

# L'horizon en pédologie :

## Naissance du concept dans le monde et son évolution en France

D. Baize<sup>(1\*)</sup>, C. Feller<sup>(2)</sup> et S. Chernyanskii<sup>(3)</sup>

1) INRAE, UR0272, Science du Sol, Orléans, France

2) IRD, UMR Eco&Sols, Montpellier, France

3) Environ Consult LLC, Moscou, Russie

\* Auteur correspondant : denis.baize@inrae.fr

### RÉSUMÉ

Aujourd'hui la notion d'horizon est devenue un concept fondamental de la pédologie, aussi bien sur le plan pratique que d'un point de vue théorique. Sur le terrain au quotidien, les horizons sont les unités de base pour la description et la caractérisation des solums ainsi que pour réaliser les prélèvements. En outre, leur interprétation en matière de pédogenèse ainsi que leur succession selon un axe vertical permettent de classer les sols en référence à une classification ou à un référentiel préétablis. Il est probable que l'usage en science du sol dérive de celui en géologie. Dans cet article, nous essaierons d'en trouver l'origine historique puis nous en fournirons les définitions qui se sont succédé parallèlement à l'évolution et à la maturation du concept dans le monde et surtout en France.

Nous verrons que le concept d'horizon a été utilisé initialement pour désigner une couche, une simple strate observable dans une fosse, dont la seule dimension est l'épaisseur. En un siècle, l'horizon est devenu un volume tridimensionnel, de formes parfois complexes, défini à la fois par son enveloppe et ses propriétés ; il est considéré désormais comme un sous-ensemble d'une couverture pédologique, une notion de base de la pédologie, à la fois abstraction interprétative (l'horizon de référence) et subdivision d'un solum qui, lui, est une réalité tangible.

### Mots-clés

Horizon, sol, pédologie, histoire

Comment citer cet article :

Baize D., Feller C. et Chernyanskii S., 2023 - L'horizon en pédologie : naissance du concept dans le monde et son évolution en France - *Étude et Gestion des Sols*, 30, 33-50

Comment télécharger cet article :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-30/>

Comment consulter/télécharger tous les articles de la revue EGS :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/>

**SUMMARY****THE HORIZON IN PEDOLOGY: Emergence of the concept in the world and its evolution in France**

Today the notion of horizon has become an essential concept of pedology, both in practice and in theory. During daily field work, horizons are the basic units for the description and characterization of soils as well as for sampling. In addition, their interpretation in terms of pedogenesis and their succession according to a vertical axis make it possible to classify soils with reference to a pre-established classification or reference system.

It is likely that its use in soil science derives from that in geology. In this article, we will try to find the historical origin and then provide the definitions that have been given in parallel with the evolution and maturation of the concept in the world and especially in France.

We shall see that the concept of horizon was initially used to designate a stratum, a simple layer observable in a pit, whose only dimension is the thickness. In a century, the soil horizon has become a three-dimensional volume, sometimes with complex forms, defined both by its envelope and its properties, it is today considered as a subset of a soil mantle, a basic notion in soil science, at once an interpretative abstraction (the reference horizon) and subdivision of a solum which is a tangible reality.

**Key-words**

Soil horizon, soil, pedology, history

**RESUMEN****EL HORIZONTE EN PEDOLOGÍA: Nacimiento del concepto en el mundo y su evolución en Francia**

Hoy la noción de horizonte se ha convertido en un concepto fundamental de la pedología, tanto en el plano práctico como en el teórico. Sobre el terreno a diario, los horizontes son las unidades básicas para la descripción y la caracterización de los solums, así como para realizar las muestras. Además, su interpretación en términos de pedogénesis y su sucesión según un eje vertical permiten clasificar los suelos en referencia a una clasificación o a un sistema de referencia preestablecidos. Es probable que la utilización en la ciencia del suelo derive de la utilización en geología. En este artículo trataremos de encontrar su origen histórico y luego proporcionaremos las definiciones que se han sucedido paralelamente a la evolución y maduración del concepto en el mundo y sobre todo en Francia.

Veremos que el concepto de horizonte se utilizó inicialmente para designar una capa, un simple estrato observable en una fosa, cuya única dimensión es el espesor. En un siglo, el horizonte se ha convertido en un volumen tridimensional, de formas a veces complejas, definido a la vez por su envolvente y sus propiedades, y ahora se considera un subconjunto de una cobertura pedológica, una noción básica de la pedología, a la vez abstracción interpretativa (el horizonte de referencia) y subdivisión de un solum que, a su vez, es una realidad tangible.

**Palabras clave**

Horizonte, suelo, pedología, historia

**RIASSUNTO****L'ORIZZONTE IN PEDOLOGIA: La comparsa del concetto nel mondo e la sua evoluzione in Francia**

Oggi la nozione di orizzonte è diventata un concetto essenziale della pedologia, sia sul piano pratico che su quello teorico. Nella pratica quotidiana sul campo, gli orizzonti sono le unità di base per la descrizione e la caratterizzazione dei suoli e per realizzare i prelievi. Inoltre la loro interpretazione in termini di pedogenesi e la loro successione secondo un asse verticale permettono di classificare i suoli in riferimento ad una classificazione o a un sistema di referenziazione prestabiliti. È probabile che l'uso nella scienza del suolo derivi da quello in geologia. In questo articolo cercheremo di trovarne l'origine storica e poi ne forniremo le definizioni che ne sono state date parallelamente all'evoluzione e alla maturazione del concetto in tutto il mondo e in Francia. Vedremo che il concetto di orizzonte è stato inizialmente utilizzato per designare un semplice strato osservabile in una fossa, la cui unica dimensione è lo spessore. In un secolo, l'orizzonte è diventato un volume tridimensionale, di forme a volte complesse definito entrambi dal suo involucro e dalle sue proprietà, è ormai considerato come un sottoinsieme di una copertura pedologica, una nozione di base della pedologia, allo stesso tempo astrazione interpretativa (l'orizzonte di riferimento) e suddivisione di un solum che, lui, è una realtà tangibile.

**Parole chiave**

Orizzonte, suolo, pedologia, storia

Aujourd'hui la notion d'**horizon** est un concept fondamental de la pédologie, aussi bien sur le plan pratique que théorique. Sur le terrain au quotidien, les horizons sont les unités de base pour la description et la caractérisation des solums ainsi que pour réaliser les prélèvements. En outre leur interprétation en matière de pédogenèse ainsi que leur succession selon un axe vertical permettent de classer les sols en référence à une classification ou à un référentiel préétablis.

Ainsi, la description et la caractérisation de différents **horizons de référence** constituent le principal fondement du *Référentiel Pédologique* (AFES, 1992; 1995; 2009) tandis que les **horizons diagnostiques** servent de base à la *Soil Taxonomy* (*Soil Survey Staff*, 1999) comme à la *World Reference Base for Soil Resources* (*ISSS Working group RB*, 1998).

## Les horizons de référence

Les pédologues utilisent couramment les « horizons-concepts » (Boulaïne, 1982) qui sont le résultat de l'interprétation de certains caractères morphologiques propres à l'horizon étudié et que nous considérons comme typiquement associés à des processus pédogénétiques, mais qui résultent aussi de la prise en compte des autres horizons et de divers éléments de l'environnement pédologique. Ces « horizons-concepts » sont l'objet d'une typologie morphogénétique et d'un langage synthétique auquel sont associés des symboles: H, O, A, E, S, BT... Dans le Référentiel pédologique (AFES, 2009), ils sont nommés « horizons de référence » et sont au nombre de 80. Dans cet ouvrage, un horizon n'est pas considéré comme « diagnostique » à lui seul. Ce sont des séquences caractéristiques d'horizons de référence qui permettent de définir la plupart des « références ».

Par exemple:	A/R:	Rankosols
	A/S/C:	brunisol
	A/E/BT/C:	luvisols
	Aca/Sca/Cca:	Calcosols

## Les horizons diagnostiques

Ce sont également des horizons-concepts dont la seule présence oblige de rattacher un solum à une catégorie d'une classification ou d'une typologie sous réserve de respecter certaines conditions de situation, de profondeur ou certains critères analytiques.

Considérés comme significatifs, révélateurs de l'action des différents facteurs pédogénétiques, les horizons diagnostiques servent de base à la *Soil Taxonomy* de l'USDA depuis sa conception (*Soil Survey Staff*, 1999). En effet, la définition des niveaux taxonomiques les plus élevés (de l'ordre au sous-groupe) est basée sur l'existence (ou parfois l'absence) de ces horizons diagnostiques. La *Soil Taxonomy* en définit de nombreux types, à la fois en surface (épipédons) et en profondeur (endopédons).

Les horizons diagnostiques (une quarantaine, à ce jour) sont également déterminants dans le système de la *World Reference Base* (WRB) depuis son origine (*ISSS Working group RB*, 1998). Pour la WRB, les horizons diagnostiques et certaines propriétés des sols sont censés refléter l'expression de processus pédogénétiques, communément reconnus comme intervenant dans les sols. Ils peuvent donc être utilisés pour décrire et définir des catégories de sols. Ils sont considérés comme « diagnostiques » quand ils atteignent un degré suffisant d'expression, ce qui est déterminé par la visibilité, la prééminence, la possibilité d'être mesuré, l'importance et la pertinence vis-à-vis de la formation et de l'utilisation des sols, et des critères quantitatifs. Pour être diagnostiques, les horizons doivent aussi atteindre une épaisseur minimale, qui peut être appréciée en relation avec des facteurs bioclimatiques (on s'attend, par exemple, à ce que les horizons de profondeur soient plus épais en régions subtropicales).

Juger qu'un horizon qu'on a étudié et distingué sur le terrain correspond à un certain type d'horizon conceptuel (horizon de référence ou, *a fortiori*, à un horizon diagnostique), résulte d'une interprétation des informations recueillies au cours d'observations sur le terrain et au laboratoire et grâce aux résultats des analyses. C'est un exercice périlleux car assez subjectif et grandement tributaire des données disponibles.

Le mot horizon est utilisé en géologie comme en pédologie mais avec des significations différentes. Il est probable que l'usage en science du sol dérive de celui en géologie. Dans un premier temps, nous essaierons d'en trouver l'origine historique puis, dans un deuxième temps, d'en fournir les définitions qui se sont succédé parallèlement à l'évolution et à la maturation du concept, en se focalisant sur les conceptions de l'école française.

## 1. L'HORIZON EN GÉOLOGIE - ÉTYMOLOGIE ET SIGNIFICATION

Ellenberger (1979) a fait le point sur l'origine et l'histoire du terme horizon en géologie et paléontologie :

« Horizon est un terme préexistant à la géologie et comme tel, doté d'une inertie sémantique qui ne peut manquer d'influer sur les redéfinitions ultérieures spécialisées. C'est originellement un terme grec, participe présent actif du verbe *horizein* qui signifie limiter, borner, délimiter, fixer la ligne frontière. C'est le « délimitant », et plus spécialement, la ligne qui borne la vue, ... À parler strictement, l'horizon est une entité spatiale géométrique, instrument de délimitation de deux domaines, l'un inférieur, l'autre supérieur ; il y a autant d'horizons que d'observateurs et de lieux d'observations, mais un seul en chaque site considéré. Il n'a en principe ni volume, ni épaisseur... »

L'auteur explique ensuite que, **en géologie**, le sens du mot horizon oscille constamment entre celui d'une mince **couche** aisément reconnaissable grâce à des caractères spécifiques et celui d'une **limite séparatrice** entre deux couches, sans épaisseur.

## 2. L'HORIZON EN PÉDOLOGIE - NAISSANCE DU CONCEPT ET APPARITION DU MOT

### 2.1 Dans un premier temps : le concept sans le mot

Georges Louis Leclerc, comte de Buffon (1707-1788), fut un très grand naturaliste. Les 36 volumes de son *Histoire Naturelle* (1749-1789) le rendirent célèbre dans le monde entier. Feller et Blanchart (2004, p. 168) citent un extrait où Buffon (1819) étudie le sol d'un de ses terrains :

« Je fis sonder, en 1734, par plusieurs coups de tarière, un terrain d'environ soixante-dix arpents d'étendue, dont je voulois connoître l'épaisseur de bonne terre... J'observai, par le moyen de ces sondes, que dans toute l'étendue de ce terrain, la composition des **lits de terre** étoit à très peu près la même, et j'y reconnus clairement le changement successif du terreau en terre limoneuse ».

Buffon reconnaît l'existence de différents horizons superposés et les appelle des « lits ».

Feller *et al.* (2003) et Feller et Blanchart (2004) ont montré en quoi Darwin fut un grand précurseur dans de nombreux domaines touchant aux sciences de la terre et à la science du sol. C'est dès 1837 que Darwin parle de ce sujet, lors d'une communication orale faite devant la Société Géologique de Londres en 1830, et intitulée *On the formation of mould* (Sur la formation de la terre végétale). Toutefois, c'est dans un article de 1840 (Darwin, 1840, p. 506) qu'est présenté pour la première fois le schéma d'un profil de sol, sous prairie (*Figure 1A*), afin d'illustrer le rôle des vers de terre dans l'enfouissement de divers matériaux. Les horizons sont très nettement identifiés et les profondeurs notées avec précision. Mais les différentes couches ne sont pas désignées par des lettres. Dans son texte, Darwin décrit de haut en bas (échelle en *inches*) :

- 0-0.5: *turf* (gazon);
- 0.5-3.0: *vegetable mould* (terre végétale);
- 3.0-4.5: *a layer of fragments of burnt marl, of cinders, and a few quartz pebbles, mingled with earth* (une couche de fragments de marne calcinée, de cendres et de quelques cailloux de quartz mélangés avec de la terre);
- > 4.5: *the original black peaty soil* (le sol noir tourbeux originel).

Dans son célèbre ouvrage « *The formation of vegetable mould through the actions of worms* » (La formation de la terre végétale par l'action des vers de terre), Darwin présente un schéma du même sol (Darwin, 1881, p. 133 - *Figure 1B*). Ce schéma ne correspond manifestement pas au même bois gravé et n'est pas identique à celui de 1840. La légende est également modifiée. Cependant, il présente l'intérêt d'une désignation des horizons en A, B, C et D, même s'il ne s'agit pas là d'une nomenclature pédologique.

Dans son *Histoire des pédologues*, Boulaïne (1989, pp. 101 et 102) nous apprend que Léonce Élie de Beaumont dans ses *Leçons de géologie pratique* professées au Collège de France en 1843-1844, et publiées à Paris en 1845, affirmait déjà (Élie de Beaumont, 1845, p. 135) :

« La terre végétale en couvrant les roches en place contrarie souvent les recherches des géologues ; mais la terre végétale est elle-même un sujet d'observations géologiques ».

Il avait clairement (1845, p. 136) la notion de ce que nous appellerions aujourd'hui les horizons A, B, C et R, qu'il appelle respectivement « terre végétale », « matières meubles », « roches décomposées » et « roches vives en place ».

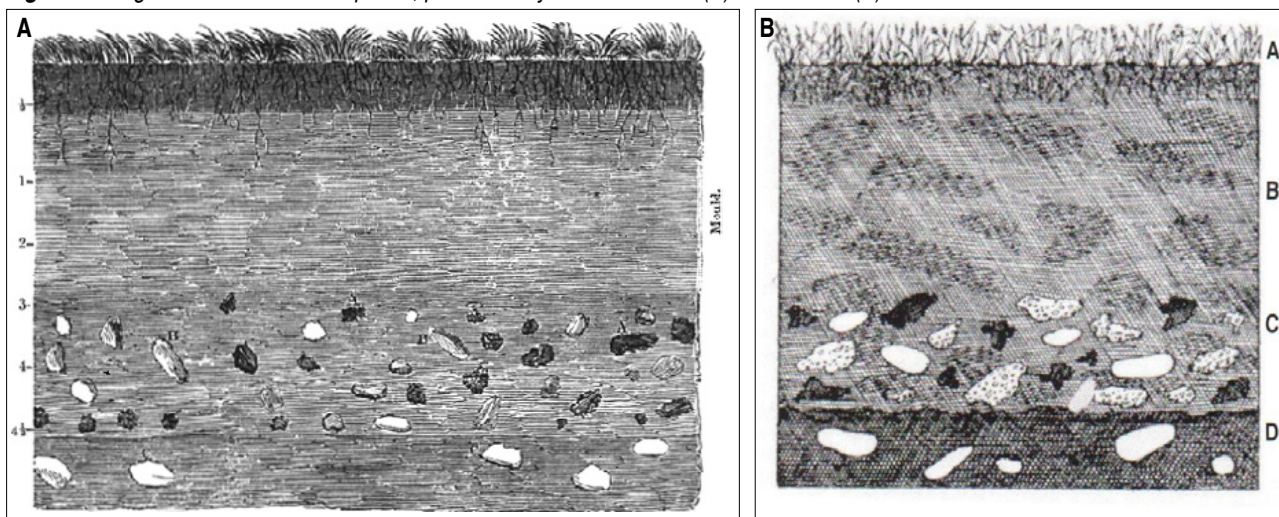
Dans le même ouvrage (p. 105), Boulaïne (1989) signale que F. Senft aurait été le premier, d'après G. Müller (1980), à décrire des profils de sol sur le modèle des profils géologiques et à y reconnaître et signaler la présence des horizons du sol. Toutefois Senft n'emploie pas le terme horizon dans son sens pédologique moderne (Senft, 1847). Plus loin (p. 110), Boulaïne nous rappelle que, dès 1860, E. W. Hilgard (1883-1916), dans son rapport sur la géologie et l'agriculture de l'État du Mississippi, indique que le sol est « la couche superficielle de la terre atteinte par les racines des plantes » qu'il étudie le sol en décrivant des coupes et en divisant celles-ci en plusieurs tranches qu'il nomme « *surface soil* », « *subsoil* »<sup>1</sup>, « *under subsoil* », etc.

Le forestier danois P.E. Müller publie en 1879 et 1884 deux articles en danois sur les différentes formes de l'humus des sols (Müller, 1879 et 1884), qui seront traduits en allemand (Müller, 1887) puis en français (Müller, 1889) sous le titre de « *Recherches sur les formes naturelles de l'humus et leur influence sur la végétation et le sol* ». On y découvre (Feller *et al.*, 2005) que Müller, quelques années avant Dokuchaev, avait étudié les sols forestiers de son pays avec beaucoup de précision et donnait, outre une excellente présentation des strates végétales, une description incroyablement détaillée des horizons organiques et organominéraux. Toutefois, le mot horizon n'est pas mentionné bien que ceux-ci soient clairement représentés dans de nombreuses illustrations. Ils sont aussi schématisés dans un « tableau » en couleurs représentant

<sup>1</sup> Depuis lors, le terme *subsoil* et sa traduction française *sous-sol* ont continué à être employés à tort (car peu clairs) pour désigner les horizons pédologiques non situés en surface. <https://mots-agronomie.inra.fr/index.php/Sous-sol>

**Figure 1** : Schémas d'un même profil présentés par Darwin en 1840 (A) et en 1881 (B).

**Figure 1:** Diagrams of the same soil profile, presented by Darwin in 1840 (A) and in 1881 (B).



**A** (Darwin, 1840) : Coupe dans un champ ; légende originale.

**A** (Darwin, 1840) : Section in a field ; original caption.

0-0.5 : turf (gazon) ;

0.5-3.0 : vegetable mould (terre végétale) ;

3.0-4.5 : a layer of fragments of burnt marl, of cinders, and a few quartz pebbles, mingled with earth (une couche de fragments de marne calcinée, de cendres et de quelques cailloux de quartz mélangés avec de la terre) ;

> 4,5 : the original black peaty soil (le sol noir tourbeux original).

**B** (Darwin, 1881) : Coupe de la terre végétale dans un champ drainé et amendé quinze ans auparavant ; légende originale.

**B** (Darwin, 1881) : Section of the vegetable mould in a field drained and fertilized 15 years earlier ; original caption.

**A** = turf (gazon) ;

**B** = vegetable mould without any stones (terre végétale sans aucune pierre) ;

**C** = mould with fragments of burnt marl, coal-cinders and quartz pebbles (terre végétale avec fragments de marne calcinée, de cendres de charbon et des cailloux de quartz) ;

**D** = subsoil of black, peaty sand with quartz pebbles (sous-sol de sable noir, tourbeux, avec des cailloux de quartz).

8 coupes de sols (dont plusieurs podzols) où les notations A, B, C ou a, a' et a'' sont utilisées pour désigner les horizons superposés. La lecture de cet ouvrage donne l'impression d'un ouvrage actuel de pédologie et d'étude des humus avec une observation et une analyse étonnantes des profils de sol et des mécanismes de différenciation des horizons.

Brevik et Hartemink (2010) ont consacré un article historique fort intéressant au « concept de profil de sol » (pp. 27 et 28). Ils signalent les travaux de Orth (1875) qui considère le profil de sol comme une base essentielle de la cartographie agrogéologique en Allemagne, prolongeant le profil de sol jusqu'au matériau parental. Ils rappellent enfin que Dokuchaev, qui fit la synthèse du concept de profil de sol dans ses travaux publiés de 1879 à 1893, a été aussi influencé par des savants tels Fallou (1862) et Orth (1875).

Au sens large, Dokuchaev introduisit les horizons A, B et C tels qu'ils sont actuellement utilisés en science du sol, puisqu'il

considérerait A+B comme constituant le sol et C comme « roche racine » ou sous-sol, quoique ces concepts ont largement évolué avec le temps et des horizons ont été ajoutés (Tandarich *et al.*, 2002). Selon Kovda (1984) :

« V.V. Dokoutchaev a introduit dans ses recherches, puis dans la science du sol, la notion d'horizon éluvial et illuvial, d'horizons humiques (A), d'horizons de transition (B), d'horizons de roche-mère variable (C) et invariable (D). Il a introduit les méthodes de la description morphologique des horizons du sol et de la roche-mère, en attribuant une attention à l'existence de stratifications témoins de l'évolution et de la formation du sol ».

Toutes ces affirmations relatives aux publications de Dokuchaev ont été confirmées par l'un des co-auteurs du présent article lors de la relecture systématique du texte russe, publié en 1936, simple réédition posthume du texte initial datant de 1883

(Dokuchaev, 1936). À l'évidence, Dokuchaev a largement utilisé la notion d'horizon et la notation A - B - C - D même s'il n'en est pas l'inventeur.

## 2.2 Le glissement sémantique entre l'horizon supérieur altéré des roches et le sol

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et chez de nombreux auteurs, le mot **horizon** signifie couche d'un matériau géologique mais le sol est considéré comme un **horizon de roche** le plus superficiel, plus ou moins altéré. Voici deux exemples de cet emploi.

Dans un article sur Dokuchaev et les débuts de la pédologie, Boulaine (1983, p. 293) rapporte la définition suivante du sol donnée par Dokuchaev :

« Par sol on entend les **horizons extérieurs** des roches naturellement modifiés par l'influence mutuelle de l'eau, de l'air et des organismes vivants et morts ».

Legros (2011, p. 11) note que cette définition est à peu près reprise, dans une analyse remarquable des travaux russes, par Camena d'Almeida, géographe français (1865-1943), qui écrit en 1904 :

« Le sol, tel qu'on doit le considérer dans l'élaboration d'une carte pédologique, consiste dans les **horizons superficiels** des roches, plus ou moins altérés sous l'influence simultanée de l'eau, de l'air et de différents organismes, morts ou vivants ».

## 2.3 Évolution du concept au cours de la première moitié du vingtième siècle

Tandarich et al. (2002) ont consacré un article très complet au développement historique des concepts de profils de sols et d'altération. Ils indiquent (pp. 335 ; 336 ; 338 ; 341), en renvoyant à de nombreuses références, que :

- i) Les locutions « horizon de sol » et « profil de sol » sont des additions du XX<sup>e</sup> siècle au vocabulaire de science du sol (Glinka, 1914 ; Marbut, 1927 ; Shaw, 1927), alors qu'antérieurement les scientifiques utilisaient d'autres termes pour décrire le sol, tels que « formation », « couche de sol », « terreau végétal », « strate », « substrat », « niveau », etc.
- ii) Pour Dokuchaev, la structure ou stratification du chernozem consistait en des « *ghorizont* » individuels A, B et C et le mot russe que Dokuchaev (1879c, p. 71) utilisait pour décrire l'horizon C est « *korennoyu porodoyu* » = « roche racine ».
- iii) Dans leur premier ouvrage consacré aux sols russes publié en anglais, Dokuchaev et Sibirtsev (1893, p.4) introduisent le schéma A - B - C aux USA lors la *World's Columbian Exposition* de 1893 à Chicago (Tandarich et al., 1988 ; Simonson, 1989). Ils y décrivent le concept de « coupe de sol » dans laquelle, de manière générale, ces trois lettres représentent les niveaux suivants : « A.- correspondant au

sol ; B.- niveau de transition ; C.- roche primitive (sous-sol) ». L'épaisseur du sol est représentée par « A + B » (Dokuchaev et Sibirtsev, 1893, p. 7).

- iv) Le premier glossaire de terminologie en science du sol fut proposé par Shaw en 1927, alors qu'il faisait fonction de président du comité de terminologie de l'*American Soil Survey Association* (ASSA) dès 1926. Ainsi, pour la première fois, des définitions furent compilées, dont celles de « couche de sol », « horizon de sol » et « profil de sol ». « Couche de sol » était déjà utilisée dans les descriptions de fosses pédologiques du *Soil Survey Staff* depuis la création des études de sols au *U.S. Bureau of Soils* dès la fin des années 1890. Shaw assimilait simplement les définitions de « horizon de sol » à celle de « couche de sol ». Mais les mots « horizon » et « profil » avaient été introduits récemment par Glinka en 1914 et Marbut en 1927. De manière générale, la synonymie horizon = couche fut ensuite souvent utilisée pour des besoins éducatifs : « horizon » dans des contextes scientifiques et « couche » dans des contextes scolaires ou non professionnels.

- v) Cette question sémantique ne s'est pas limitée aux États Unis. Ainsi, en Finlande, Benjamin Frosterus (1924) reconnut qu'il n'y avait pas une seule langue dans les pays scandinaves et d'Europe du nord qui ait un mot scientifique pour « sol ». Son premier exemple était le mot allemand largement employé « *boden* », signifiant à la fois sol, partie supérieure du sol et terrain dans cette catégorie linguistique. En conséquence, Frosterus (1924) proposa le terme « *Solumhorizont* » (un mot allemand construit à partir de *solum* - le mot latin pour sol) pour cette portion de la croûte terrestre affectée par les processus pédogénétiques. Pour Frosterus (1924) le *Solumhorizont* s'étendait depuis la surface vers la profondeur et incluait : (i) une zone superficielle de départ, (ii) une zone d'enrichissement et (iii) une zone non affectée par les processus de formation du sol (l'*Untergrund*). Le concept de *solumhorizont* fut proposé à la Conférence Internationale d'Agrogéologie de 1924 à Rome (conférence où fut créée la Société Internationale de Science du Sol) à laquelle assistèrent quelques scientifiques américains dont Marbut. Le mot fut raccourci en « *solum* » quand il fut rapporté aux USA.

Selon Jenny (1941) : « l'estimation de l'âge relatif ou du degré de maturité des sols est universellement basée sur la différenciation des horizons ». Dans les années 1940, il était en effet reconnu par la science du sol que « plus le nombre d'horizons est important et plus leur épaisseur et leur intensité sont grandes, plus le sol est mature ».

Une telle affirmation pourrait être largement discutée aujourd'hui car la distinction des horizons est une opération assez subjective surtout quand les transitions sont peu nettes. Enfin, des stratifications géologiques préexistantes peuvent venir encore compliquer la démarche.

## 2.4 Apparition en France du mot horizon dans son sens pédologique actuel

En France, Henri Erhart pourrait bien avoir été le premier à employer ce terme. En effet, celui-ci utilise le mot horizon dans son travail de thèse sur les sols de Madagascar (Erhart, 1926). Toutefois, il ne l'emploie qu'à 4 reprises sur 117 pages. Il est seulement présent au début du texte, aux pages 13 et 15. Ce sont les mots « couche », « terre arable » et « sous-sol » qui sont mentionnés dans les descriptions, en particulier pour les prélèvements. Notons que ceci est bien en accord avec les équivalences déjà mentionnées pour cette époque entre les mots « couche » et « horizon ». Dans le même ouvrage, Erhart utilise aussi le mot « profil » et qualifie certains horizons par les adjectifs « éluvial » et « illuvial ». Dès 1926, Erhart a donc bien une vision pédogénétique moderne de la formation des sols.

Quelques années plus tard, il publiera le Tome 1 de son *Traité de pédologie* que l'on peut considérer comme le premier grand traité français de pédologie (Erhart, 1935). Dans ce livre, il utilise bien plus fréquemment le mot « horizon » avec 223 occurrences pour 238 pages. Il distingue aussi de nombreux types d'horizons. En effet, dans l'index des matières, l'entrée **horizon** (p. 249) renvoie aux rubriques suivantes : horizon (tout simplement) puis, h. déglaisé, h. éluvial, h. glaisifié, h. illuvial, h. réducteur, auxquels il faut ajouter les noms particuliers de « horizon d'humus », horizon blanchi, *ortstein*, croûte calcaire, carapace, cuirasse, etc.

Un contemporain d'Erhart en France est Valérien Agafonoff. Ce pédologue, russe émigré en France en 1906, fut accueilli à la Sorbonne en 1922. Soutenu par A. Demolon, il participa fortement à introduire en France la pensée de Dokuchaev et travailla beaucoup sur les sols de Tunisie. Dans son article *Les zones des sols de France* (Agafonoff, 1927), il écrit :

« Depuis cinq ans je travaille à l'étude des sols de France. Le but de mes travaux était d'établir les zones climatiques des sols français. Il me fut nécessaire pour cela d'étudier, sur place, la structure et la succession des **horizons** verticaux des sols dans différentes régions... ». On peut s'étonner de l'expression « succession des horizons verticaux ». Il est probable qu'Agafonoff ne maîtrisait pas encore parfaitement le français et qu'il convient d'interpréter cette expression comme « succession verticale des horizons ».

Les trois articles publiés dans les Annales agronomiques sous le titre « Les sols de France au point de vue pédologique »<sup>2</sup> (Agafonoff, 1933 ; 1935a ; 1935b) totalisent 118 pages, et si le texte a une dimension pédogénétique certaine, le mot horizon n'est mentionné toutefois que 25 fois, donc nettement moins que dans le *Traité de pédologie* d'Erhart (1935). En outre, sa numérotation

verticale des horizons est strictement alphabétique (A, B, C, D, E, F), sans associer aux lettres un sens pédogénétique comme nous le faisons actuellement et comme le faisait déjà aussi Erhart à la même époque.

À propos d'Erhart et d'Agafonoff et, plus généralement, des travaux réalisés par des Français à Madagascar, en Tunisie et dans d'autres colonies françaises pendant la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, le lecteur pourra se reporter à Feller *et al.* (2007).

À la même époque, « couche » et « horizon » semblent aussi synonymes pour Demolon et Leroux (1933 pp. 3 et 4) :

« Si l'on désire prendre un échantillon du sous-sol dont la nature doit toujours être connue, on utilise les petites fosses faites en vue du prélèvement du sol. La nature, l'aspect, la disposition des couches [...] indiqueront comment il faut prélever le sous-sol. En principe, il convient de prélever un échantillon des divers **horizons** qui se différencient dans une coupe verticale ou profil ».

## 3. DÉFINITIONS MODERNES - ÉVOLUTION DES CONCEPTIONS

### 3.1 Quelques exemples (de 1949 à 1989)

Demolon, dans son livre *La génétique des sols* (1949, p. 75) évoque la notion d'horizon, sous cette forme :

« Lorsqu'on a affaire à un sol complètement développé, l'examen ainsi effectué [grâce à une section verticale ou **profil**] révèle une succession de **couches ou horizons** délimités plus ou moins nettement et qu'il ne faut pas confondre avec les stratifications qu'on observe dans la sédimentation de dépôts géologiques ».

On notera que l'auteur insiste encore sur l'idée qu'il ne s'agit pas de stratification géologique préexistante mais du résultat d'un développement, d'une évolution pédogénétique. Demolon a raison mais nous savons désormais qu'une différenciation texturale sédimentaire préexistante peut entraîner le développement d'un planosol sédimorphe (Favrot et Legros, 1972).

On retrouve cette insistance aussi chez Kubiena dans son célèbre ouvrage *The Soils of Europe* (1953 pour la version anglaise qui fut précédée de la version originale allemande de 1950 et de la version espagnole de 1952). En effet, on peut y lire page 21 :

« Un profil de sol peut être observé au moyen d'une coupe verticale à travers la couverture pédologique [noter l'usage, par Kubiena, du terme *soil mantle* - conception très novatrice pour l'époque]. Celui-ci montre dans la plupart des cas, une série de zones horizontales, qui sont appelées horizons. Les horizons ne sont pas des couches au sens géologique,

<sup>2</sup> Ces trois articles seront regroupés dans un ouvrage éponyme publié en 1936 (Agafonoff, 1936).

c'est-à-dire qu'ils ne sont pas formés par sédimentation mais sont construits selon le type particulier et l'intensité de la vie du sol, l'altération et les autres transformations chimiques et physiques dans le sol ».<sup>3</sup>

Le *Soil Survey Manual (Soil survey staff, 1951)* a été un des premiers guides pour la caractérisation des profils de sols. Il a joué un grand rôle aux USA mais aussi dans le reste du monde. Aux pages 173 et suivantes on peut lire (trad. des auteurs) :

« Identification et nomenclature des horizons pédologiques [*soil horizons*] : La description d'un profil de sol consiste principalement en la description de ses différents **horizons**. Un horizon pédologique peut être défini comme une couche de sol, approximativement parallèle à la surface du sol, avec des caractères générés par les processus pédogénétiques. Un horizon pédologique est communément différencié à partir d'un horizon contigu au moins partiellement sur la base de caractères visibles sur le terrain. En outre des données de laboratoire sont parfois requises pour l'identification et la désignation des horizons aussi bien que pour leur caractérisation plus détaillée. »

En 1958, Plaisance et Cailleux publient leur remarquable *Dictionnaire des sols*, voici leur définition :

« Dans un sol, couche à peu près parallèle à la surface et sensiblement homogène ; toutes les parties sont au même stade d'évolution ou presque. Les horizons sont au nombre de 1 à 7, superposés, parfois avec horizon de transition. - On distingue les horizons éluviaux (ou lessivés), illuviaux (ou d'accumulation) et les horizons ni appauvris ni enrichis. - L'horizon doit être distingué de la strate géologique. - Certains horizons illuviaux envoient des prolongements dans des fissures, qu'ils colmatent, ou même s'y localisent ».

Dans la première édition de son *Précis de pédologie* (1960, p. 8), Duchaufour énonce que :

« La formation et l'évolution du sol sous l'influence des facteurs écologiques... conduisent à la différenciation de strates successives, de texture, de texture et de couleurs différentes appelés **horizons** : l'ensemble des horizons s'appelle le profil. »

Dans son chapitre 1, intitulé *Soil and Soil Individual*, la 7<sup>e</sup> approximation de la *Soil Taxonomy* (USDA, 1960) utilise largement le mot « horizon » mais celui-ci n'est défini qu'au début du chapitre 5 (*Criteria of Classification in the Higher Categories*). La voici :

« Un horizon de sol peut être défini comme une couche dans un sol qui est approximativement parallèle à la surface du sol

et qui présente des propriétés générées par des processus pédogénétiques mais qui sont différentes des couches contiguës. Un horizon de sol est communément différencié de ceux qui lui sont adjacents au moins partiellement par des caractères visibles ou mesurés au champ, tels que la couleur, la structure, la texture, la consistance et la présence ou l'absence de carbonates. Selon les critères que nous utilisons les horizons sont identifiés en partie par leur morphologie et en partie par les propriétés des horizons sus-jacents et sous-jacents. Pour identifier les horizons de sol, cependant, des mesures au laboratoire sont parfois nécessaires pour compléter les observations de terrain ».

En 1971, dans son *Que sais-je ? consacré à L'agronomie*, Boulaïne définit ainsi les horizons :

« Le sol est surtout soumis à des actions qui s'exercent verticalement : les strates parallèles à la surface prennent une grande importance. Les autres hétérogénéités ayant un volume limité. Les **horizons** sont des couches parallèles à la surface du sol et qui traduisent l'anisotropie verticale majeure du sol... Leur distinction est une des bases fondamentales de la science du sol. C'est une donnée classique de la pédologie. Dans les sols cultivés, il y a superposition au profil naturel (succession verticale d'horizons de nature, d'organisation et d'ambiance différentes) d'un **profil cultural**<sup>4</sup> résultant de la transformation du premier par les travaux de l'homme... ».

Ainsi Boulaïne ajoute quelques notions supplémentaires par rapport aux auteurs antérieurs : actions et anisotropie verticales, horizons superficiels modifiés par les actions humaines, etc.

La légende de la *Carte mondiale des sols* (FAO-Unesco, 1975) formule ainsi la définition de l'horizon :

« Un horizon pédologique peut être défini comme une couche de sol, approximativement parallèle à la surface du sol, et présentant certaines caractéristiques résultant de processus pédogénétiques ».

Gerasimov (1976), a proposé un système d'horizons de sol basé à l'origine sur l'approche de Dokuchaev mais élargi pour correspondre à sa propre théorie sur les processus élémentaires de formation des sols. Plus précisément, les horizons du profil pédologique dont la présence indique des processus pédogénétiques spécifiques, actuels ou anciens, sont combinés en ensembles ou formules qui sont utilisés pour classer les sols.

Outre les conceptions nationales ou personnelles, on assiste à cette époque à l'émergence de travaux internationaux basés sur la notion d'horizon. Par exemple, dans un document

<sup>3</sup> Les citations initialement en anglais ont été traduites ici en français par les auteurs de cet article.

<sup>4</sup> Pour la notion de profil cultural, voir Hénin et al. (1960) et Gautronneau et Manichon (1987).



publié par l'*International Soil Reference and Information Centre* (ISRIC), intitulé *Soil horizon designations*, Bridges (1989) reprend deux définitions très classiques :

- « **Horizon de sol** : une couche de sol, une subdivision d'un profil de sol, approximativement parallèle à la surface de la Terre, présentant des caractères pédologiques. Les horizons se distinguent les uns des autres par leur morphologie, leur constitution physique, leurs compositions et propriétés chimiques et leurs caractéristiques biologiques ».
- « **Horizon génétique** : un horizon de sol avec des propriétés qui l'identifient comme ayant été exposé à un processus particulier ou à un groupe de processus pédogénétiques ».

La définition et la caractérisation du concept ne semblent pas avoir intéressé beaucoup les rédacteurs de la légende FAO ni même Bridges (1989) dont le rapport fait pour l'ISRIC a pourtant les horizons comme sujet central. Dans ces deux documents, le concept d'horizon est évacué en 3 ou 6 lignes alors que le *Référentiel pédologique*, publié seulement trois ans plus tard (AFES, 1992), y consacre 32 lignes.

### 3.2 Années 1990 et suivantes

La décennie 1990 connaît des changements conceptuels majeurs. Initialement « subdivision d'un profil de sol en différentes couches » (donc à une seule ou deux dimensions<sup>5</sup>), l'horizon devient dans les conceptions modernes « un volume, sous-ensemble d'une couverture pédologique », cette dernière définie comme « un continuum tridimensionnel ».

D'où la définition du *Référentiel pédologique* (définition inchangée dans les trois versions de 1992 - 1995 - 2009 [pages IX et X]) :

- « Les horizons résultent de la subdivision d'une couverture pédologique en volumes considérés comme suffisamment homogènes. Il est clair que cette homogénéité est relative et qu'elle correspond à une certaine échelle d'investigation. Elle autorise explicitement une hétérogénéité dans le détail : agrégats distincts, différents constituants formant la **masse basale** et, naturellement, les **traits pédologiques**.

Par leur dimension verticale centimétrique à métrique, les horizons sont directement perceptibles à l'œil nu sur le terrain. Le prélèvement d'échantillons est possible à la main. C'est pourquoi l'horizon est le niveau d'appréhension le plus pratique pour observer et échantillonner une couverture pédologique. Le *Référentiel pédologique* considère les horizons comme les entités de base permettant d'identifier, de caractériser et de définir une couverture pédologique. Chaque horizon est un volume. Il est nécessaire de définir son **contenu** — description de ses constituants, organi-

sations, caractères, propriétés et caractéristiques analytiques — mais aussi son **contenant** — description de ses limites, de son enveloppe. Sa dimension verticale la plus petite est au moins centimétrique, souvent décimétrique, voire métrique. Ses dimensions latérales sont au moins décimétriques et le plus souvent hectométriques ou kilométriques. Un horizon n'est pas infini : il disparaît latéralement ou se transforme en un autre horizon. Son extension spatiale est délimitable.

Les limites supérieures et inférieures d'un horizon sont généralement conformes à la surface du terrain. Mais un horizon peut aussi se présenter sous la forme de lentilles ou de langues, il peut même être entièrement inclus dans un autre horizon. Les transitions entre horizons peuvent être nettes ou plus ou moins progressives. Chaque horizon est presque toujours associé géométriquement à d'autres horizons et lié à eux par des relations étroites, relations pédogénétiques (évolutions longues) et relations fonctionnelles (dynamique journalière ou saisonnière). Ces dernières revêtent une grande importance pratique.

La position d'un horizon par rapport à l'interface de la couverture pédologique avec l'atmosphère est une caractéristique essentielle. Elle conditionne en effet l'apport de matières organiques, l'importance des flux thermiques ou hydriques qui l'atteignent ou le traversent, la masse des horizons sus-jacents qui pèsent sur lui, la pénétration par les racines et les animaux, etc., presque toutes les conditions qui régissent son évolution et son fonctionnement ».

Sensiblement au même moment, Ruellan et Dosso (1993, p. 44) donnent cette définition :

- « Ce sont des volumes pédologiques plus ou moins parallèles à la surface du terrain. Chaque horizon se décrit en terme d'un ou plusieurs types d'assemblages et de leur relation. Son épaisseur varie de quelques centimètres à plusieurs mètres : le plus souvent, elle est de l'ordre de un à plusieurs décimètres. Les limites, supérieure et inférieure, d'un horizon sont plus ou moins nettes, plus ou moins progressives ou brutales. Latéralement, l'extension d'un horizon est très variable : du mètre... jusqu'à plusieurs kilomètres ; il n'est cependant jamais infini : latéralement, il disparaît ou il se transforme en un autre horizon ».

Dans l'introduction de la première édition de la *World Reference Base for Soil Resources* (ISSS Working group RB, 1998), l'horizon est défini ainsi :

- « Les horizons de sol sont des corps tridimensionnels qui sont plus ou moins parallèles à la surface de la terre. Chaque horizon est caractérisé par une ou plusieurs propriétés, présentes sur une certaine profondeur, avec un certain degré d'expression. Leur épaisseur varie de quelques centimètres à plusieurs mètres ; le plus souvent, il est

<sup>5</sup> Une seule dimension (l'épaisseur) lors de l'examen d'un sondage à la tarière ; deux dimensions lorsqu'on observe une tranchée.

d'environ quelques décimètres. Leurs limites supérieure et inférieure (transitions) sont diffuses, graduelles, nettes ou abruptes. Latéralement, l'extension d'un horizon de sol varie considérablement, d'un mètre à plusieurs kilomètres. Cependant, un horizon de sol n'est pas infini, il disparaît ou se transforme en un autre horizon ».

Dans ce texte, les rédacteurs affirment que les horizons sont des volumes et s'intéressent également à leurs limites, à leur épaisseur et à leur extension latérale. On sent que, en 1998 et au moins au niveau européen, le concept s'affine et s'enrichit.

Dans un ouvrage rédigé pour un large public et qui est un peu son « testament », Ruellan (2010) propose cette définition dans un glossaire (p. 103) :

« Horizon : volume de sol caractérisé par sa morphologie (couleur, forme des agrégats, porosité) ; la plupart des horizons ont l'allure de couches superposées ; entre la roche-mère et la surface il peut y avoir entre 1 et 10 horizons différents les uns des autres ; les limites qui séparent les horizons sont des fronts de transformation des **structures** de l'un des horizons par les structures de l'autre ».

A. Ruellan y est fidèle à sa conception très « morphologique » et « structurale » de la définition des couvertures pédologiques et des horizons, en insistant sur l'importance des **types d'assemblages**. Et il introduit, dans sa définition, l'équivalence entre limites entre horizons et **fronts de transformation**.

## 4. UTILITÉ PRATIQUE DE LA NOTION D'HORIZON

L'horizon n'est pas seulement une vue de l'esprit, c'est aussi un concept opérationnel dès qu'il s'agit de décrire les sols et de les prélever pour examens ou analyses. Que l'on étudie seulement les objets « profil » et « horizons » (héritage des conceptions de Dokuchaev) ou que l'on s'intéresse à des continuums tridimensionnels (les couvertures pédologiques, Bocquier, 1984), la notion d'horizon demeure indispensable comme unité de description et de prélèvement.

Bockheim *et al.* (2005, p. 25) se placent dans une perspective historique :

« Originellement, les horizons (de sols) furent utilisés uniquement avec un but descriptif (Dokuchaev 1879a,b, 1883 ; Dokuchaev et Sibirtsev, 1893) mais, plus tard, ils furent identifiés comme des couches génétiques plus ou moins parallèles à la surface de la terre lesquelles pouvaient être (1) distinguées sur la base de propriétés morphologiques, chimiques et physiques (2) utilisées pour interpréter l'histoire de développement du sol (Glinka, 1914 ; Marbut, 1921, 1927, 1928 ; Shaw, 1927). Marbut (1921) fut

la première personne à suggérer que les horizons (de sols) puissent être utilisés pour classer et différencier les sols. Il proposa huit critères descriptifs du sol dont sept étaient des attributs des horizons. Ceci marqua le début aux USA de la reconnaissance des sols comme des corps naturels distincts des matériaux géologiques ».

Dès 1986, Baize (pp. 234 et 235) insiste sur la démarche et la difficulté du découpage des couvertures pédologiques en horizons :

« La couverture pédologique ne se présente pas à l'observation sous la forme d'objets individualisés mais comme une réalité continue à variations progressives [...] De même que, pour des raisons pratiques ou scientifiques, le pédologue peut subdiviser les couvertures pédologiques en unités territoriales, il peut également subdiviser ce même continuum en sous-ensembles selon un axe vertical (*Figure 2*). L'horizon est le résultat de ce découpage, en un site, de la couverture pédologique en tranches plus ou moins parallèles entre elles et à la surface du terrain. Ce découpage s'opère par combinaison d'un certain nombre de critères sélectionnés par le pédologue, sous l'influence déterminante des caractéristiques les plus visibles. Dès qu'un caractère jugé suffisamment important se modifie d'une façon considérée comme assez notable, le pédologue est en droit de distinguer un horizon différent. Comme la variation verticale de chaque caractère révèle la possibilité de distinguer plusieurs horizons, on peut donc concevoir un très grand nombre d'horizons possibles par combinaison des caractères (*Figure 3*). Aussi le découpage d'une couverture pédologique en un nombre restreint d'horizons sera raisonné mais demeurera arbitraire. De ce fait, l'horizon apparaît comme une subdivision intellectuelle donc relativement **subjective** d'un objet bien réel : le solum. Cette subdivision doit tout de même être fondée sur des critères vérifiables et mesurables. L'horizon est l'unité de base de la caractérisation locale de la couverture pédologique ».

« C'est à la fois un volume, une enveloppe et un contenu descriptif. L'horizon est généralement une couche parallèle à la surface du terrain mais il peut être décrit sous forme de lentilles ou de langues et il n'est pas infini : il disparaît latéralement ou se transforme en un autre horizon. Parfois ses limites sont tellement évidentes qu'elles seraient immédiatement reconnues de la même façon par tous ; mais les modifications de ses caractères peuvent être tellement progressives que les limites introduites auront un caractère plus artificiel et plus personnel. Cette conception de l'horizon, unité de caractérisation de la couverture pédologique, implique d'exclure tout découpage des couvertures pédologiques en référence à des concepts pédogénétiques préétablis. L'horizon est une subdivision raisonnée d'une réalité et non un concept dont l'existence

**Figure 2 :** (d'après Girard, 1983). Deux façons de découper les couvertures pédologiques.

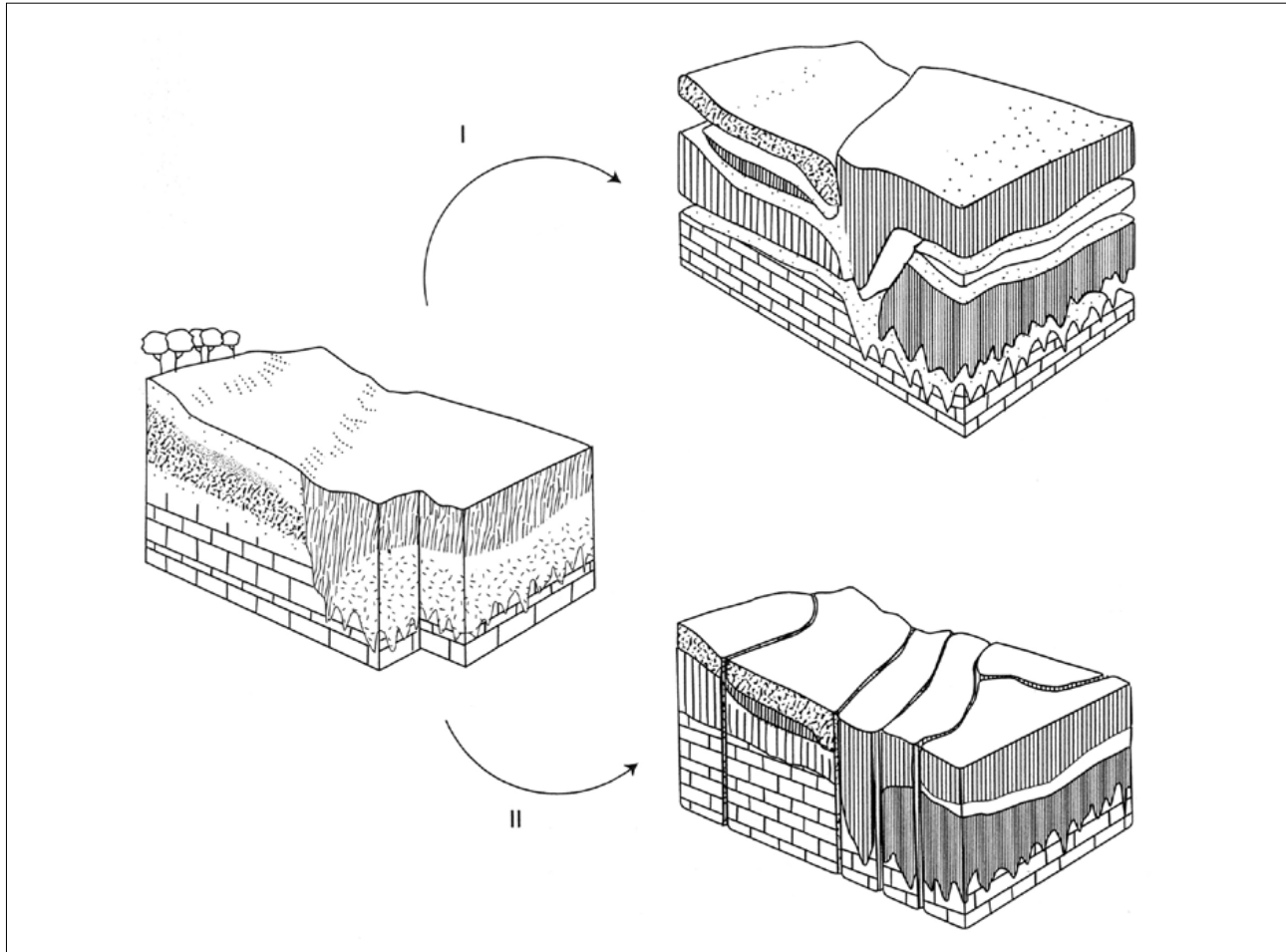
I : en volumes homogènes, les horizons ;

II : en volumes hétérogènes, des territoires présentant la même succession d'horizons.

**Figure 2:** (according to Girard, 1983). There are two ways in dividing the soil mantles.

I: in homogeneous volumes, the soil horizons;

II: in heterogeneous volumes, territories showing the same horizon sequence.



est admise *a priori* et que l'on cherche à retrouver dans la nature. Un horizon devra être d'abord défini et décrit le plus objectivement possible avant d'être interprété en termes de pédogenèse ou de comportement ».

« Si l'horizon est un volume que l'on peut délimiter, caractériser, dont on peut cartographier l'extension spatiale, dont on peut établir une typologie, on ne doit pas perdre de vue qu'il est presque toujours associé à d'autres horizons et lié à eux par des rapports étroits, relations géométriques, pédogénétiques et surtout relations fonctionnelles. C'est pourquoi la couverture pédologique ne doit pas être réduite par modélisation à une simple superposition de volumes distincts indépendants: on ne peut pas négliger complètement les transitions et les relations inter-horizons, tant verticales que latérales ».

Les mêmes idées ont été reprises en anglais dans la revue *Catena* (Baize, 1993).

#### 4.1 Faut-il toujours respecter les limites des horizons pour les prélèvements ?

Les horizons sont donc, en pédologie de terrain, les unités de base principales du prélèvement<sup>6</sup>. Mais il n'est pas indispensable de les prélever tous. Ceux qui sont trop minces ou hétérogènes et les horizons de transition peuvent le plus

<sup>6</sup> Mais on peut aussi prélever sélectivement des nodules ou autres traits pédologiques. On peut également prélever un échantillon de sol à cheval sur deux horizons pour y étudier un « front de transformation » sur lames minces.

**Figure 3** : Sur quoi s'appuie la distinction des horizons dans une fosse ?**Figure 3**: Which criteria enable to distinguish horizons in a soil pit?

Profondeur (cm)	CRITÈRES DE TERRAIN					AU LABORATOIRE	
	Matières organiques	Texture	Structure	Revêtements argileux rougeâtres	Autres traits	pH eau	Teneurs en argiles (%)
10	abondantes	limono-argileux	grumeleuse	non		5,0	18 - 25
60	un peu	limono-argileux	polyédrique sub-anguleuse faiblement exprimée	non		4,8	25 - 30
80	très peu			oui	volumes plus clairs	5,2	30 - 40
130	très peu	argileux	polyédrique anguleuse fine très nette	très nombreux	films noirs nombreux	5,2	45 - 55
160	très peu	argileux	idem à sur-structure prismatique	très nombreux	films noirs nombreux	5,5	50 - 60
180	très peu	argileux lourd	polyédrique anguleuse fine	nombreux	idem	7,4	60 - 70
		<b>Roche sous-jacente : dalle calcaire</b>					

La distinction d'horizons lors de l'examen d'un solum repose sur la prise en compte de traits morphologiques, complétée par des données analytiques.

L'exemple du solum de la forêt de Lichères (Yonne) est un cas complexe relatif à un sol très épais (1,80 m), granulométriquement différencié, non calcaire et développé dans les argiles de décarbonatation de calcaires jurassiques (Baize, 2012). Grâce à quelques critères déterminants, surlignés en jaune, on distingue six horizons.

souvent être négligés volontairement, mais pas toujours : ils peuvent avoir une origine et un fonctionnement très spécifiques justifiant leur prélèvement (minces horizons A, horizon BT en bandes, horizon placique, etc.). Parfois, malheureusement, c'est la contrainte des crédits disponibles qui oblige à limiter le nombre d'échantillons à analyser, et encore faut-il alors raisonner la sélection faite.

L'analyse des transitions entre certains horizons peut être fondamentale pour comprendre la pédogenèse. On rejoint ici la notion de « front de transformation » (Ruellan, 2010) et on conçoit aisément l'intérêt de caractériser les processus à l'origine de ces fronts de transformation.

Il est essentiel de respecter les limites des horizons au moment de prélever et d'éviter de salir un échantillon par des agrégats provenant d'un autre horizon. En outre, mieux vaut

prélever le cœur de l'horizon et ne pas trop s'approcher de ses limites.

Le respect des limites des horizons lors des prélèvements permet également une meilleure interprétation des résultats d'analyse. Une valeur analytique obtenue sur un échantillon situé « à cheval » sur deux horizons de compositions contrastées n'a guère de signification (cf. encadré Pierrelaye, Figure 4 et Tableau 1).

Parfois, cependant, il est jugé utile de prélever des « tranches » fines superposées successives (p. ex. de 10 cm d'épaisseur) au sein d'un horizon qui paraît pourtant bien homogène. Ainsi, il est possible de mettre en évidence tel ou tel gradient, comme par exemple une augmentation de taux d'argile difficile à apprécier au toucher. C'est le cas des « terres d'Aubues » de Basse Bourgogne, où les horizons argileux

## FAUT-IL (OU NON) RESPECTER LES LIMITES DES HORIZONS ?

Pages 45-46

### Contexte

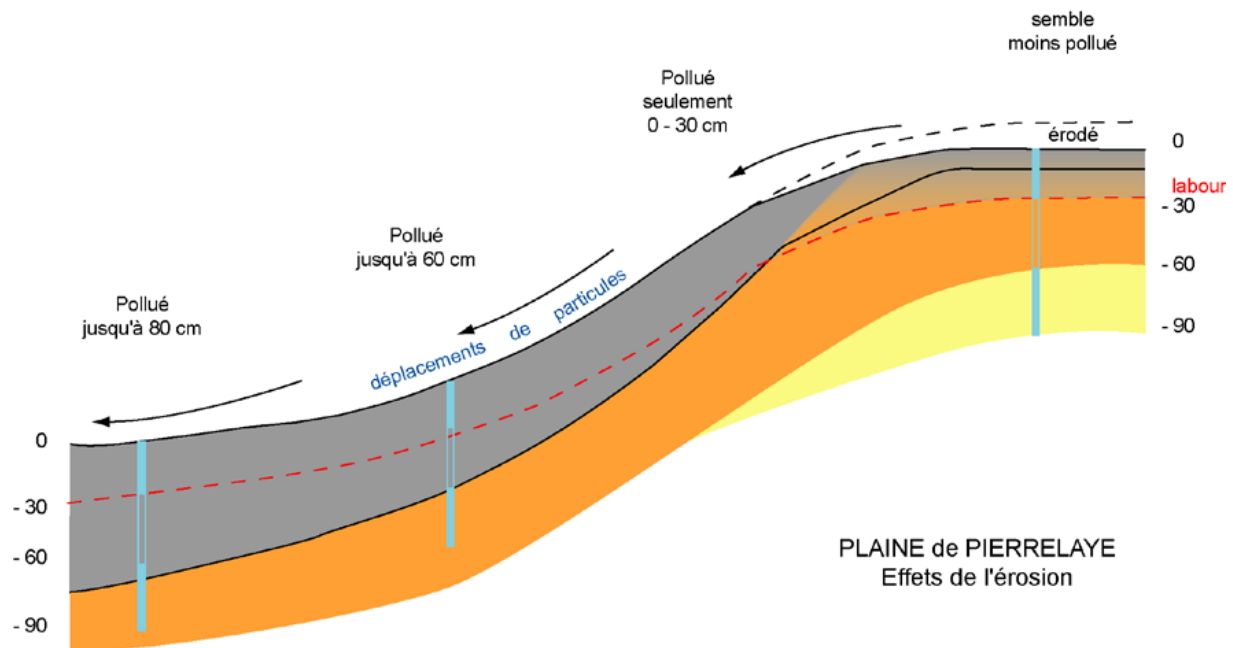
Plaine de Pierrelaye (Val d'Oise), consacrée au maraîchage. Les sols sableux ont été pollués par des éléments traces métalliques suite à des épandages excessifs d'eaux usées non traitées, en provenance de la station d'épuration d'Achères, dite Seine Aval (Baize *et al.*, 2002 ; van Oort *et al.*, 2008 ; van Oort *et al.*, 2022). Les eaux usées étaient acheminées par des bouches d'irrigation puis par simple écoulement gravitaire. Les flux apportés ayant été extrêmement importants, des phénomènes d'érosion et de déplacements de matières vers les bas de versants sont systématiques sur cette plaine, malgré la faiblesse des pentes.

### Matériel et méthodes

En 1998 une étude a été menée par un bureau d'étude à la demande du SIAAP (Syndicat intercommunal pour l'assainissement de l'agglomération parisienne). Les prélèvements de sols ont été effectués systématiquement de 30 en 30 cm de profondeur (0-30 ; 30-60 et 60-90 cm), selon 3 positions dans chacune des 22 parcelles étudiées (proximité d'une bouche d'irrigation = haut de versant - mi-pente - plus grand éloignement de la bouche d'irrigation = bas de versant), soit 198 échantillons dans le périmètre d'épandage.

**Figure 4 :** Schéma présentant la répartition des horizons pollués de surface (noirs) et peu pollués de profondeur (brun-rouge) sous l'effet du transfert latéral de particules dans la plaine de Pierrelaye (France). L'échelle verticale est en centimètres. Un versant (peu pentu) fait environ 100 mètres.

**Figure 4:** Diagram showing the repartition of highly polluted surface horizons (black) and much less polluted deeper horizons (reddish brown) as a result of lateral transfer of particles in the Pierrelaye plain (France). The vertical scale is in centimetres. The slight slope is about 100 metres long.



## FAUT-IL (OU NON) RESPECTER LES LIMITES DES HORIZONS ?

Suite de la page 45

### Résultats

Les résultats (cf. tableau 1) ont été comparés aux teneurs agricoles habituelles (TAH) locales déterminées sur les horizons labourés de surface, hors périmètre d'épandage (Baize, 2009). Les horizons de surface seraient « très pollués », les couches 30-60 cm seraient « moyennement polluées » et les couches 60-90 cm « non ou peu polluées ».

**Tableau 1 :** Plaine de Pierrelaye. Teneurs médianes mesurées en plomb et en zinc en 1998 et TAH locales (en mg/kg).

22 parcelles échantillonnées, 3 situations au sein de chaque parcelle en fonction de la proximité à la bouche d'irrigation et 3 profondeurs de prélèvement, soit au total 198 analyses. Les sites de prélèvement les plus proches de la bouche d'irrigation sont aussi ceux situés en haut de versant puisque l'irrigation se faisait par simple écoulement gravitaire.

**Table 1:** *Pierrelaye plain. Median values of measured Zn and Pb concentrations and usual agricultural concentrations in unpolluted local agricultural soils (TAH) in mg kg<sup>-1</sup>. 22 plots sampled, 3 locations by plot according to the distance from the irrigation source and 3 depth of sampling (total 198 analyses). The closest sites from the irrigation sources are the uppermost on the slope as irrigation is realized by gravitating flow of water.*

PLOMB	0 à 30 cm	30 à 60 cm	60 à 90 cm
Proximité de la bouche	205	57	20
Milieu de parcelle	214	108	32
Plus éloigné de la bouche	241	115	32
<b>TAH locale</b>	<b>18 à 43</b>		

ZINC	0 à 30 cm	30 à 60 cm	60 à 90 cm
Proximité de la bouche	383	158	72
Milieu de parcelle	419	269	84
Plus éloigné de la bouche	412	266	87
<b>TAH locale</b>	<b>34 à 63</b>		

### Discussion

La plupart des échantillons prélevés systématiquement entre 30 et 60 cm de profondeur étaient en réalité à cheval sur deux horizons (pourtant facilement identifiables grâce à leur couleur, respectivement noire et brun-rouge). En fait, les horizons de surface noirs fortement pollués peuvent montrer, en fonction de leur position sur les versants et de l'impact des processus d'érosion consécutifs, une épaisseur allant de 20 à 70 cm ou plus (Figure 4).

En haut de pente, là où le sol a été partiellement tronqué, les labours répétés ont mélangé les matériaux superficiels noirs pollués avec les horizons sous-jacents peu ou non pollués : les concentrations en métaux y sont un peu plus faibles que dans le reste des parcelles. En milieu de versant, l'horizon noir peut atteindre 45 cm d'épaisseur : dans ce cas, un échantillon pris entre 30 et 60 cm est un mélange à parts égales de deux horizons complètement différents. Si l'horizon noir pollué a une épaisseur de 60 cm, les concentrations mesurées dans la couche 30-60 cm seront identiques à celles de la couche 0-30 cm.

profonds montrent un gradient régulier d'argile de 40 à 70 % avec des conséquences sur leurs propriétés de rétention en eau (Baize, 2012; Bruand *et al.*, 1994).

C'est également le cas pour certains sols présentant de forts gradients en carbone avec la profondeur comme les Veracrisols ou les chernosols, ou même plus généralement les sols sous prairies ou steppes. Il en est de même si l'on s'intéresse à des gradients sans véritable lien avec la différenciation d'horizons. Ainsi, dans le cas d'un site récemment contaminé par du plomb, ce dernier peut se concentrer sur les premiers centimètres du sol et il est alors nécessaire d'en tenir compte pour les prélèvements.

Outre que sa délimitation est assez subjective, l'horizon est difficilement quantifiable en volume et poids total. C'est pourquoi, lorsqu'on cherche à réaliser certaines estimations globales, on a recours à des profondeurs fixes, ou mieux, à des **masses minérales équivalentes** (Morvan *et al.*, 2007) ce qui implique de déterminer les densités apparentes. La plupart des estimations globales de carbone organique ou inorganique sont faites ainsi (Barré *et al.*, 2020). C'est parce que l'horizon, en tant que volume, est trop variable dans l'espace (en épaisseur et en profondeur) qu'il est impossible de faire des quantifications homogènes sur un grand territoire.

Il y a donc plusieurs stratégies possibles: 1) prélèvements par horizon, ce qui implique ensuite des calculs plus ou moins compliqués pour estimer des stocks sur des profondeurs ou des masses minérales équivalentes; des incertitudes sont générées que l'on peut essayer de quantifier; 2) prélèvements sur une profondeur fixe (éliminant ainsi toute subjectivité), ce qui n'empêche pas de refaire des calculs à masse minérale équivalente *a posteriori*; 3) prélèvements par tranches régulières et très minces (solution coûteuse).

Souvent, ce qui coûte le plus cher est d'aller sur le terrain et de creuser des fosses. Si nos moyens le permettent et si la thématique l'exige, il est idéal de réaliser en même temps les deux types de prélèvements: par horizons pour comprendre et mesurer ce qui se voit et par tranches plus ou moins fines pour déceler et quantifier éventuellement ce qui ne se voit pas. C'est ce que fait le RMQS (Jolivet *et al.*, 2006).

## 4.2 Différenciation des horizons (horizonation)

L'horizonation est le processus de différenciation d'horizons distincts au cours de la pédogenèse. Ce terme désigne également le résultat de ce processus. Ce dernier est fort bien décrit par Duchaufour dès la première édition de son *Précis de pédologie* (1960, p. 8):

« La roche-mère fournit, par sa décomposition, les éléments minéraux du profil, alors que la végétation donne naissance à la matière organique: les facteurs climatiques et biologiques provoquent une transformation et un mélange, plus ou moins complets, de ces éléments; en outre, les substances solubles ou colloïdales peuvent se déplacer d'un horizon à un autre: certains sont appauvris, d'autres enrichis: l'ensemble de ces processus conduit à la différenciation des horizons, au développement du profil. Les horizons successifs sont d'autant mieux différenciés que le profil est plus évolué: leur désignation se fait par des lettres: A, B (horizons pédologiques proprement dits), C (désignant la roche-mère) ».

## 4.3. Vers une approche plus objective et quantitative de la distinction des horizons et de leurs interfaces ?

Nous l'avons vu, les principales difficultés inhérentes à la délimitation et au prélèvement d'horizons de sols sont la subjectivité de l'opérateur et l'impossibilité physique et/ou matérielle de réaliser des mesures sur l'ensemble du solum observé. Bien qu'encore au stade de la recherche, l'utilisation de techniques de « morphométrie numérique » (Digital Soil Morphometrics; voir, par exemple, Hartemink et Minasny, 2014, 2016) permet d'envisager dans l'avenir une analyse plus objective et plus continue de certaines propriétés des sols sur la face d'une fosse. La plupart de ces techniques sont fondées sur l'utilisation de capteurs portables de proximité exploitant une grande variété de gammes d'ondes spectrales et de rayonnement (fluorescence X, capteurs hyper-spectraux dans le visible, le proche et le moyen infrarouge et le thermique...). Ces techniques permettent d'obtenir des informations quasi-continues sur certains caractères du sol, à la condition de disposer de données de calibration et de connaître l'incertitude associée à ces mesures. Encore limitées en opérationnalité de routine du fait du coût des capteurs, du manque de données de calibration et d'une automatisation facile de traitement de ces données, elles constituent néanmoins un avenir prometteur, tant pour la délimitation d'horizons, que pour la caractérisation de gradients ou de changements brusques.

## 5. CONCLUSION

Le mot « horizon » tire son origine du vocabulaire de la géologie puis il est devenu un terme incontournable de tout discours pédologique. Initialement, il a été utilisé pour désigner une couche, une simple strate observable dans une fosse, dont la seule dimension est l'épaisseur. En un siècle, il est devenu un volume tridimensionnel, de formes parfois complexes, un sous-ensemble d'une couverture pédologique, défini à la fois par son enveloppe et ses propriétés. Il est toujours une notion de base de la pédologie, à la fois abstraction interprétative (l'horizon de référence) et subdivision relativement subjective mais raisonnée d'un solum qui, lui, est une réalité tangible.

Bien que le découpage d'un solum en différents horizons superposés reste une opération assez subjective et tributaire des moyens disponibles, son utilité est indéniable dans la pratique quotidienne sur le terrain pour la description d'un solum et pour la réalisation des prélèvements. La relative subjectivité de la distinction des horizons ne constitue pas en soi une limitation majeure à une interprétation pédogénétique ou au rattachement à un référentiel. Mais elle peut être problématique lorsque l'on veut faire de la surveillance harmonisée, sur de larges territoires et avec de nombreux opérateurs, de l'évolution de certains paramètres ou stocks d'éléments, d'où fréquemment le choix de profondeurs standards dans la plupart des réseaux de surveillance des sols dans le monde.

Certes, la prise en compte des différents horizons, de leurs propriétés et de leur succession est la base de l'interprétation pédogénétique mais observer ce qui se passe aux interfaces, à leurs « limites » (qui peuvent être de véritables « fronts de transformation ») est également essentiel à la compréhension des processus.

Enfin, dans un futur proche, le développement de techniques de morphométrie numérique devrait permettre de lever la subjectivité dans le découpage d'un solum en horizons et de réaliser des mesures en quasi-continu sur une face de fosse, tant verticalement qu'horizontalement.

## REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont aux deux relecteurs anonymes et au Rédacteur en chef d'Étude et Gestion des Sols pour leurs critiques constructives et pour les améliorations qu'ils ont proposées à cet article.

## BIBLIOGRAPHIE

- AFES (1992). Référentiel Pédologique. Principaux sols d'Europe. Inra éditions. 222 p.
- AFES (1995). Référentiel Pédologique. Inra éditions. 332 p.
- AFES (2009). Référentiel Pédologique 2008. Quae éditions, 432 p.
- Agafonoff V. (1927). Les zones des sols de France. In: Revue de botanique appliquée et d'agriculture coloniale, 7<sup>e</sup> année, n° 72, pp. 513-517. DOI: 10.3406/jatba.1927.4550
- Agafonoff V. (1933). Les sols de France au point de vue pédologique (1<sup>ère</sup> partie). Annales agronomiques, 3<sup>e</sup> année, n° 5, septembre-octobre, pp. 587-650.
- Agafonoff V. (1935a). Les sols de France au point de vue pédologique (2<sup>e</sup> partie). Les sols azonaux. Annales agronomiques, 5<sup>e</sup> année, n° 2, mars-avril, pp. 165-189.
- Agafonoff V. (1935b). Les sols de France au point de vue pédologique (fin). Annales agronomiques, 5<sup>e</sup> année, n° 3, mai-juin, pp. 335-372.
- Agafonoff V. (1936). Les sols de France au point de vue pédologique. Dunod ed., Paris, 156 p. + 1 carte.
- Baize D. (1986). Couvertures pédologiques, cartographie et taxonomie. Science du Sol. 24 (3), pp. 227-243.
- Baize D. (1993). Place of horizons in the new French « Référentiel Pédologique ». Catena, 20, 4, pp. 383-394.
- Baize D. (2009). Éléments traces dans les sols - Fonds géochimiques, fonds pédogéochimiques naturels et teneurs agricoles habituelles - Définitions et utilités. 2<sup>es</sup> rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués. ADEME, Paris, octobre 2009. Cédérom. 9 p.
- Baize D. (2012). Les « terres d'Aubues » de Basse Bourgogne : nouvelle synthèse et bilan de matières à très long terme. Étude et Gestion des Sols, 19, 3-4, pp. 139-161.
- Baize D., Lamy I., van Oort F., Dère C., Chaussod R., Sappin-Didier V., Bermond A., Bourgeois S., Schmitt C., Schwartz C. (2002). 100 years spreading of urban waste water on market-garden soils close to Paris (France): subsequent impacts and hazards. 17th World Congress of Soil Science, Bangkok - Symposium 29, paper n° 204.
- Barré P., Cécillon L., Chenu C., Martin M., Vidal-Beaudet L. et Eglin T. (2020). La séquestration de carbone dans les sols agricoles, forestiers et urbains : état des lieux des méthodes d'évaluation et de quantification, Étude et Gestion des Sols, 27, pp. 305-320.
- Bockheim J.G., Gennadiyev A.N., Hammer R.D., Tandarich J.P. (2005). Historical development of key concepts in pedology. Geoderma, 124, pp. 23-36.
- Bocquier G. (1984). L'évolution des démarches en pédologie. De l'héritage de B. B. Dokoutchaev à la diversité des démarches actuelles en pédologie. Science du Sol, n° 2, pp. 113-121.
- Boulaine J. (1971). L'agrogologie. Que sais-je ? N° 1412. Presses Universitaires de France. 128 p.
- Boulaine J. (1982). Remarques sur quelques notions élémentaires de la pédologie. Cah. ORSTOM, série Pédologie, vol. XIX, n° 1, 1982: pp. 29-41.
- Boulaine J. (1983). V.V. Dokuchaev et les débuts de la pédologie. Revue d'histoire des sciences. Vol. 36, 3, pp. 285-306.
- Boulaine J. (1989). Histoire des pédologues et de la science des sols. Inra éditions, Paris. 310 p.
- Brevik E.C., Hartemink A.E. (2010). Early soil knowledge and the birth and development of soil science. Catena, 83, pp. 23-33.
- Bridges E.M. (1989). Soil horizon designations. Technical paper 19. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, the Netherlands. 133 p.
- Bruand A., Baize D., Hardy M. (1994). Prediction of water retention properties of clayey soils: validity of relationships using a single soil characteristic. Soil Use Management, 10 (3): 99 -103.
- Buffon (Georges Louis Leclerc, comte de) (1749-1789). Histoire naturelle, générale & particulière, avec la description du Cabinet du Roi. 36 volumes.



- Buffon (Georges Louis Leclerc, comte de) (1819). Œuvres complètes de Buffon, mises en ordre par M. le Comte de Lacépède, seconde édition, 33 volumes. Rapet, Paris.
- Camena d'Almeida P. (1904). La carte des sols de la Russie publiée par le département de l'agriculture. Annales de Géographie, Vol. 13, n° 69, pp. 270-275.
- Darwin C. (1840). On the formation of mould. Trans. Geol. Soc. London, II, Ser., 5 (III), pp. 505-509.
- Darwin C. (1881). The formation of vegetable mould through the actions of worms with observations on their habits. John Murray, London. 298 p.
- Demolon A., Leroux D. (1933). Guide pour l'étude expérimentale du sol. Gauthier Villars, Paris. 213 p.
- Demolon A. (1949). La génétique des sols. Que sais-je ? n° 352. Presses Universitaires de France. 136 p.
- Dokuchaev V.V. (1879a). Mapping the Russian Soils (in Russian). Imperial Univ. of St. Petersburg, St. Petersburg, Russia.
- Dokuchaev V.V. (1879b). Chernozeme (terre noire) de la Russie D'Europe. Société Impériale Libre Economique. Imprimerie Trenke and Fusnot, St. Petersburg.
- Dokuchaev V.V. (1879c). Cartography of Russian soils. (In Russian.) Imperial University of St. Petersburg, St. Petersburg, Russia.
- Dokuchaev V.V. (1883). The Russian Chernozem. Report to the Free Economic Society (in Russian). Imperial Univ. of St. Petersburg, St. Petersburg, Russia.
- Dokuchaev V.V. (1936). Russkiy chernozem[Russian chernozem]. Moscow, Leningrad, Selkhozgiz Publ., 551 p. (In Russian).
- Dokuchaev V.V., Sibirtsev N.M. (1893) Short scientific review of Professor Dokuchaev's and his pupil's collection of soils exposed in Chicago in the Year 1893. E. Evdokimova, St. Petersburg, Russia.
- Duchaufour P. (1960). Précis de pédologie, 1ère édition. Masson, Paris. 438 p.
- Élie de Beaumont L. (1845). Leçons de géologie pratique professées au Collège de France pendant l'année scolaire 1843-1844. Tome premier. P. Bertrand éd., Paris.
- Ellenberger F. (1979). Origine et histoire du terme horizon en géologie et paléontologie: un exemple d'éclatement sémantique. Comité français d'histoire de la géologie, 1<sup>re</sup> série (16), pp.1-7.
- Erhart H. (1926). L'influence de l'origine géologique et des facteurs extérieurs sur la formation et la valeur culturale des terres latéritiques de l'Est de Madagascar. Paris, Librairie Larose, XII et 112 p. [thèse].
- Erhart H. (1935). Traité de Pédologie. Tome 1. Pédologie générale. Strasbourg, Institut pédologique. 260 p. + XXX p. de planches (profils de sols avec paysages et description).
- Fallou F.A. (1862). Pedologie oder Allgemeine und Besondere Bodenkunde. Schönfeld Buchhandlung, Dresden.
- FAO-Unesco (1975). Carte mondiale des sols. 1/5 000 000. Volume 1. Légende. Unesco, Paris, 62 p.
- Favrot J.C., Legros J. P. (1972). A propos d'un type de sol hydromorphe en France: le planosol lithomorphe. Bull. AFES, 6: pp. 243-249.
- Feller C., Brown G.G., Blanchart E., Delepote P., Chernyanski S.S. (2003). Charles Darwin, earthworms and the natural sciences: various lessons from past to future. Agriculture, Ecosystems and Environment, 99: 29-49.
- Feller C., Blanchart E. (2004). Quatre grands savants ont observé des profils et/ou décrit des techniques de prospection pédologiques avant 1850 : Palissy, Buffon, Thaer et Darwin. Étude et Gestion des Sols, Volume 11, 2, pp. 165-173.
- Feller C., Blanchart E., Jabiol B., Greve M.H. (2005). Quand l'humus est à l'origine de la pédologie. 1. Les travaux du forestier danois P. E. Müller (1840- 1926). Étude et Gestion des Sols, Volume 12, 2, pp. 101-122.
- Feller C., Blanchart E., Herbillon A., Leprun J.C., Poss R. (2007). L'importance des recherches coloniales, en particulier à Madagascar, dans le développement de la pédologie française. Étude et Gestion des Sols, Volume 14, 4, pp. 305-315.
- Frosterus B. (1924). Die Klassifikation der Boden und Bodenarten Finnlands. pp. 141 -176. In Mémoires sur la classification et la nomenclature des sols. (In German.) Vol. IV. Commission No. 8. Comité International de Pédologie, Rome.
- Gautronneau Y., Manichon H. (1987). Guide méthodique du profil cultural. Lyon, Institut supérieur d'agriculture et d'agroalimentaire Rhône-Alpes-CEREF / Paris, Grignon, Institut national agronomique-GEARA, 62 p.
- Gerassimov I.P. (1976). Genetic, Geographic and Historical Issues of the Present-Day Soil Science. Moscow, Nauka Press, 298 p. [in Russian]
- Girard M.-C. (1983). Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique. Thèse Doct. d'État. Sols, n° 12, INA Paris Grignon. 430 p.
- Glinka K.D. (1914). Die Typen der Bodenbildung, ihre Klassifikation und geographische Verbreitung. Gebruder Borntraeger, Berlin.
- Hartemink A.E., Minasny B. (2014). Towards digital soil morphometrics. Geoderma, Vol. 230-231, pp. 305-317.
- Hartemink A.E., Minasny B. (eds), (2016). Digital Soil Morphometrics. Progress in soil Science. Springer-Nature. 459 p.
- Hénin S., Féodoroff A., Gras R., Monnier G. (1960). Le profil cultural. Principes de physique du sol. Soc. Éditions des Ingénieurs Agricoles, Paris, 320 p.
- Hilgard E.W. (1860). Report on the Geology and Agriculture of the state of Mississippi. State of Mississippi, E. Barksdale, State Printer, Jackson, MS.
- ISSS Working group RB (1998). World Reference Base for Soil Resources. 1st edition. Introduction. Edited by J.A. Deckers, F.O. Nachtergaele and O.C. Spaargaren. Leuven. 88 pages.
- Jenny H. (1941). Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology. Dover Publications, New York, 281 p.
- Jolivet C., Boulonne L., Ratié C. (2006). Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols. INRA Infosol, Orléans, 190 p.
- Kovda V.A. (1984). L'apport de V. V. Dokouchaev dans la science et l'agriculture. Science du Sol, n° 2, pp. 105-112.
- Kubiens W.L. (1953). The Soils of Europe. Illustrated diagnosis and systematics. C.S.I.C. Madrid. Thomas Murby and Co, London. 318 p. Manuscrit déposé en 1950.
- Legros J.-P. (2011). À l'aube de la Science du sol - Académie des Sciences et Lettres de Montpellier. [http://www.ac-sciences-lettres-montpellier.fr/academie\\_edition/fichiers\\_conf/LEGROS2011.pdf](http://www.ac-sciences-lettres-montpellier.fr/academie_edition/fichiers_conf/LEGROS2011.pdf)
- Marbut C.F. (1921). The contribution of soil surveys to soil science. Soc. Prom. Agric. Sci. 41.
- Marbut C.F. (translation), (1927). The great soil groups of the world and their development by K.D. Glinka. Edwards Brothers, Ann Arbor, Michigan
- Marbut C.F. (1928). A scheme for soil classification. Proc. 1st Int. Congress of Soil Science. Comm., vol. 5. Washington, DC, pp. 1 -31.
- Morvan X., Richer-De-Forges A., Arrouays D., Le Bas C., Nicolas N. Saby N., Jones R.J.A. (2007). Une analyse des stratégies d'échantillonnage des réseaux de surveillance de la qualité des sols en Europe. Étude et Gestion des Sols, Volume 14, 4, pp. 317-325.
- Müller P.E. (1879). Studier over Skovjord, som Bidrag til Skovdyrknings Theori. I. Om Bøgemuld og Bøgemor paa Sand og Ler. Tidsskrift for Skovbrug, 3, pp. 1-124.
- Müller P.E. (1884). Studier over Skovjord, som Bidrag til Skovdyrknings Theori. II. Om Muld og Mor i Egeskove og paa Heder. Tidsskrift for Skovbrug, 7, pp. 1-232.
- Müller P.E. (1887). Studien über die natürlichen Humusformen und deren Einwirkung auf Vegetation und Boden. Verlag von Julius Springer, Berlin.
- Müller P.E. (1889). Recherches sur les formes naturelles de l'humus et leur influence sur la végétation et le sol. Berger-Levrault et Cie, Paris-Nancy, 351 p.
- Müller G. (1980). Bodenkunde. Deutscher Landwirtschaftsverlag. Berlin. 392 p.
- Orth A. (1875). Die geognostisch-agronomische Kartirung. Verlag von Ernst & Korn, Berlin.

- Plaisance G., Cailleux A. (1958). Dictionnaire des sols. La maison rustique. Paris. 604 p.
- Ruellan A. (2010). Des sols et des hommes - Un lien menacé. IRD Éditions, Marseille. 106 p.
- Ruellan A., Dosso M. (1993). Regards sur le sol. Éd. Foucher et Aupelf, Paris. 192 p.
- Senft F. (1847). Lehrbuch der Gebirgs- und Bodenkunde. Zunächst für Forst- und Landwirthe. 2 Bände, Jena.
- Shaw C.F. (1927). Report of committee on soil terminology. Am. Soil Surv. Assoc. Bull. 8, 66 -98.
- Simonson R.W. (1989). Historical highlights of soil survey and soil classification with emphasis on the United States, 1899 -1970. Int. Soil. Ref. Info. Cent. Tech. Paper 18. Wageningen, The Netherlands.
- Soil Survey Staff (1951). Soil Survey Manual. U.S. Dept. of Agric. Soil Conservation Service. Handbook. 18. U.S. Govt. Print. Off. Washington, DC. 503 p.
- Soil Survey Staff (1999). Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd edition. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 436.
- Tandarich J.P., Darmody R.G., Follmer L.R. (1988). The development of pedologic thought: some people involved. Phys. Geog. 9, pp. 162 -174.
- Tandarich J.P., Darmody R.G., Follmer L.R., Johnson D.L. (2002). Historical Development of Soil and Weathering Profile. Concepts from Europe to the United States of America. Soil Science Society of America Journal, 66 (2): 335-346.
- U.S. Dept. of Agriculture (1960). Soil Classification. A comprehensive system. 7th approximation. Soil Survey Staff. Soil Conservation Service. 265 p.
- van Oort F., Jongmans T., Lamy I., Baize D., Chevallier P. (2008). Impacts of long-term waste-water irrigation on the development of sandy Luvisols: consequences for metal pollutant distributions. *European Journal of Soil Science*, 59, pp. 925-938.
- van Oort F., Baize D., Thiry M. (2022). Les sols pollués à l'épreuve de l'expertise pédologique: retour d'expérience sur la variabilité des teneurs en éléments traces métalliques des sols pollués et les stratégies d'échantillonnage dans deux sites majeurs français. *Étude et Gestion des Sols*. Vol. 29. pp. 5-29.