

Réflexions à propos des analyses de terre et de sols

Denis Baize

Directeur de Recherches en retraite, INRAE Val de Loire UR Sols, France

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

RÉSUMÉ

Cette note présente un certain nombre de réflexions relatives au bon usage des analyses en agronomie comme en pédologie. Mais elle en souligne également les limites. Pas d'interprétation possible des résultats sans prise en compte du sol pris dans son ensemble (diagnostics morphologiques et fonctionnels) ainsi que des informations fournies par diverses déterminations physiques. Tout cela replacé dans son contexte climatique et agronomique.

Mots-clés

Analyses, sols, terre, échantillon.

SUMMARY

SOME THOUGHTS ABOUT EARTH AND SOIL ANALYSES

This note submits diverse thought relating to the right use of analyses in the field of agronomy as well as pedology. But it also underlines their limits. No possible interpretation of results without considering the soil as a whole (morphological and functional diagnosis) and without useful information provided by physical determinations. All this put in its climate and agronomy context.

Key-words

Analyses, soil, earth, soil sample.

Comment citer cet article :

Baize D., 2020 - Réflexions à propos des analyses de terre et de sols, *Etude et Gestion des Sols*, 27, 351-359

Comment télécharger cet article :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-27/>

Comment consulter/télécharger

tous les articles de la revue EGS :

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

RESUMEN**REFLEXIONES ACERCA DE LOS ANÁLISIS DE TIERRA Y DE SUELOS**

Esta nota presenta una serie de reflexiones relativas al uso eficiente de los análisis en agronomía como en pedología. Pero subraya también los límites. Ninguna interpretación posible de los resultados sin toma en cuenta del suelo tomado en su conjunto (diagnósticos morfológicos y funcionales) así que de informaciones proporcionadas por diversas determinaciones físicas. Todo eso puesto en su contexto climático y agronómico.

Palabras clave

Análisis, suelos, tierra, muestra

Cette petite note n'a d'autre ambition que de présenter quelques réflexions à propos des analyses de terres/sols demandées par les agronomes et les pédologues.

Soulignons tout d'abord la nécessaire complémentarité entre les observations de terrain initiales et l'interprétation des résultats d'analyses. Au départ, c'est grâce aux observations en 2 ou 3 dimensions que sont choisis les points de prélèvements et, ensuite, les résultats des analyses ne peuvent être interprétés sans recours aux observations faites *in situ* sur le sol replacé dans ses différents contextes (géologique, pédologique, géomorphologique, cultural).

« SOL » ET « ÉCHANTILLON »

Ne pas confondre « le sol », milieu continu, tridimensionnel, hétérogène (mais structuré), dynamique et contenant des organismes vivants et « l'échantillon de sol » qui est :

- supposé représentatif mais d'un seul horizon ;
- sorti de son contexte (donc, par exemple, qui ne subit plus les contraintes de pression et se trouve décomprimé) ;
- très souvent séché à l'air, ce qui constitue une très forte contrainte et un état pratiquement jamais atteint *in situ* ;
- très souvent passé à travers une passoire ou un tamis de 2 mm, d'où une déstructuration presque totale ;
- parfois même broyé à 250 μm pour réaliser certaines analyses chimiques.

Il me paraît nécessaire d'insister sur ce point car, trop souvent et même dans les articles scientifiques, des analyses réalisées sur des échantillons pris dans les 10 - 20 ou 30 premiers centimètres sont censées caractériser « le sol ».

Il semble donc préférable de parler « d'analyses d'un échantillon de terre » ou « d'analyses d'échantillons de sols » car ce qui est soumis à l'analyse dans un laboratoire est, presque toujours, un échantillon très artificialisé.

ANALYSES DE TERRE VS ANALYSES DE SOLS

« Les analyses d'un échantillon de terre »

- se limitent souvent à doser le carbone organique, N, P, K et les oligo-éléments et à mesurer le pH dans l'eau ;
- se limitent à l'horizon ou aux horizons les plus superficiels ;
- ont un objectif d'application agricole immédiate : la **conduite** d'une parcelle dans le contexte d'un certain système de culture et avec un objectif de rendement ;
- cherchent donc à caractériser cette parcelle ou plusieurs sous-parcelles¹ ;

- sont pratiquées sur un échantillon composite constitué par plus d'une quinzaine de **prises** effectuées dans un cercle de 20 m de rayon ou selon une grille préétablie ;
- doivent être renouvelées périodiquement ;
- intéressent les agronomes et les agriculteurs.

« Les analyses d'échantillons de sols »

- chacune consiste en une vingtaine de déterminations chimiques et granulométriques **pratiquées sur un échantillon supposé représentatif d'un seul horizon**, en un point de l'espace de coordonnées x, y et z ;
- elles concernent tous les horizons majeurs que l'on décide de distinguer et de prélever ;
- elles cherchent à caractériser les principaux horizons de la couverture pédologique en un point et à un moment donnés ;
- elles ont comme objectif de mieux cerner les caractéristiques et les propriétés des sols en liaison avec d'autres méthodes d'étude (examen du solum, micromorphologie, minéralogie, tests et mesures *in situ* et au laboratoire, etc.) ;
- elles fournissent des informations généralement durables, sauf interventions brutales de l'homme ;
- elles peuvent intéresser les agronomes et les agriculteurs mais servent aussi à comprendre puis résoudre nombre de problèmes environnementaux (par exemple : qualité des eaux profondes ou superficielles ; émissions de gaz à effet de serre ; séquestration du carbone).

Les analyses de sols sont celles qui sont réalisées à la suite du creusement de fosses et tranchées par les pédologues, chercheurs ou ingénieurs, pour bien caractériser les divers horizons des couvertures pédologiques. Certaines déterminations, notamment celles destinées à caractériser l'état biologique, ne sont cependant réalisées que sur les horizons supérieurs humifères (horizons L, horizons A) car c'est là que se concentre l'activité biologique.

LA REPRÉSENTATIVITÉ DES ÉCHANTILLONS

Qu'il s'agisse d'échantillons de terre ou de sols, un point tout à fait majeur est leur représentativité. Quand on effectue un prélèvement pour une analyse de terre, on fait l'hypothèse implicite que l'échantillon de quelques centaines de grammes représente correctement les 4000 tonnes de terre de l'horizon labouré sur un hectare. En cartographie pédologique, il est assez vertigineux, quand on y réfléchit un peu, de prétendre caractériser des sous-ensembles de couverture pédologique de plusieurs centaines ou de plusieurs milliers d'hectares (sur une

¹ Ce qui implique un zonage préalable de chaque parcelle et la réalisation de

prélèvements dans la zone ou les zones jugée(s) la(es) plus représentative(s).

épaisseur d'un mètre ou plus) par quelques dizaines de prélèvements seulement, de quelques kilos chacun tout au plus.

LES MÉTHODES ET LES PROTOCOLES

La méthode d'analyse et les détails du protocole jouent un rôle important sur le résultat obtenu sur un même échantillon. Juste trois exemples pour illustrer ce point.

- Il existe de nombreuses méthodes pour évaluer le « phosphore assimilable », à utiliser selon la nature (calcaire ou non) de l'échantillon.
- Les taux de fer dit « libre » varient très largement en fonction du réactif utilisé pour l'extraction et même en fonction du mode opératoire. Comme on s'est aperçu que les quantités de fer extraites sont sensibles aux radiations ultra-violettes, les manipulations s'effectuent désormais à l'abri de la lumière (méthode Tamm en obscurité).

En toute rigueur, on ne doit pas traiter ensemble et confronter des résultats obtenus avec des méthodes différentes qui, le plus souvent, fournissent des valeurs nettement distinctes pour un même échantillon.

Un troisième exemple est fourni par les dosages des éléments traces métalliques (ETM) dans des échantillons de sols. Deux méthodes de **mise en solution** sont normalisées et largement utilisées en France et en Europe : la méthode qui emploie l'eau régale (ER) et celle qui utilise l'association de trois acides forts dont l'acide fluorhydrique (HF).

La méthode avec HF a été choisie par l'INRA parce qu'elle peut être considérée comme une méthode véritablement totale ne posant de ce fait aucune difficulté d'interprétation. Elle est capable de dissoudre les silicates, minéraux dominants dans l'écrasante majorité des sols, qu'il s'agisse de minéraux primaires (quartz, feldspaths, micas, ferromagnésiens) ou de minéraux secondaires résultant de l'altération des précédents (minéraux argileux). Certes, certains minéraux réfractaires comme la chromite, les grenats, la magnétite, le zircon ne sont que partiellement attaqués (Pansu et Gautheyrou, 2003) mais il s'agit là de minéraux rares présents occasionnellement et en toutes petites quantités.

Il est maintenant bien connu que la méthode ER extrait beaucoup moins de nickel (en moyenne un tiers en moins) et de chrome (en moyenne moitié moins) que la méthode HF. C'est d'ailleurs ce que signale la norme AFNOR X31-415 elle-même : « *la plupart des sols ne sont pas complètement mis en solution par l'eau régale et l'efficacité d'extraction diffère d'un élément à l'autre* ».

Naturellement, plusieurs auteurs ont cherché à établir des relations mathématiques simples pour passer des résultats d'une méthode à ceux de l'autre méthode. Par exemple Utermann *et al.* (1999) ont comparé les teneurs ER et les teneurs HF pour Cd, Cu, Ni, Pb et Zn mesurées sur environ 500 échantillons de sols, lesquels ont été stratifiés en 11 classes de

grands types de matériaux parentaux. Leur conclusion est que la proportion teneurs ER / teneurs HF varie à la fois en fonction de la concentration en chaque élément et en fonction du type de matériau parental. Des études en cours montrent qu'il est possible d'obtenir des corrélations significatives entre les résultats des deux méthodes mais qui ne permettent pas une prévision fiable. En effet, pour une même détermination, les divergences sont plus ou moins grandes selon la constitution de l'échantillon (pH, présence de carbonate de calcium, teneur en argile, abondance du fer, etc.).

Avec le temps et même si l'on reste fidèle à un seul laboratoire d'analyse pendant vingt ans, celui-ci est obligé de changer de méthodes ou de modifier ses protocoles ou de s'équiper de matériels de dosage plus performants. Il peut en résulter des effets inattendus sur les valeurs mesurées. L'exemple du site de l'Observatoire de la Qualité des Sol (O.Q.S.) situé à Gouézec (Legros *et al.*, 2002) est tout-à-fait spectaculaire (*voir l'encadré*).

C'est pourquoi deux informations sont essentielles : le laboratoire d'analyse et la date de l'analyse. En recoupant ces deux informations, il est toujours possible, même longtemps après, de reconnaître les méthodes employées et leur éventuel changement au cours du temps.

Enfin, immanquablement, des méthodes d'analyse nouvelles sont proposées. Le pédologue se trouve alors tiraillé entre deux attitudes. Doit-il rester fidèle à la méthode plus ancienne largement éprouvée et ainsi pouvoir confronter ses résultats à un référentiel personnel ou collectif déjà bien établi, ou, au contraire, se rallier aux nouvelles techniques ? Dans ce dernier cas, il se retrouve sans référentiel et sans pouvoir rattacher ses nouveaux résultats à ses anciennes mesures. Ainsi, la détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) par la méthode de Metson (à pH 7) reste celle de référence au niveau mondial alors que, pour les sols acides, il serait plus judicieux de pouvoir la déterminer au pH du sol et que, pour les sols cultivés, la méthode à la cobalthexammine présente de nombreux avantages. Cette dernière est une méthode simple ne nécessitant qu'une seule extraction et elle permet de doser directement sur le même filtrat tous les cations échangés, y compris Al^{3+} et H^+ .

Il faut donc toujours signaler la méthode d'analyse employée, ainsi que l'unité et à quoi se rapporte la valeur numérique du résultat.

Pour cent et ppm (parties par millions) sont moins précis que g/100 g ou mg/kg car il est toujours utile de savoir s'il s'agit d'une expression en poids/poids (par ex. g/g), en volume/volume (par ex. cm^3/cm^3) ou d'une expression mixte (par ex. g/ cm^3).

Dernier point : le résultat d'un dosage implique toujours une certaine **incertitude**, laquelle a plusieurs causes qui se cumulent, pas seulement celle sur la mesure finale. Mais existe-t-il une vérité absolue, une « valeur vraie » dépourvue de toute « erreur », comme il est pourtant fait mention dans les traités de métrologie ?

Gouézec

Étude de l'impact des épandages de lisiers de porcs sur le site O.Q.S. de Gouézec (Finistère).

Teneurs en six éléments en traces de l'horizon labouré, exprimées en mg/kg.

Moyennes mesurées sur 23 échantillons prélevés à 8 années d'intervalle exactement aux mêmes points. Les échantillons de 1989 ont été analysés à l'époque puis réanalysés en 1998.

Colonnes	A	B	C	D	E	F
				Dérive analytique	Différences apparentes	Accroissement réel
Date de prélèvement	1989	1989	1997	%	%	%
Date des analyses	1989	1998	1998	$(B-A) \times 100/A$	$(C-A) \times 100/A$	$(C-B) \times 100/A$
Cuivre	32,87	31,84	35,28	-3,1	+7,3	+10,8
Zinc	93,91	96,87	107,12	+3,1	+14,0	+10,5
Plomb	36,50	33,22	33,40	-9,0	-8,5	+0,5
Chrome	59,60	67,36	67,73	+13,0	+13,6	+0,5
Cadmium	0,084	0,196	0,197	+133,0	+135,0	+0,5
Cobalt	16,89	12,59	12,98	-25,5	-23,1	+3,1

Si on se fie uniquement aux analyses réalisées sur le moment sur les prélèvements de 1989 (colonne A) et sur ceux de 1997 (colonne C), les différences (colonne E) semblent être considérables, tout particulièrement en ce qui concerne le cadmium (+ 135 %). Le cobalt, lui, semble diminuer de 23 % de façon inexplicable.

Si on compare les résultats obtenus sur l'ensemble des 46 échantillons prélevés en 1989 et en 1997 et analysés dans la même série en 1998, on ne constate d'augmentation notable (environ + 10 %) que pour le zinc et le cuivre, les deux éléments abondants dans les lisiers de porcs et qui risquent de poser problème à long terme. Les accroissements < 1 % ne sont sans doute pas significatifs et restent dans les limites de l'incertitude analytique.

Ce qui est ici appelé « dérive analytique » (colonne D) correspond aux différences obtenues sur les deux dosages réalisés en 1989 et 1998 sur les mêmes échantillons prélevés en 1989. L'accroissement apparent de 135 % résulterait d'une petite modification du protocole analytique, au sein du même laboratoire (INRA à Arras).

Lorsqu'on réalise une comparaison diachronique, il semble préférable de pouvoir réanalyser les prélèvements initiaux en même temps que les prélèvements les plus récents. Évidemment, cela augmente considérablement les coûts.

Fonctionnement hydrique des planosols «primaires» de Champagne Humide

	Au cours de l'hiver et du printemps		Au cours de l'été et au début d'automne
	humides	horizons supérieurs limoneux ou sablo-limoneux	secs
30 cm	saturés		secs
	humides	horizons argileux ou argilo-sableux peu perméables	frais
	secs	horizons profonds imperméables	secs

Schéma des observations que l'on peut faire aussi bien sur une fosse que lors de sondages à la tarière.

Interprétation : Très peu d'eau de pluies atteignent les horizons profonds lesquels ne montrent pas de structure en agrégats. Le flux d'eau pénétrant les horizons argileux de moyenne profondeur est faible et très lent. En hiver et au printemps, l'eau qui engorge les horizons supérieurs est évacuée latéralement, circulant rapidement sur un «plancher» peu perméable

LIMITES D'UNE APPROCHE PUREMENT ANALYTIQUE

Même si elles sont désormais indispensables, les analyses d'échantillons de terre ou de sols ne disent pas tout.

En 1955 dans « *Pédologie appliquée à l'agriculture* », Pierre Waguet écrivait : « ces méthodes [d'analyse de l'époque] restent imparfaites et insuffisantes :

- 1°) Parce qu'elles comportent toujours une part de convention et d'arbitraire, inévitable en pareille matière ;
- 2°) Et surtout, ce qui est plus grave, parce que, pour analyser un sol au laboratoire, on commence par le dessécher, le tamiser, le calciner ; en conséquence, on analyse un sol mort, sans eau, sans gaz, sans microbes : un cadavre, un squelette de sol. On procède un peu comme un étudiant en médecine qui se contenterait d'étudier le corps humain au moyen de simples dissections sans se préoccuper de la physiologie de l'être vivant.

Trop souvent, le chimiste chargé d'une analyse de sol ignore :

- l'origine du sol qu'on lui envoie ;
- la région dont il provient, donc la géologie et le climat ;
- la nature de la végétation spontanée ou des cultures pratiquées ;
- les engrais ou amendements récemment appliqués, etc.

Comment, dans ces conditions, en présence de cet échantillon anonyme, pourrait-il formuler des conclusions précises et surtout donner à l'agriculteur des conseils utiles ?

En un mot, on ne peut, sans graves inconvénients, étudier le sol hors de son milieu local. Car la connaissance du sol est une science de la localité ».

Cette critique est sans doute moins justifiée aujourd'hui où les demandes d'analyses agronomiques sont souvent accompagnées par un questionnaire relatif à un certain nombre de caractéristiques de la parcelle échantillonnée. Mais celui-ci est-il toujours correctement rempli ? Souvent désormais des techniciens agronomes interviennent au moment des prélèvements et pour aider aux interprétations des résultats.

Ce reproche est repris par Baize en 2018, mais cette fois-ci appliqué aux analyses de sols :

« Les résultats d'analyses de sols fournissent certes de nombreuses informations indispensables mais leur intérêt reste tributaire de la représentativité de l'échantillonnage...

... L'approche analytique privilégie trop les constituants aux dépens des organisations (ou « structures ») lesquelles ont pourtant une importance extrême (Baize et al., 2013). En outre, elle fige la pédologie dans le temps au détriment d'une connaissance beaucoup plus dynamique. Ainsi, l'approche analytique permet très mal d'appréhender les phénomènes d'engorgements alors qu'un suivi descriptif prolongé dans le temps, même réalisé avec un matériel très simple, apporte

Tableau 1 - Pédogenèse dans le cas de calcaires durs (Jura, Bourgogne, Berry, Poitou). L'accumulation relative des éléments insolubles (argiles, fer) est la conséquence arithmétique de la décarbonatation totale.

Tableau 1 - *Pedogenesis in the case of hard limestones (Jura, Burgundy, Berry, Poitou). The relative accumulation of insoluble constituents is the arithmetical consequence of total carbonate dissolution.*

	Composition pondérale
A L'ORIGINE : composition initiale de la roche	
CaCO ₃ (calcaire) = 98 g/100 g	98 %
Résidus "insolubles" = 2 g/100 g	2 %
dont argiles = 1,3 g/100 g	1,3 %
fer total = 0,3 g/100 g	0,3 %
cadmium total = 1 mg/kg	
AUJOURD'HUI : composition de la formation argileuse résiduelle après décarbonatation totale	
CaCO ₃ = 0	0 %
Résidus "insolubles" = 100 g/100 g	100 %
dont argiles = 65 g/100g	65 %
fer total = 4,2 g/100g	4,2 %
cadmium total = 45 mg/kg *	

* sous l'hypothèse que le cadmium est resté lié aux minéraux argileux et aux oxydes de fer et de manganèse et qu'il n'a pas été lixivé. En France, la plus forte teneur en cadmium dans un horizon de sol a été mesurée au contact d'un calcaire dur dans le Haut Jura = 22 mg/kg (Prudente et al., 2002).

des informations essentielles (voir encadré « Fonctionnement hydrique des planosols primaires »).

... Certaines données analytiques permettent de préciser la pédogenèse actuelle (pH, état du complexe d'échange, rapport C/N); tandis que les autres fournissent une information beaucoup plus complexe : ce que l'on observe aujourd'hui est la résultante de l'action de plusieurs processus pédogénétiques plus ou moins anciens, successifs et/ou simultanés. C'est le cas, notamment, des données granulométriques, chimiques et minéralogiques qui sont, en outre, sous nos climats, très tributaires de l'héritage reçu du matériau parental.

... Sans oublier les phénomènes d'accumulation relative qui peuvent être trompeurs. On oublie parfois que la disparition de certains éléments d'un horizon a pour conséquence automatique (puisque tout est exprimé en pourcentages pondéraux) l'accroissement apparent des autres éléments qui sont restés. Cela est bien net dans le cas d'une décarbonatation totale ou partielle. Ce phénomène est particulièrement spectaculaire dans le cas de sols développés dans les résidus de décarbonatation de calcaires jurassiques (tableau 1).

... Enfin, un sol ne se réduit pas à une superposition de boîtes. Nous donnons parfois l'impression à des non-pédologues que « le sol » (= fragment strictement localisé d'une couverture pédologique) est une superposition d'un certain nombre de compartiments. ...n'oublions pas l'importance des relations entre horizons, morphologiques (transitions,

contrastes, imbrications) et fonctionnelles, verticales ou latérales, notamment en ce qui concerne le fonctionnement hydrique des couvertures pédologiques et l'enracinement des plantes ».

CONCLUSION

Agronomes et pédologues se rejoignent désormais sur l'idée que les analyses de laboratoires ne peuvent être réalisées (choix des emplacements de prélèvements) ni leurs résultats interprétés sans des observations préalables attentives sur le terrain. Observations de la fosse pédologique (Baize et Jabiol, 2012) ou observations du profil cultural (Hénin et al., 1960; 1969; Gautronneau et Manichon, 1987; Peigné et al., 2013; Boizard et al., 2019) ou du profil d'enracinement.

Outre qu'elles n'expliquent pas toute la réalité des sols, les analyses chimiques et biologiques doivent être complétées par d'autres types de déterminations réalisées sur le terrain ou au labo, telles que : granulométrie, densités apparentes, tests de stabilité structurale, humidités sur mottes à tel ou tel pF, minéralogie des argiles, etc.

S'y ajoutent désormais les **tests à la bêche** qui sont faits *in situ* pour évaluer le plus objectivement possible la qualité de la structure des horizons de surface. Ces tests sont développés aussi bien en France (Boizard et al., 2013; ISARA, 2016; Arva-

Le *tableau 2* présente les analyses les plus couramment demandées aux laboratoires d'analyse.

Tableau 2 - Principales analyses réalisées sur échantillons de "terre" et de "sols".

Tableau 2 - *Main analyses performed on earth samples and soil samples.*

	Analyses de terre	Analyses de sols
Humidité résiduelle	X	X
Taux d'éléments grossiers	X	X
Carbone total, matières organiques	X	X
Diverses formes du carbone	X	
Acides humiques, fulviques, humine		O
Azote total	X	X
Diverses formes de l'azote	X	
Perte au feu		■
Granulométrie	X	X
Granulométrie après décarbonatation		X
Calcaire total et actif	X	X
pH eau, pH KCl, pH CaCl ₂	X	X
Capacité d'échange cationique (CEC)	X	X
Cations alcalins et alcalino-terreux échangeables	X	X
Aluminium échangeable		X
Phosphore assimilable ou disponible	X	
Éléments majeurs (extractions totales)	X	X
Éléments en traces (extractions totales)	X	
Diverses formes du fer, de l'aluminium et du manganèse		X
Éléments en traces (extractions partielles), oligo-éléments	X	
Densité apparente, porosité		X
Propriétés de rétention en eau (HCC et HPF)	X*	X
Stabilité structurale	X	X
Qualité biologique (indicateurs)	X	
Analyses spécifiques aux matériaux holorganiques	X	■

Légende :

X : faites habituellement

O : ne se font plus guère

■ : sur tourbes et litières forestières.

* les déterminations de l'humidité à la capacité au champ (HCC) et de l'humidité au point de flétrissement (HPF) sont nécessaires pour gérer l'irrigation de cultures fruitières et maraichères.

lis, 2018; Boizard *et al.*, 2019) qu'en Suisse (Collectif, 2018) et peuvent être réalisés par les agriculteurs eux-mêmes après une petite formation.

Enfin, même si on a de bonnes raisons de ne faire analyser que l'horizon de surface, il est toujours souhaitable de prendre en compte le sol dans son ensemble : son matériau parental, sa morphologie et ses fonctionnements. Cela permet une stratification efficace de l'échantillonnage (Baize 1997 - programme ASPITET). Un des points faibles des banques de données telles que la Base de Données des Analyses de Terre (BDAT - Saby *et al.*, 2014) ou la Base de Données des Éléments Traces Métalliques (BDETM - Duigou et Baize, 2010) réside dans le fait que l'on ne sait rien du sol d'où provient le prélèvement ni de son matériau parental. Inversement, c'est un point fort du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS - Jolivet *et al.*, 2006) d'avoir parfaitement caractérisé le sol en chaque site dès la première campagne.

REMERCIEMENTS

Merci aux deux relecteurs pour leurs remarques constructives (ils se reconnaîtront).

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR, norme NF ISO 11466 (X31-415) - Qualité du sol - Extraction des éléments en traces solubles dans l'eau régle (1995).
- Arvalis, 2018 - Le test bêche : pour un diagnostic rapide de l'état structural du sol.
<https://www.arvalis-infos.fr/evaluer-la-structure-du-sol-avec-le-test-b-che-@/view-26701-arvarticle.html>
- Baize D., 1997 - Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Éditions, Paris. 410 p.
- Baize D., 2018 - Guide des analyses en pédologie. 3^e édition revue et augmentée. Quae, 328 p.
- Baize D., Jabiol B., 2012 - Guide pour la description des sols. Nouvelle édition. Quae éditions. 448 p.
- Baize D., Duval O., Richard G. (coord.), 2013 - Les Sols et leurs Structures. Observations à différentes échelles. Quae, 264 p.
- Boizard H., Ball B.C., Shepherd G., Roger-Estrade J., 2013 - Caractérisation au champ de la structure des horizons de surface des sols cultivés. *In*: D. Baize, O. Duval et G. Richard (coord.). Les Sols et leurs Structures. Observations à différentes échelles. Quae, pp. 121-132.
- Boizard H., Peigné J., Vian J.F., Duparque A., Tomis V., Johannes A., Métais P., Sasal M.C., Boivin P., Roger-Estrade J., 2019 - Les méthodes visuelles d'évaluation de la structure du sol au service d'une démarche clinique en agronomie. *Agronomie, Environnement et Sociétés*, 9, 2, pp.55-76.
- Collectif, 2018 - Évaluation Visuelle de la Structure des horizons de surface des sols cultivés (VESS).
https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/environnement/sol/fichiers_pdf/GEODE_SOLS_VESS_A_Test_bêche_Horizon_A_score_chart_FR_2018.pdf
- Duigou N., Baize D., 2010 - Nouvelle collecte nationale d'analyses d'éléments en traces dans les sols (horizons de surface) - (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn). Rapport final. Contrat ADEME 0875C0036. 284 pages.
- Gautronneau Y., Manichon H., 1987. Guide méthodique du profil cultural.
<http://profilcultural.isara.fr/>
http://www.supagro.fr/ress-pepites/PlantesdeCouverture/res/guide_manichon.pdf
- Hénin S., Féodoroff A., Gras R., Monnier G., 1960 - Le profil cultural. Principes de physique du sol. Paris, Société d'Éditions des Ingénieurs Agricoles, 320 p.
- Hénin S., Gras R., Monnier G., 1969. Le profil cultural. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. 2^{de} éd., Paris, Masson, 332 p.
- ISARA, 2016 - Test Bêche. Guide d'utilisation. 24 p.
https://orprints.org/32099/1/peigne-et-al-2016-GuideTestBeche-ISARA_Lyon.pdf
- Jolivet C., Arrouays A., Boulonne L., Ratié C., Saby N.P.A., 2006 - Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France (RMQS) - État d'avancement et premiers résultats. *Étude et Gestion des Sols*, 13, 3, pp. 149-164.
- Legros J.P., Martin S., Baize D., Rivière J.M., Leprêtre A., 2002 - Les épandages d'effluents d'élevage en Bretagne - Accumulation de cuivre et de zinc dans une parcelle de l'Observatoire de la qualité des sols (O.Q.S.). pp. 169-182. *In*: « Les Éléments traces métalliques dans les sols - Approches fonctionnelles et spatiales » D. Baize et M. Tercé coord. INRA Éditions, Paris. 570 p.
- Pansu M., Gautheyrou J., 2003 - L'analyse du sol, minéralogique, organique et minérale. Springer Verlag, France. 993 pages.
- Peigné J., Vian J.-F., Chrétien O., Gautronneau Y., 2013 - Le profil cultural : une méthode d'étude *in situ* de la structure des sols cultivés. *In*: D. Baize, O. Duval et G. Richard (coord.). Les Sols et leurs Structures. Observations à différentes échelles. Quae, pp. 105-119.
- Prudente D., Baize D., Dubois J.-P., 2002 - Le cadmium naturel dans une forêt du haut Jura français. pp. 53-70. *In*: Les Éléments traces métalliques dans les sols - Approches fonctionnelles et spatiales », D. Baize et M. Tercé coord. INRA Éditions, Paris. 570 p.
- Saby N.P.A., Lemercier B., Arrouays D., Leménager S., Louis B.P., Millet F., Paroissien J.-B., Schellenberger E., Squidant H., Swiderski C., Toutain B., Walter C., Bardy M., 2014 - Le programme Base de Données des Analyses de Terre (BDAT) : Bilan de 20 ans de collecte de résultats d'analyses. *Étude et Gestion des Sols*, 21, pp. 141-150.
- Utermann J., Düwel O., Gäbler H.E., Hindel R., 1999 - Substrate and element specific relation of real total versus aqua regia soluble contents of heavy metals in soils. *Proc. 5th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements*, Wien. pp. 406-407.
- Waguet P., 1955 - Pédologie appliquée à l'agriculture. La maison rustique, Paris, 180 p.

