{137}Cs de Tchernobyl ou Fukushima ont servi ou vont peut-être servir à d'utiles études sur la dynamique d'écosystèmes, à des suivis hydrologiques, des bilans d'érosion, à la quantification de la bioturbation, etc, toutes études pour lesquelles le T_0 sera connu avec une très grande précision.

Le dernier groupe, qualifié d'archives cumulatives, correspond à des constituants très stables, qui entrent régulièrement dans le sol et s'y accumulent en raison précisément de cette stabilité. Leur stock augmente donc avec le temps. C'est le cas, par exemple, de la quantité de matière organique dans certains alios humiques de podzols. Ainsi, sur les sables Bateke, la quantité de matière organique de ces accumulations formées en 10000 ans environ atteint la valeur record de 2200 t/ha (Schwartz, 1988). Les minéraux lourds les moins solubles libérés par l'altération font aussi partie de cette gamme d'archives, de même que le cuivre apporté par les produits phytosanitaires depuis une centaine d'années dans le vignoble. Celui-ci n'est quasiment pas éliminé sous forme soluble. Dans certains vignobles, les teneurs de cuivre accumulés depuis une centaine d'années atteignent 1 ‰. Le calcul des stocks permet de faire des bilans d'érosion.

L'APPROCHE DE TERRAIN : STRATE VERSUS HORIZON

Les approches de terrain nécessitent également des éclaircissements, en raison de confusions parfois possibles entre phases de mise en place de matériaux (sédimentation et

Figure 8 - Podzol géant sur le littoral congolais, en cours de démantèlement par l'érosion marine : les alios humiques (au milieu de l'image) résistent mieux au phénomène que les horizons E, meubles (à gauche).

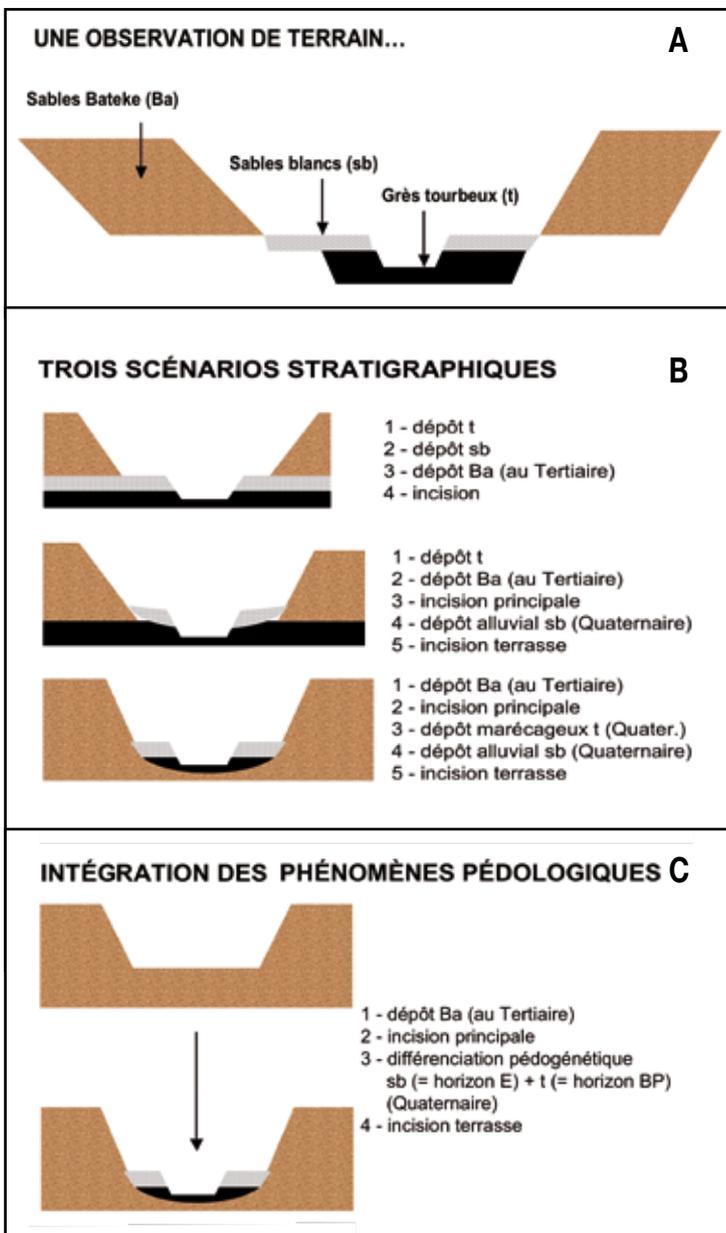
Figure 8 - The demolition of a giant podzol by marine erosion near Pointe-Noire (Congo). The humic pan (BP horizon) is more resistant than the loose white sands (E horizon, on the left of the picture).



Figure 9 - Une observation de terrain, quatre interprétations.

A : l'observation de terrain à partir des affleurements superficiels : trois niveaux de sables étagés dans l'espace ; B : les trois interprétations stratigraphiques qui en découlent, de la plus simple (et plus ancienne) à la plus élaborée ; C : l'interprétation actuelle : différenciation d'un sol dans des sables Bateke soumis à l'influence d'une nappe d'eau battante. La prise en compte des processus pédogénétiques change complètement le schéma chronologique.

Figure 9 - One observation on the field, four interpretations. A: on the field, one can observe three sands levels; B: Three stratigraphic interpretation of the observation on the field, from the older one to the most recent and elaborate; C: Taking in account the pedogenetic processes changes totally the chronological schema.



strates) et différenciations ultérieures (pédogenèse et horizons).

A priori, strates et horizons correspondent à des concepts bien différents. Ils ont en commun le fait d'être l'unité descriptive de base de coupes géologiques ou de profils pédologiques et d'être en premier lieu définis par comparaison avec des niveaux situés au-dessus ou en dessous, et présentant au moins un caractère différent. En dehors de cas particuliers, la comparaison devrait s'arrêter là tant les concepts sont différents. Le principal des distinguos réside justement dans le rapport au temps. Dans les strates, il y a par essence même un rapport au temps évident. La présence de deux strates indique une superposition de matériau; sauf cas particulier, la strate située au-dessus de l'autre est plus récente. Dans les sols, la superposition d'horizon n'implique pas de différences chronologiques: les horizons E et BT d'un luvisol se forment non par dépôts successifs, mais par différenciation au sein d'un matériau, comme par exemple un loess au préalable décarbonaté. Les horizons E et BT d'un luvisol ont rigoureusement le même âge, car c'est l'appauvrissement du premier en argile qui permet la formation du second par enrichissement, *via* le lessivage! Et s'il faut donner un âge relatif aux horizons des sols, on dira que les plus vieux sont les horizons A et C, les horizons intermédiaires étant systématiquement plus jeunes que les précédents – tout au moins lorsqu'une roche saine à l'affleurement est soumise au jeu de l'altération. Il importe donc de ne pas avoir une vision stratigraphique de la différenciation en horizons, sous peine de faire de graves erreurs d'interprétation. Nous en donnons deux exemples. Le premier a valeur historique, le second est plus anecdotique.

Le premier exemple que nous développons est celui des podzols du pays Bateke. Dans toute l'Afrique centrale et en Amazonie se trouvent des podzols très développés, auxquels leurs imposantes dimensions verticales (plusieurs mètres d'épaisseur parfois pour les horizons E et aussi pour les alios humiques des horizons BP) ont valu le nom de podzols géants (*giant podzols*: Jenny, 1948). L'induration des horizons BP en alios humiques confère à ceux-ci une plus grande résistance à l'érosion. Ceci et les dimensions verticales peu courantes des horizons ont dans le passé favorisé la confusion entre horizons et strates. La *figure 8* montre un podzol de ce type photographié sur le littoral congolais. Au vu de cette image, on

comprend bien qu'il est tentant de décrire les horizons E du podzol comme une strate de sables blancs et l'altos humique comme un « grès tourbeux ».

Ce mode de description a été fréquemment employé par le passé dans le pays Bateke, région où les podzols ont été de longue date décrits par des géologues, des géomorphologues et des archéologues, bien avant que les pédologues ne s'y intéressent. On lira Schwartz (1985) pour une synthèse bibliographique plus poussée. Sur le terrain, on observe (fig. 9A) trois niveaux de matériaux sableux différents. Les sables Bateke, épais de plusieurs dizaines de mètres, de couleur jaune, à teneur en argile comprise entre 3 et 15 %, constituent l'armature des collines et plateaux de cette région. Ils sont rapportés au Tertiaire, sans plus de précision. Les « sables blancs » affleurent dans les fonds de vallée, souvent en position de terrasse. Ils sont donc situés *topographiquement* sous les sables Bateke. Leur épaisseur varie de 1 à 8 m. Dans la pratique, il s'agit des horizons E des podzols géants, constitués de sables siliceux quasiment purs. Ils surmontent des niveaux indurés par un ciment organique, épais de 1 à 3 m environ.

Ces derniers, qualifiés par les géologues et géomorphologues de la première moitié du XX^e siècle de « grès tourbeux », sont en fait les horizons BP d'accumulation cimentés par la matière organique. On a donc, d'après l'observation des surfaces d'affleurement, une apparente succession, du haut vers le bas : sables Bateke – sables blancs – grès tourbeux (fig. 9A).

Trois différentes interprétations stratigraphiques et chronologiques ont été données à cette succession en fonction de l'évolution des connaissances, fondées sur des observations plus précises. Elles sont schématisées sur la fig. 9B, de la plus ancienne (et plus simple) à la plus récente. Ainsi, il a été d'abord considéré que les sables blancs étaient plus vieux que les sables Bateke du Tertiaire, puisque situés en dessous et, de même, que les grès tourbeux étaient plus anciens que les sables blancs. Ultérieurement, la plupart des études ont reconnu qu'il convenait de rattacher ces sables puis aussi les grès tourbeux au Quaternaire, d'où les deux interprétations suivantes. La reconnaissance de la nature pédologique de ces formations (fig. 9C) change complètement l'interprétation. Il est maintenant admis que la formation de ces

Figure 10 - Horizons ou strates ? Un affleurement de diatomite dans le Sahara mauritanien. A : vue générale ; B : plan moyen ; C : manchons racinaires ferrugineux.

Figure 10 - Horizons or strata? Outcrop of diatomite in the Sahara (Mauritania). A: a large view ; B: a nearer view ; C: cylindrical iron accumulations around old disappeared roots.

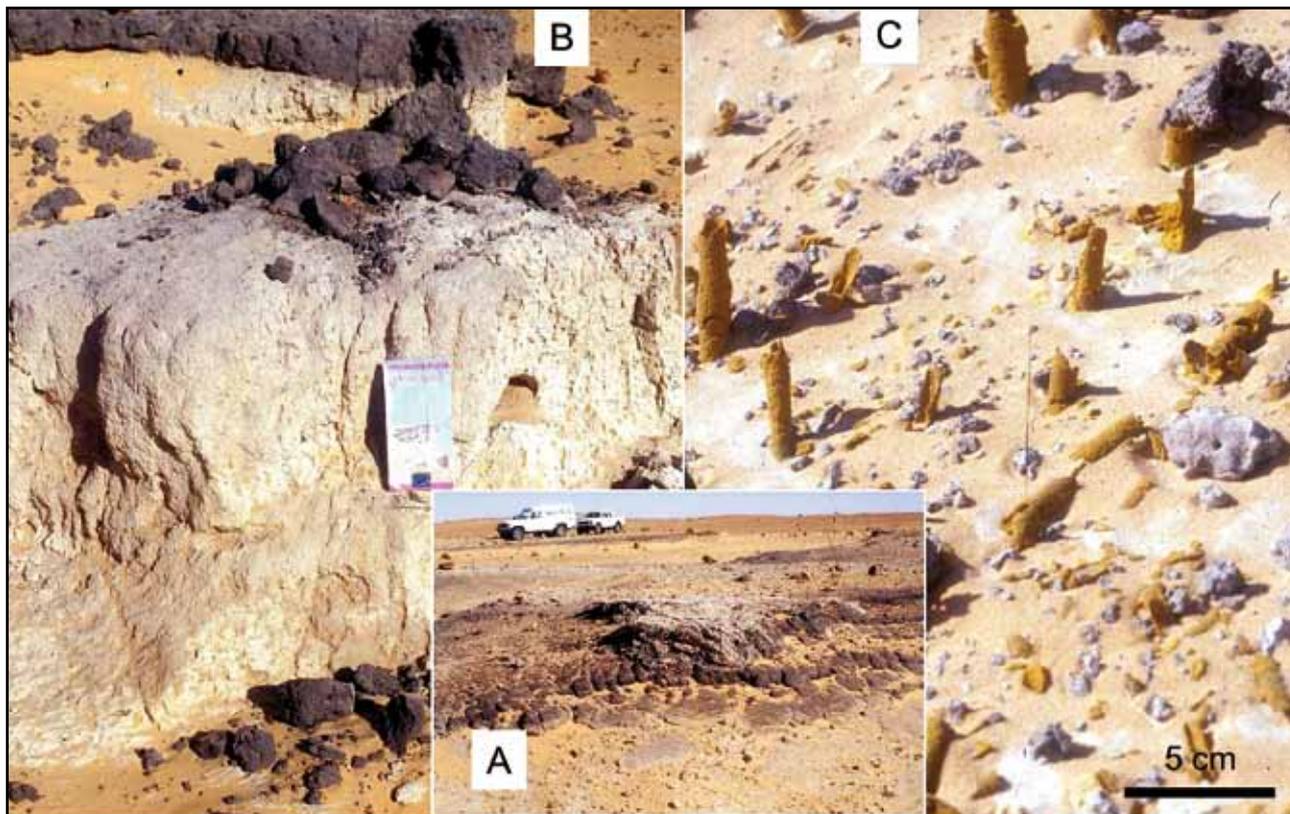
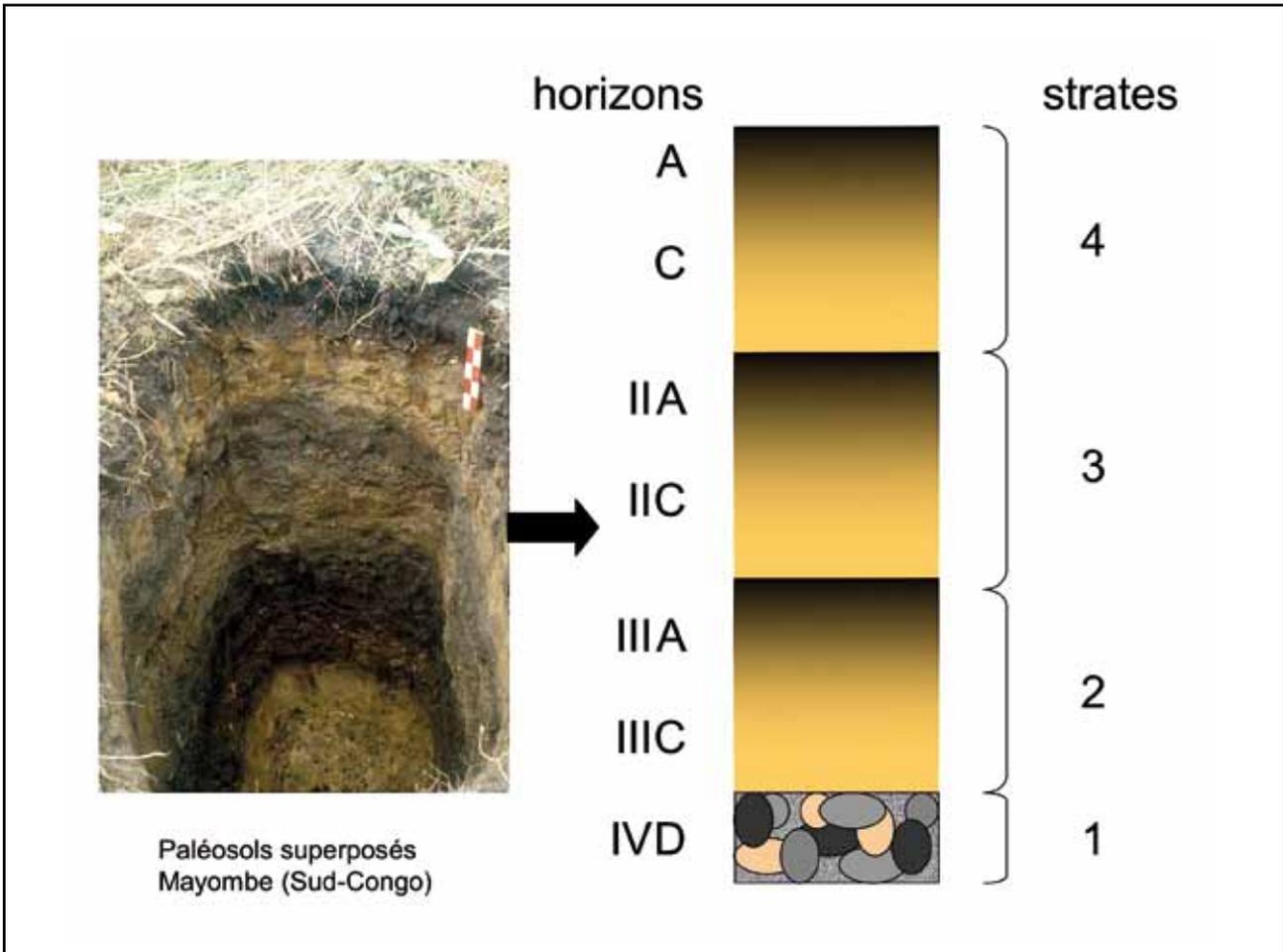


Figure 11 - Pédostratigraphie, un exemple : paléosols superposés (Mayombe congolais). Sept unités morphologiques aboutissent à deux schéma descriptifs, pédologique (à gauche) et stratigraphique (à droite).

Figure 11 - An example of pedostratigraphic description. Three superimposed paleosoils (Congo, Mayombe mountains). Seven morphological units lead to two descriptive schemes : soil description (on the left) and stratigraphic description (on the right).



sols s'est faite, entre environ 30000 et 40000 ans BP, dans des fonds de vallées soumis à l'influence d'une nappe d'eau battante, sous couvert forestier (actuellement les podzols sont sous savanes), par différenciation pédogénétique des sables Bateke. La granulométrie des sables Bateke et celles des podzols sont en effet rigoureusement identiques, de même que leurs caractères exoscopiques. L'interprétation, fondamentalement différente des précédentes, a renouvelé la connaissance paléoenvironnementale du secteur.

Le second exemple n'est pas publié. Il s'agit d'observations de terrain faites dans le Sahara mauritanien en 1996 au cours d'une excursion organisée par Hugues Faure, ancien Président de l'INQUA suite à un colloque, excursion à laquelle il m'a été donné de participer. L'excursion a permis d'observer de nombreuses diatomites. Parmi les affleurements, l'un a suscité

de nombreuses discussions (figure 10). Il s'agit d'une coupe où des accumulations blanches de diatomées, quasi pures, étaient surmontées d'une couche de diatomées mêlées à de la matière organique (figure 10 A et B). De tête, cette couche avait été datée au ^{14}C aux alentours de 5500-6000 BP, sans que ma mémoire ne me permette plus de précision. Pour les géologues de l'expédition, il s'agissait indubitablement de deux strates différentes, l'une purement minérale, l'autre organo-minérale, mais déposée également en contexte lacustre. La datation ^{14}C donnait donc l'âge d'un épisode lacustre tardif, juste avant l'assèchement du Sahara. Pour le seul pédologue, la morphologie de la coupe évoquait celle d'un sol hydromorphe. Cette impression s'est concrétisée par l'observation de cylindres ferrugineux verticaux (fig. 10C) dont la base s'ancrait dans les niveaux de diatomées purs et le sommet se prolongeait dans le niveau organo-minéral. Il s'agissait indubitablement de

manchons ferrugineux développés autour de racines, dans un contexte donc non pas lacustre, mais marécageux. Cet affleurement correspondait en fait à un paléo-sol hydromorphe, à horizons A (le niveau organo-minéral supérieur) et G (le niveau inférieur). L'interprétation qui en découlait était là aussi fondamentalement différente : l'âge ^{14}C ne datait pas un niveau d'eaux vives, mais la phase d'assèchement des lacs du secteur.

UNITÉS STRATIGRAPHIQUES OU UNITÉS MORPHOLOGIQUES ?

De telles confusions ne sont pas la règle. Mais elles ne sont cependant pas rares dans le domaine de la géoarchéologie et des études paléoenvironnementales. Il faut dire que certains concepts entretiennent la confusion. Il en va ainsi de la notion d'« U.S. » (Unité Stratigraphique), terme systématiquement employé dans les rapports de sondages et de fouilles préventives pour désigner l'unité de base de description des coupes. Le problème est que ce terme est employé indifféremment, que l'unité soit une strate ou un horizon pédologique. Tout au plus fait-on une distinction pour désigner parfois l'U.S. supérieure sous le terme de « terre végétale » (!). Malheureusement, le terme d'U.S. fait référence explicitement à une approche stratigraphique, donc chronologique, des unités décrites. Il conviendrait à notre sens de l'abandonner, et de le remplacer au choix par l'une des expressions suivantes *Unité Morphologique* (U.M.), *Unité de Description* (U.D.) ou *Unité d'Observation* (U.E.), qui ont toutes les trois un sens identique sans connotation chronologique, et dont la neutralité permet donc l'utilisation dans tous les cas de figure, sans se soucier des concepts, ni des habitudes culturelles des différentes communautés, pédologues ou géologues.

La *figure 11* est une illustration, à la fois de ces différences culturelles, des ambiguïtés qui en résultent et de la confusion entretenue par le terme d'U.S. La photo représente trois paléosols superposés à la base d'une toposéquence dans le Mayombe congolais. Les matériaux sont des colluvions déposées au-dessus d'un niveau de base constitué par un niveau alluvial de galets (couche D, dans le langage des pédologues). Les niveaux colluviaux mettent en évidence des phases d'érosion brutales dans les savanes intraforestières, qui alternent avec des phases de stabilité pendant lesquelles l'horizon A du sol s'est développé. En effet, les mesures du $\delta^{13}\text{C}$ des matières organiques de ces paléosols ont une signature spécifiquement savanicole (Schwartz, 1991). L'âge des matières organiques a pu être mesuré. Dans ces niveaux enfouis et scellés, peu actifs sur le plan biologique, la signification de la mesure d'âge est différente de celle d'un TMR ou d'une datation absolue. Si on suit Guillet (1979), elle mesure la durée de l'enfouissement, à condition de retrancher de la datation le TMR qu'avait la matière organique au moment de l'enfouissement. S'agis-

sant d'horizons de surface, ce TMR était peu élevé, de l'ordre de quelques dizaines d'années. Il est ainsi possible d'affirmer que les savanes locales ont au moins 1700 ans, ce qui infirme une thèse plus ancienne, à savoir qu'elles sont des créations anthropiques récentes (Vennetier, 1968). On peut ainsi décrire la coupe en terme d'unités morphologiques U.M. (7 unités depuis la base), en terme descriptifs pédologiques classiques, avec des horizons A à la surface de chacun des paléosols, et un horizon C représentant le matériau colluvial quasi-brut, le tout surmontant une roche dure mais déplacée (D), les galets alluviaux; les horizons sont précédés des chiffres romains I (oblitéré ici), II, III et IV désignant classiquement les matériaux géologiques successifs, du plus récent au plus ancien comme c'est l'usage en pédologie lorsque des sols se développent sur des matériaux parentaux différents. Par opposition, sur la droite du schéma, les chiffres 1 à 4 représentent les vraies unités stratigraphiques, notées de la plus ancienne à la base à la plus récente au sommet comme c'est la règle en stratigraphie. Il serait complètement faux de décrire ici 7 U.S.

CONCLUSION

L'ensemble du texte présenté ici, et en particulier les nombreux exemples de confusion liée à la méconnaissance fréquente des mécanismes pédologiques, illustre la nécessité de développer de vraies approches pédostratigraphiques, dans lesquelles sont distinctement séparés les phénomènes de mise en place de matériau des processus de pédogenèse. De telles approches ont été faites et enseignées en d'autres lieux. On pensera par exemple, aux travaux de Roger Langohr et de ses élèves en Belgique. En France, elles restent à développer au niveau de l'enseignement des géosciences appliquées aux études paléoenvironnementales et archéologiques. Une meilleure prise en compte de ces facteurs devrait permettre d'affiner l'analyse des trajectoires temporelles des écosystèmes. C'est le message que je souhaite transmettre ici, à l'issue de ce survol partiel, mais aussi partiel car en quelque sorte militant.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent à tous mes collègues et amis géologues, géomorphologues, archéologues et pédologues dont la fréquentation sur le terrain ont nourri ces réflexions. Une pensée particulière s'adresse à Mmes et Mrs Gebhardt, Guillet, Lanfranchi, Langohr, Lecoq, Leprun, Schneider...

BIBLIOGRAPHIE

- Balesdent J., Guillet B., 1982 - Les datations par le ^{14}C des matières organiques des sols. Contribution à l'étude de l'humification et du renouvellement des substances humiques. *Science du Sol*, 20, 2, 93-112.
- Boulaine J., 1976 - Pédologie générale. Document Offset, INA-PG, Grignon, 238 p.
- Boulet R., Pessenda L.C.R., Telles E.C.C., Melfi A.J., 1995 - Une évaluation de la vitesse de l'accumulation superficielle de matière par la faune du sol à partir de la datation des charbons et de l'humine du sol. Exemple des latosols des versants du lac Campestre, Salitre, Minas Gerais, Brésil. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 320, II, 4, 287-294.
- Carcaillet C., Talon B., 1996 - Aspects taphonomiques de la stratigraphie et de la datation de charbons de bois dans les sols : exemple de quelques sols des Alpes. *Géogr. phys. et Quat.*, 50, 2, 233-244.
- Dechamps R., Guillet B., Schwartz D., 1988 - Découverte d'une flore forestière mi-Holocène (5800 - 3100 B.P.) conservée in situ sur le littoral ponténégrin. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 306, sér. II, 615-618.
- Favilli F., Egli M., Brandova D., Ivyochs S., Kubik P., Cherubini P., Mirabella A., Sartori G., Giaccai D., Haeberli W., 2009 - Combined use of relative and absolute dating techniques for detecting signals of Alpine landscape evolution during the late Pleistocene and early Holocene. *Geomorphology*, (in press) doi:10.1016/j.geomorph.2009.05.003
- Gall J.C., 1995 - Paléocécologie. Paysages et environnements disparus. Masson, Paris, 239 p.
- Goepp S., 2007 - Origine, histoire et dynamique des Hautes-Chaumes du massif vosgien. Déterminismes environnementaux et actions de l'homme. Thèse Univ. L. Pasteur, Strasbourg, 305 p.
- Guillet B., 1979 - Etude du renouvellement des matières organiques des sols par les radioisotopes (^{14}C). In: M. Bonneau et B. Souchier (éds.), *Pédologie*, t.2, Constituants et propriétés des sols. Masson, Paris, p. 210-226.
- Guillet B., 1990 - Le vieillissement des matières organiques et des associations organo-minérales des andosols et des podzols. *Science du Sol*, 28, 285-299.
- Jenny H., 1948 - Great soil groups in the equatorial regions of Columbia, South America. *Soil Science*, 66, 5-28.
- Oslisly R., Peyrot B., Abdessadok S., White L., 1996 - Le site Lopé 2 : un indicateur de transition écosystémique ca 10000 BP dans la moyenne vallée de l'Ogooué (Gabon). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 323, II, 11, 933-939.
- Pessenda L.C.R., Gouveia S.E.M., Gomes B.M., Aravena R., Boulet R., Ribeiro A.S., 1997 - Studies of palaeovegetation changes in the Central Amazon by carbon isotopes (^{12}C , ^{13}C , ^{14}C) of soil organic matter. *Int. Symp. on Isotopes Techn. in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and the atmosphere*, IAEA-SM-349, Vienna, 11 p. + fig.
- Schwartz D., 1985 - Histoire d'un paysage : le lousseke. Paléoenvironnements quaternaires et podzolisation sur sables Bateke (quarante derniers millénaires, région de Brazzaville, R.P. du Congo). Thèse Doct. Etat Sci. Nat., Univ. Nancy I, 211 p. (parue 1988 in collect. Etudes et Thèses, ORSTOM, Paris, 285 p.).
- Schwartz D., 1988 - Some podzols on Bateke sands and their origins, People's Republic of Congo. *Geoderma*, 43, 2/3, 229-247.
- Schwartz D., 1991 - Intérêt de la mesure du $\delta^{13}\text{C}$ des sols en milieu naturel équatorial pour la connaissance des aspects pédologiques et écologiques des relations savane-forêt. Exemples du Congo. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédol., 26, 4, 327-341.
- Schwartz D., 1997 - Commentaire à la note de Richard Oslisly, Bernard Peyrot, Salah Abdessadok et Lee White, Le site de Lopé 2 : un indicateur de transition écosystémique ca 10000 BP dans la moyenne vallée de l'Ogooué. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 323, IIa, 1996, 933-939. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 325, IIa, 5, 389-391.
- Schwartz D., 2004 - Les sols à l'épreuve du temps. Dossier hors série Pour la Science, n° 42 "Le temps des datations", janvier-mars 2004, p. 44-49.
- Schwartz D., Thion M., Goepp S., Schmitt C., Casner J., Rosique T., Wuscher P., Alexandre A., Dambrine E., Martin C., Guillet B., 2005 - Premières datations directes de défrichements protohistoriques sur les chaumes secondaires des Vosges (Rossberg, Haut-Rhin). *Approche pédoanthracologique*. *C.R. Geosciences*, 337, 14, 1250-1256.
- Vennetier P., 1968 - Pointe Noire et la façade maritime du Congo. *Mémoire n° 26*, ORSTOM, Paris, 458 p.

PUBLICATIONS ET DOCUMENTS PUBLIÉS PAR L'AFES

Revue

Science du Sol

Revue scientifique publiée de 1952 à 1993.

Elle comporte 300 à 400 pages par an. Un index est présenté tous les ans dans le quatrième numéro.

A cessé de paraître fin 1993. Certains numéros disponibles.

La Lettre de L'Association

Publiée quatre fois par an, ce journal annonce les nouvelles de l'association, les réunions nationales et internationales ; il donne des critiques d'ouvrages, de thèses, de la documentation, etc.

La Lettre est envoyée à chaque adhérent de l'association : elle accompagne l'adhésion.

Rédacteur en chef : F. Féder.

Etude et Gestion des Sols

Revue trimestrielle, francophone traitant de la connaissance et de l'usage des sols.

Rédacteur en chef : D. Arrouays.

Rédacteurs en chef Adjoints : D. Baize, D. Schwartz

Secrétariat de rédaction : F. Héliès, C. Laveuf, J.-P. Rossignol.

Le Comité éditorial est composé de trente six membres de France et de pays francophones.

Ouvrages

Le Livre Jubilaire (1984)

Point sur les acquis à cette date en matière de science du sol et de pédologie.

Fonctionnement hydrique et comportement du sol (1984)

Podzols et podzolisation

par D. Righi et A. Chauvel : ouvrage publié en coédition par l'AFES et l'INRA, avec le concours du CNRS, de l'ORSTOM, et de la région Poitou-Charentes (1987).

Micromorphologie des sols/ Soil micromorphology

par N. Fédoroff, L.M. Bresson, Marie Agnès Courty, publié par l'AFES avec le concours du CNRS, de l'INAPG, de l'INRA, du Ministère de l'Environnement et de l'ORSTOM (1985) (épuisé).

Carte mondiale des sols et sa légende (1984)

Présentée sous forme numérique.

Le Référentiel Pédologique

par D. Baize et M.-C. Girard, (Coord.) AFES, Association Française pour l'Etude du Sol (FRA), Editions Quae, Versailles (FRA) ; 2009. 405 p. - Collection Savoir-Faire.

Synthèse nationale des analyses de terre : Période 1990-1994

par C. Walter, C. Schwartz, B. Claudot, P.-Aurousseau et T. Bouedo, avec le concours du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

Actes du XVI^e Congrès Mondial de Sciences du Sol, Montpellier - Août 1998

