

Des indicateurs de la fertilité des sols

On soil fertility indicators

Jean-Claude Fardeau

NDLR :

Cet article est un texte posthume. Jean-Claude Fardeau nous a quittés le 15 juillet 2014. Une journée d'hommage lui a été rendue le 13 avril 2015 sous l'égide du GEMAS-COMIFER et de l'AFES. Le texte, inédit, de cet article, circulait par envoi électronique auprès de bon nombre de membres de l'AFES depuis plusieurs années. La rédaction d'Etude et Gestion des Sols a décidé de le publier tel quel, comme un article « d'opinion scientifique ». Il n'a évidemment pas été possible d'appliquer la procédure habituelle de relecture par des pairs et de révision, puisque Jean-Claude n'était plus là... Il n'y aura pas non plus de résumé, ni d'abstract, ni de mots-clés, car c'aurait été à lui de les écrire... Le texte est assez typique du « style Fardeau » et nous assumons totalement sa publication sans aucun changement, à l'exception de quelques coquilles qui ont été repérées par notre secrétaire de rédaction, Florence Héliès. Nous remercions vivement l'épouse de Jean-Claude, Mme Pierrette Fardeau, de nous avoir autorisés à le publier. Nous pensons que ce texte donne à réfléchir et invite à la discussion, ce qui était une des grandes qualités de Jean-Claude Fardeau.

Dominique Arrouays

Rédacteur-en-Chef

Pour certains, l'agriculture, c'est-à-dire la culture des champs, serait née 8 jours après la genèse (Segond, 1965) puisque «L'éternel Dieu ayant fait pousser des arbres de toute espèce, agréables à voir et bons à manger, la fertilité y était donc au top, Eve fit croquer à Adam du fruit défendu». Et c'est alors que, en raison de ce faux pas supposé, et de ce fait probablement mythique, l'Eternel décida que «le sol sera maudit et que c'est à force de peine, à la sueur de son front, que l'Homme tirera sa nourriture de tous les jours, etc.». Plus certainement l'agriculture est née avec les débuts de la sédentarisation des hommes il y a environ 10000 ans en Europe et 15 000 ans en Afrique (Quintana-Murci et Hombert, 2005). Ainsi mes premiers ancêtres sédentaires, qui pour la plupart étaient agriculteurs, quelques-uns étant aussi chasseurs, d'autres grands pêcheurs, et certainement tous dragueurs, en semant, il y a 10000 ans, 1 graine de céréales, après avoir probablement gratté un peu la surface du sol (en quelque sorte en pratiquant une technique culturale très simplifiée : TCTS), récoltaient, où qu'ils soient, en moyenne 1.5 grain. Actuellement, c'est-à-dire environ 600 générations plus tard, nos agriculteurs peuvent récolter en France 100 grains pour une graine semée, en Afrique statistiquement beaucoup moins. Il a donc fallu en moyenne 10 générations pour gagner un grain supplémentaire dans les rendements ; ce gain est loin d'avoir été linéaire dans les temps et d'être réparti de manière homogène sur la planète.

Quel est le rôle de la fertilité intrinsèque des sols, et de ses évolutions, dans ces modifications quantitatives et qualitatives ? La fertilité des sols a-t-elle augmenté dans les mêmes proportions que les rendements ?

Et finalement qu'est-ce, fondamentalement, la fertilité d'un sol, d'une terre ? Quels outils, **quels indicateurs**, prendre pour tenter de la quantifier au laboratoire afin de la valoriser au champ au maximum des intérêts des humains ?

I. INDICATEURS - FERTILITÉ : QUELLES SIGNIFICATIONS DONNER À CES VOCABLES ? LEUR ASSOCIATION EN MODIFIE-T-ELLE LE SENS ?

A. Un indicateur

Dans l'inconscient collectif le terme indicateur, souvent réduit au diminutif **indic**, n'a pas bonne presse. Il s'agit globalement d'un personnage ambigu, souvent interlope, moyennement apprécié de son entourage, et rejeté de tous (commanditaires et victimes) en cas d'échec de la mission confiée. L'ambiguïté, et le risque de rejet, sont-ils également de mise pour les indicateurs supposés décrire la fertilité des sols, et plus encore en prévoir l'évolution sous l'influence des actes des hommes ?

A.1. Un indicateur pour quoi faire ? Et lequel choisir ?

Un indicateur est source d'une information finalisée. Il est utilisé pour présenter le diagnostic d'une situation, communiquer et/ou aider à prendre des décisions opérationnelles afin de piloter des actions (chauler, fertiliser, amender...). Encore faut-il lui poser la bonne question et bien connaître sa finalité ! C'est pourquoi le choix d'un indicateur doit être effectué en fonction de l'objectif principal qui lui est assigné. C'est pourquoi la **pertinence d'un indicateur vis-à-vis de sa cible** s'apprécie à l'aune des attentes des utilisateurs relatives à l'information contenue dans l'indicateur. Cette situation impose de définir avec précision d'une part la cible et d'autre part les attentes des utilisateurs. L'absence de cette phase préalable est souvent cause de mal entendus et de rejet inconscient de l'information fournie par l'indicateur, c'est-à-dire de l'indicateur lui-même. Le fait qu'un indicateur soit une information synthétique impose également que l'utilisateur de l'indicateur connaisse le niveau de synthèse de l'information contenue dans l'indicateur, situation peu fréquente.

A.2. Comment définir un indicateur ? ou un indice ?

De nombreuses explicitations ont été proposées pour définir un indicateur.

Selon Trochery (2003), un **indicateur** doit être une information **synthétique**, généralement quantitative, caractérisant un **phénomène souvent complexe**. Il doit être riche de signification et sa portée dépasse celles des données et variables qui le constituent. La signification de l'indicateur est souvent donnée par sa comparaison avec des **valeurs de référence**, qui peuvent consister en une moyenne sur certains territoires, une valeur historique (et non hystérique), un objectif, un seuil réglementaire ou une norme scientifique.

Pour Elliot (1998), un bioindicateur est, pour le sol, une propriété biologique du sol ou un processus se déroulant au sein du sol, le sol étant ici considéré comme une des briques constitutives d'un ensemble plus vaste, l'écosystème (ou l'agroécosystème). Il doit décrire un des états de l'écosystème.

Enfin un indice, notion voisine d'indicateur, peut être considéré comme une agrégation de données ou d'indicateurs hétérogènes, résumant une information comportant de multiples aspects (Trochery, 2003)

A.3. Qualités potentielles d'un indicateur et propriétés minimales.

Elliot (1998) a estimé qu'un bioindicateur idéal doit être facile à mesurer, renseigner parfaitement dans toutes les situations où il est requis et révéler les problèmes qui se posent là où ils se posent.

L'idéal étant rarement de ce monde, des auteurs plus pragmatiques ont précisé certaines propriétés des indicateurs. Ainsi, Trochery (2003) considère qu'un indicateur doit :

- être pertinent vis-à-vis de la cible utilisateur ;
- disposer d'une validité scientifique évidente avec des bases conceptuelles avérées ;
- posséder des qualités statistiques certaines (précision (r^2), fiabilité, robustesse) ;
- être en mesure de représenter spatialement et temporellement des variations de la variable ou du phénomène à caractériser ;
- disposer d'un rapport intérêt/coût supérieur à 1.

Doran et Parkin (1994), ainsi que Doran et Safley (1998), considèrent que pour être utiles à tous les utilisateurs potentiels (praticiens, scientifiques, environnementalistes, faiseurs de réglementation, ...) un indicateur doit :

- être bien corrélé à des processus écosystémiques, ce qui peut favoriser le développement d'outils de modélisation ;
- intégrer des propriétés physiques, chimiques et biologiques ainsi que des fonctions des sols et servir de variables d'entrée pour estimer des propriétés des sols non directement mesurables ;
- être utilisable au champ et être accessible aussi bien aux spécialistes qu'aux néophytes ;
- être sensible aux variations de climat et de pratiques subies par le milieu sol, en particulier sur le long terme, mais peu sensible aux variations instantanées du climat ;
- reposer, autant que faire se peut, sur des données sols présentes dans des bases de données (en clair des données issues de préférence d'analyses de routine) ;
- permettre la construction de fonctions de pédotransfert, c'est-à-dire de formules, statistiquement validées dans un milieu donné et transposables uniquement dans un milieu de même nature, donnant accès, par un calcul utilisant des résultats d'analyses de routine, à une propriété du sol sans avoir à mesurer cette propriété directement.

A.4. Conditions minimales requises pour être en droit de faire appel à un indicateur pour caractériser la fertilité d'un échantillon de terre.

Retenons avec Faedy (2003) que la qualité opérationnelle d'un indicateur va reposer sur une trilogie qui concerne non pas l'indicateur, mais l'échantillon analysé et le référentiel d'interprétation, ce qui impose de disposer :

- **d'un échantillonnage représentatif** ;
- d'analyses selon des **méthodes normalisées** officiellement reconnues, ce qui autorise des comparaisons spatio-temporelles et en particulier inter-annuelles ;
- **d'un référentiel d'interprétation adapté**, c'est-à-dire régionalisé, voire « parcellisé » prenant en compte d'une part les

objectifs escomptés (rendement, qualité, coût, et de plus en plus souvent coût environnemental) et d'autre part le risque accepté, ou non, par l'agriculteur.

Cet ensemble de conditions, trop rarement explicitées, rappelle qu'il est souhaitable, voire impératif, que tout utilisateur d'indicateurs connaisse, pour chaque indicateur manipulé, quelles sont ses propriétés, en particulier, la cible visée, son niveau de fiabilité, et ses limites d'utilisation.

B. LA FERTILITÉ DES SOLS. QU'EST-CE ? QUELLES DÉFINITIONS ONT ÉTÉ PROPOSÉES ? QUELLE DÉFINITION RETENIR ?

On doit d'abord constater une discrétion généralisée concernant la définition de l'expression «fertilité des sols» pourtant fort utilisée dans la littérature agronomique. Même le Vatican, souvent si prompt à montrer le chemin à suivre dans bien des domaines et en particulier sur la fécondité, a réussi à organiser un colloque sur le thème de la matière organique et de la fertilité des sols et surtout à en publier le compte rendu (Saint Esprit, 1968) sans donner, en un peu plus de 1000 pages, une seule définition de la fertilité : il fallait réussir cet exploit de parler de fertilité des sols sans définir de quoi l'on parle. Nous avons le devoir de mieux faire pour tenter d'être en mesure de la quantifier au moyen d'indicateurs !

Feuilleter le Petit Robert permet de découvrir que le substantif fertilité a pour signification première «qualité de ce qui est fertile. Exemple : la fertilité d'un sol, d'une terre. Des synonymes sont fécondité et richesse», l'adjectif fertile ayant pour propre définition «qui produit beaucoup de végétation utile ». Ces définitions à connotation littéraire devaient être approfondies pour concevoir la construction d'indicateurs à utiliser pour juger la fertilité des sols.

Un colloque récent du GEMAS-COMIFER (2003) avait pour titre «Les fertilités du sol et les systèmes de culture». Dans les quelques 200 pages que comporte le compte rendu de ce colloque, il apparaît que seul un auteur, et orateur, (Thévenet, 2003) a esquissé une réflexion sur le concept de fertilité du sol. Il observe que le concept empirique et concret de **niveau effectif de production**, facile à mesurer mais évidemment variable d'une année à l'autre et d'une culture à l'autre, a lentement été remplacé par la notion plus abstraite d'**aptitude à produire**, représentative d'une **potentialité**. L'objet du paragraphe suivant est d'illustrer ces lentes évolutions.

B.1. Bref rappel historique sur l'utilisation et la signification de quelques mots relatifs à la fertilité des sols.

Depuis le début de la colonisation du globe par les humains, la possession de nourriture d'abord par utilisation de la cueillette, ou parfois de la guerre, puis sa production et la collecte de la récolte ont été une des préoccupations permanentes des êtres humains. L'Homme a organisé l'espace en dédiant l'espace rural à la pratique de l'agriculture. L'aptitude d'un sol à produire **de manière continue** des nourritures, en quantité et qualité suffisantes, a porté des noms variés, illustrant implicitement l'évolution aussi bien des pensées et que celle des connaissances théoriques et appliquées qui se rapportent à cette fonction de production.

Cette aptitude à produire a porté, depuis l'antiquité jusque vers 1860, le nom de fécondité (Thaer, 1811-1816 ; Thaer, 1856 ; Heuzé, 1862 ; Rusch, 1972), ou celui de synonymes très proches. C'est ainsi que les Romains parlaient de *fecunditas* ou bien de *loci laetitia* (lieux de joie) pour évoquer les zones fertiles. En fait ces termes renvoient simultanément implicitement au concept de mère nourricière et rappellent, également inconsciemment, tout le respect que l'on doit à notre mère.

Il est possible que le premier indicateur quantitatif de fertilité, en fait de fécondité selon son auteur (Thaer, 1811-1816), ait été le scheffel par journal, soit environ 2 quintaux par hectare (Feller *et al.*, 2001). Cette unité situe implicitement les niveaux de production de cette époque, un sol fécond produisant alors 4 scheffels par journal. On récoltait ainsi en moyenne 8 grains pour une graine semée.

Puis le terme de fertilité s'est imposé durant environ un siècle (Barbier, 1955 ; Cooke, 1967). Ainsi les sols fertiles seraient des écosystèmes adaptés à la production agricole (Jansson, 1967) ou bien encore seraient capables de produire les récoltes désirées (Cooke, 1967) ; plus généralement il s'agirait de sol capables de produire des biens (nourriture, fibre et énergie) possédant une valeur commerciale (Hallsworth, 1969). L'utilisation de termes tels désiré (Cooke, 1967) ou valeur commerciale (Hallsworth, 1969) dans des définitions relatives à la fertilité des sols n'est pas sans poser problème à la fois scientifiquement et socialement, puisque par exemple :

- mes désirs ne sont pas obligatoirement ceux de mon voisin (ou de ma voisine !)
- le prix d'une production agricole payé à un agriculteur est terriblement dépendant des subventions directes ou indirectes versées à l'agriculteur, c'est-à-dire des impôts payés par d'autres. De plus les termes utilisés jusqu'alors pour décrire l'aptitude d'un sol à produire des biens nourriciers et/ou commerciaux possèdent tous, à l'évidence, une connotation positive dans l'inconscient humain. Cette absence de neutralité complique parfois le choix, et l'interprétation, des indicateurs à prendre en compte dans la connaissance objective (Bachelard, 1960) de l'appréciation de la fertilité.

On parle désormais de **potentiel de production** (Pieri, 1989 ; Sebillotte, 1989).

En conclusion, on est ainsi passé insensiblement de la matérialisation de la fertilité sous forme de production agricole, traduite en un rendement effectif, au concept de potentialité de production, réalisable sous conditions ; mais ces conditions ne sont que trop rarement explicitées. Le concept de potentiel de production est alors plus synonyme de rêve pour le futur que de concret pour l'immédiat.

B.2. Définition choisie.

Une approche écologique des milieux « naturels »

Un sol non perturbé par l'homme est fertile (Jacks, 1963) s'il est apte à supporter la population climacique de plantes et d'animaux, y compris l'homme, qui vit **en équilibre dynamique** sur et sous le sol ; en quelque sorte une description du paradis, perdu par la faute d'un homme, le premier, dans lequel l'Homme pratique alors la cueillette, au risque de y rencontrer des serpents. Mais, sauf très rares exceptions, la pratique de la cueillette, qui ne permettrait plus de nous assurer notre pain quotidien, est globalement révolue pour la majorité d'entre nous ! Et l'homme pour pratiquer son agriculture nourricière doit perturber le sol. C'est pourquoi cette définition, à connotation d'écologie pure et dure, ne peut être celle choisie ici.

Une approche agronomique des milieux cultivés réels

La Société de Science du Sol Américaine (SSSA) a quelque peu dégraissé les précédentes définitions de la fertilité d'un sol, en particulier en abandonnant apparemment, les références aux espérances nutritives, gustatives ou financières des hommes, sources de tant de guerres sur la planète. Elle définit la fertilité d'un sol comme :

«La qualité d'un sol lui permettant de fournir des éléments nutritifs en quantités adéquates et équilibrées entre elles pour assurer la croissance de plantes ou de cultures données».

Observant que cette définition, parce qu'elle contient au moins une relation de cause à effet, (éléments nutritifs → croissance des plantes) représente un progrès par rapport aux précédentes, elle est celle que nous allons retenir ici. Notons que, parmi les 110 éléments existant dans l'univers, les éléments nutritifs nécessaires aux plantes sont jusqu'à preuve du contraire au nombre de 20. Il s'agit de C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, Cl, Co, Na, Si, B, Ni. Les éléments C, H, O ayant pour

origine essentielle l'air ou l'eau, nous devrions donc disposer au minimum de 17 indicateurs de fertilité des sols, pour ne parler que des indicateurs impliqués directement dans la croissance des plantes !

Ces évolutions du concept de fertilité expliquent comment on est passé insensiblement de la recherche de caractéristiques des sols, et plus généralement agropédoclimatiques qui permettent d'expliquer le rendement obtenu à la recherche de caractéristiques, c'est-à-dire d'**indicateurs**, qui pourraient permettre de prévoir le rendement. **Mais il est toujours plus facile d'expliquer le passé effectivement réalisé que de prévoir le futur!**

B.3. Ambiguïté de la définition retenue. Rôle de l'homme agriculteur dans la réalisation de la fourniture d'éléments nutritifs aux plantes, c'est-à-dire dans l'expression effective de la fertilité telle que définie.

Chacun sait, implicitement, que le rendement d'une culture donnée une année donnée dépend :

- des quantités d'énergie solaire, de CO₂ et d'eau, reçues par le peuplement végétal puis transformées en énergie chimique ;
- de la quantité de travail humain apportée directement ou indirectement au système ;
- de la quantité d'énergie animale ou fossile affectée à la culture (Pimentel *et al.*, 1973) ;
- de la fertilité native du sol, assimilable à une quantité d'énergie libérée par le sol au bénéfice des récoltes.

Ainsi, dans un pays comme la France et plus généralement en Europe occidentale, le rendement final d'une culture est désormais majoritairement lié aux pratiques mises en œuvre, transposables en quantité d'énergie (travail humain, fuel, matières fertilisantes, pesticides..., c'est-à-dire du génie humain) injectée dans l'agroécosystème. Pour s'en convaincre, il suffit de conserver en mémoire que les rendements moyens des blés étaient en France aux alentours de 18 quintaux par hectare vers 1915 alors qu'ils sont désormais voisins de 70 quintaux en croissance moyenne annuelle de 0.25 quintal par hectare, alors que la fertilité native des sols ne passe pas, dans les conversations de salon et à l'analyse, pour avoir augmenté. En fait dans nos systèmes agricoles la fertilité native des sols rend compte actuellement de l'ordre 20 % à 25 % du rendement alors que le génie humain, via les connaissances avérées accumulées et l'énergie injectée, rend compte de 75 % à 80 % des rendements. Dans des situations où l'énergie, autre que solaire, est peu présente, comme dans l'ensemble de l'Afrique tropicale et équatoriale (Buresh *et al.*, 1997) les rendements sont beaucoup plus faibles, et tout particulièrement celui du travail humain ; la contribution de la fertilité « naturelle » au rendement final est plus importante en pourcentage, mais moindre en quantité absolue.

C'est pourquoi l'expression « fertilité du sol », qui a trop tendance à faire oublier que la concrétisation de la fertilité ne peut exister sans l'implication des humains (Fardeau, 1992), alors que leur implication est toujours mise en cause lorsque l'on évoque, dans les salons mondains, la dégradation de cette fertilité (Steiner, 1996), pourrait être remplacée par :

fertilité des agroécosystèmes

Homme agricole – sol cultivé

ou Homme cultivé – sol agricole

ou mieux encore Homme cultivé – sol cultivé

ou bien de fertilité révélée (par l'Homme)

Cette analyse des faits autorise deux commentaires :

- la fertilité basique, native, naturelle d'un sol ne peut être valorisée que par l'homme ;
- la diminution au cours du siècle passé, dans les pays grands utilisateurs d'énergie fossile pour l'agriculture, de la contribution de la force physique humaine dans l'expression de la fertilité d'un sol ne peut se concevoir que dans un système social permettant une utilisation accrue, par les utilisateurs des agroécosystèmes, des connaissances scientifiques relatives au fonctionnement des agroécosystèmes. Cette situation illustre toute l'importance, trop souvent passée sous silence, à la fois de **l'éducation et de la recherche**.

B.4. La fertilité du sol, composante du concept plus large nommé qualité du sol

La définition retenue *in fine* pour la fertilité des sols utilise le terme **qualité** du sol en lieu et place du terme de propriété du sol utilisé précédemment (Doran et Jones, 1999). Ce fait n'est pas innocent. Il ne correspond pas uniquement à un effet de mode médiatique qui conduirait certains d'entre nous à « relooker » des termes anciens sans en modifier pour autant le contenu. Il recouvre une évolution planétaire qui recommande d'examiner simultanément l'ensemble des **fonctions attribuées aux sols**, la fertilité n'étant que l'une des fonctions des sols parmi d'autres. Ces fonctions peuvent être classées en deux grands types (Doran et Safley, 1998) :

- **le premier type est celui des fonctions liées aux activités humaines** (sol milieu supports des routes, des immeubles, etc., sol fournisseur de matériaux, sol de notre histoire archéologique) ;
- **le second type est celui des fonctions écologiques majeures, à savoir le sol :**
 - support et garde-manger pour la production de biomasse végétale (nourriture, fibres, et bientôt énergie) ;
 - réacteur physico-chimique transformant des matières et filtrant l'eau, voire source de pollution pour l'air ;

- milieu vivant chargé de micro et macroorganismes, telles les racines de nos plantes et bien d'autres.

C'est pourquoi **la qualité d'un sol** a été décrite (Doran et Parkin, 1994 ; 1999) comme «**sa capacité à fonctionner, dans le cadre des limites de son agroécosystème, en supportant la production biologique, en maintenant la qualité environnementale, et en favorisant la santé humaine et animale**», c'est-à-dire assurant au mieux l'ensemble des fonctions écologiques.

L'objet du *tableau 1* est de regrouper quelques caractéristiques des sols, souvent accessibles à l'analyse, et de les mettre en relation avec les fonctions écologiques qu'elles influencent. Ce tableau permet d'extraire les critères majeurs impliqués dans la croissance des plantes (zone en grisé), à côté de ceux, déjà signalés, directement liés aux 17 éléments nutritifs qui doivent être transférés du sol à la plante.

Ce tour d'horizon concernant les fonctions écologiques des sols, et tout particulièrement de la fonction support de la production végétale, illustre que nous devons disposer d'indicateurs de la physique, de la chimie et de la biologie des sols. Ces indicateurs auront pour objectif de rendre compte, de la manière la plus synthétique, possible des fertilités physique, chimique et biologique des sols.

II. COMMENT LES PLANTES SE DÉBROUILLENT-ELLES POUR PRÉLEVER LES ÉLÉMENTS DONT ELLES ONT UN STRICT BESOIN ?

Même si la définition retenue pour la fertilité peut faire l'objet de certaines discussions sur le fond en raison de l'indispensable contribution de l'homme au rendement d'une culture, la concrétisation de la fertilité d'un sol repose dans tous les cas sur les possibilités de transfert des éléments nutritifs depuis les constituants des sols jusqu'à la plante ou plus globalement la culture.

Il est donc de première importance d'explicitier les mécanismes de la nutrition des cultures en présence de sol pour espérer disposer des indicateurs les plus performants possibles. On sait depuis Liebig (1855) que la nutrition des plantes a lieu essentiellement sous forme minérale (Barber, 1995). On illustre avec l'élément P les conditions de prélèvement de cet élément dans les sols, avant d'étendre l'information aux autres éléments nutritifs, en précisant certaines spécificités propres à chacun.

A. Prélever des phosphates dans les sols

Le raisonnement repose sur 3 données :

- la plante doit évaporer **au minimum** 300ml d'eau pour fabriquer 1g de matière sèche.

- la matière sèche « normale » contient en moyenne 4mg de P par g de matière sèche.

- la concentration des ions phosphates (probablement la seule forme de P assimilable par les plantes) dans la solution du sol où les racines puissent le phosphore, est de l'ordre de 0.2 mgP par litre de solution de sol pour un sol « normal », moyen, de nos régions.

Ainsi, quand la plante prélève 1 litre de solution du sol pour faire environ 3g de matière sèche, elle va transférer, avec le flux d'eau, environ 0,2mg P qui sont naturellement contenu dans la solution du sol. Dans le même temps, les 3g de MS synthétisés contiennent $3 \times 4 = 12$ mg P alors que le contenu de la solution du sol transférée à travers la plante n'était que 0,2 mgP. Ces faits conduisent à au moins deux observations majeures :

- le contenu instantané de la solution du sol n'explique qu'environ $(0.2/12) 100 = 1,7\%$ du prélèvement. Le complément c'est-à-dire 98.3% provient de ce qui est contenu dans les constituants solides du sol, cette valeur variant de 99.9% à 95% selon les sols. C'est donc de ce constat qu'est née l'envie de chercher, dans les constituants solides des sols, un indicateur des quantités de phosphore qui pourraient être libérées du sol au bénéfice des plantes. Et pour ce faire les chercheurs ont utilisé des méthodes chimiques (extraction), physiques (méthode isotopique et électro-ultra-filtration) et biologiques (cultures standard, voire enzymologie.) pour tenter d'approcher les quantités libérables du sol.

- les ions phosphate pénètrent plus vite dans la racine que l'eau puisque le transfert de l'eau n'explique que 0.1% à 5% des quantités de P entrées dans la plante. Il existe donc dans la racine de la plante (de toutes les plantes) un mécanisme actif favorisant sélectivement l'entrée des ions phosphate dans la plante.

B. Prélever les autres éléments

Ce même type de calcul entrepris pour les autres éléments majeurs démontre que le transfert avec l'eau de transpiration explique environ 30% de l'entrée de K, 30 à 40% de l'entrée de N, et expliquerait dans de nombreux cas une entrée de 150 à 200% du Ca effectivement présent dans la plante. Il existe donc aussi pour l'élément Ca un mécanisme actif, mais là de ré-excrétion du Ca à partir de la racine.

NB. On pourrait peut-être éviter, en parlant des cultures, d'employer le terme «satisfaire leurs besoins» à connotation très anthropomorphe ! Cependant signalons ici que, à la différence des humains qui pour «satisfaire leurs besoins» rejettent dans leur milieu pas mal de matières organiques, les plantes, pour cette noble fonction, rejettent O₂ (photosynthèse), CO₂ (respiration) et H₂O (transpiration). Eh oui ! les plantes pompent du minéral et rejettent du minéral ; elles synthétisent leur matière organique (et la notre!) que les microorganismes du sol s'empressent de retransformer en minéral ! Que serions-nous sans elles et sans eux ! Des moins que rien !

Tableau 1 - Quelques relations entre une caractéristique de la terre et des propriétés fonctionnelles des sols, en particulier celles directement en prise avec la fonction de production végétale, donc dans l'expression de la fertilité native du sol.

Table 1 - Some relations between earth characteristics and functional soil properties, mainly focused on productivity.

Propriétés des écosystèmes		Fonctions écologiques du sol						Influence la santé humaine
		Modification la composition de l'eau et de l'air			Support de la production végétale et animale			
Caractéristiques sol	Facteurs de l'agrosystème sous influence de la caractéristique sol	Eau de profondeur	Eau de surface	Air	Résistance à l'érosion	Favorise la plante	Favorise l'animal	
Propriétés physiques du sol								
Texture (argile, limon, sable)	Eléments nutritifs	X	X	X		X		
	Circulation de l'eau	X	X	X	X	X	X	
	Eléments toxiques	X	X	X		X		
	Développement des pathogènes	X	X			X		
	Développement des racines					X		
	Stabilité structurale		X	X	X			
Densité volumique (Bulk density)	Circulation de l'eau	X	X		X	X		
	Développement racinaire					X		
Infiltration	Eléments nutritifs					X		
	Circulation eau	X	X		X	X		
	Développement racinaire					X		
Capacité de rétention eau	Circulation eau	X	X	X	X	X		
	Développement racinaire					X		
Propriétés chimiques du sol								
Matière organique	Eléments nutritifs	X	X	X		X		
	Circulation eau	X	X		X	X		
	Eléments toxiques					X		
	Stabilité structurale		X		X			
	Esthétique des lieux							X
Conductivité électrique	Nutrition minérale	X	X	X		X	X	X
	Toxicité	X	X		X			
CEC	Nutrition minérale		X			X		
pH	Nutrition minérale	X	X	X		X		X
	Toxicité Al- Mn					X	X	X
N	Total	X	X			X		
	NO ₃	X	X			X		
	NH ₄		X	X		X		
P (extrait)	Nutrition minérale		X			X		
K (extrait)	Nutrition minérale	X	X			X		
Oligo (extrait)	Nutrition minérale					X	X(Se)	
Propriétés biologiques								
Biomasse microbienne C	Eléments nutritifs	X	X			X		
Biomasse microbienne N	Eléments nutritifs	X	X			X		
N minéralisé	Nutrition minérale N	X	X			X		
« Respiration » du sol	Eléments nutritifs	X	X			X		
Activités enzymatiques	Eléments nutritifs		X			X		

III. DES INDICATEURS DES FERTILITÉS DES SOLS, OU TROP SOUVENT SEULEMENT DES ÉCHANTILLONS DE TERRES TRANSMIS AUX LABORATOIRES D'ANALYSE

A l'occasion d'un colloque récent du GEMAS-COMIFER qui traitait des thèmes associés «Les fertilités des sols et les systèmes de cultures» le président du GEMAS, Lucien Faedy (2003) estimait que «la fertilité d'un sol était la somme des fertilités, par ordre alphabétique, biologique, chimique et physique». La fertilité globale d'un sol est plus probablement le résultat des interactions entre ces différentes fertilités que la somme de ces fertilités. On est même en droit d'imaginer, en reprenant à notre compte le concept du tonneau de Liebig, que le rendement sera contrôlé par la caractéristique de fertilité qui sera le premier facteur limitant du rendement. Dans la mesure où, selon Trochery, les indicateurs sont élaborés en vue d'une action, on est en droit de soutenir qu'il ne sert à rien de mettre au top une des fertilités si une autre, et une seule, est défaillante ! D'où la nécessité de toujours chercher à mettre en œuvre les moyens les plus performants possibles pour connaître qu'elle est, dans le contexte agropédologique choisi, la fertilité la plus défaillante dans l'agrosystème puis imaginer d'y porter remède directement, voire en biaisant chaque fois que cette pratique est possible.

C'est pourquoi, en revenant à la définition choisie pour la fertilité d'un sol, la question que doit se poser le conseiller, l'agriculteur, doit toujours être la même :

Quelle est donc ici, dans ma parcelle, la caractéristique sol qui sera la plus contraignante pour la fourniture aux cultures, en quantité adéquates et équilibrées, des éléments nutritifs? L'indicateur utilisé sera-t-il un outil efficace non seulement pour répondre à la question posée, mais aussi pour pouvoir agir pour réduire la contrainte ?

C'est pourquoi, nous abordons ici d'abord les indicateurs relatifs aux éléments eux-mêmes, examinés sous leur angle «chimie» puis les indicateurs relatifs aux conditions générales du transfert des éléments vers la plante et qui dépendent de la physique du sol et des organismes vivants du sol autres que les racines.

A. Quelques indicateurs «chimiques» des sols.

Sauf exception, l'indicateur «quantité totale d'un élément dans un échantillon de terre» ne présente aucun

intérêt en terme informatif sur les potentialités de transfert du sol à la plante. Il ne peut être retenu comme indicateur de la fertilité d'une terre pour les éléments nutritifs ni comme indicateur certain de toxicité pour les éléments trace potentiellement toxiques. Cet indicateur est au mieux une information sur l'origine géologique et/ou pédologique de l'échantillon de terre !

A.1. Indicateurs concernant les éléments minéraux nutritifs ou potentiellement toxiques.

1. Un exemple emblématique : le cas du phosphore et de ses indicateurs utilisés en France.

Découvert vers 1669 par Brandt alors qu'il recherchait la pierre philosophale dans l'urine humaine, le phosphore, élément diabolique entre tous (Emsley, 2000), est apparu très tôt en chimie agricole. Au début nul ne connaissait les mécanismes intimes de son action sur les plantes, est apparu comme un élément clé de la réussite des cultures, à tel point que l'on est même allé jusqu'à vider des cimetières de leurs os, constitués majoritairement d'apatites (phosphates tricalciques insolubles dans l'eau), pour les plonger dans l'acide sulfurique afin d'en faire du superphosphate simple (phosphate monocalcique soluble dans l'eau).

Daubeny, qui avait acquis la certitude que : (i) les plantes ne trouvaient pas uniquement dans les solutions de sol les phosphates qu'elles prélevaient ; (ii) les racines, en respirant, dégageaient comme nous du CO₂, a tenté, et réussi, dès 1845 à extraire des terres avec de l'eau chargée de CO₂, c'est-à-dire avec de l'acide carbonique, des phosphates et du potassium, puis à les quantifier. Nous étions là en présence d'indicateurs P et pour K typiquement reliés à un mécanisme vital, la respiration, existant au sein de tous les agroécosystèmes, comme l'ont recommandé Doran et Safley (1998). Et ce type d'extraction continue d'être utilisé en Suisse sous le nom de méthode Dirks Scheffer. Mais la difficulté technique rencontrée pour maintenir constante la teneur du CO₂ dans sa solution d'extraction a poussé le célèbre Bernard Dyer, qui fréquentait peut-être moins les bistrotts que Daubeny pour y trouver de l'eau de Seltz, à troquer en 1894 l'acide carbonique par de l'acide citrique, substance effectivement contenue dans des racines de crucifères, mais non excrétée dans le milieu sol, et surtout beaucoup plus acide et plus chélatante que l'acide carbonique. Cet extractant est, comme chacun sait, toujours utilisé en France, et uniquement en France.

Puis de très nombreuses solutions destinées à extraire des phosphates des terres se sont succédées à travers la planète au point qu'il en existe en moyenne deux par pays. Certaines ont donné des informations tellement décalées par rapport à l'observation des faits qu'une méthode a même changé de nom au décès d'un des chimistes qui l'avait proposé. Ainsi l'extractant

nommé Barbier-Morgan est devenu l'extractant Morgan à la mort de Morgan.

La méthode Joret-Hébert, à savoir l'utilisation d'une solution aqueuse 0.2 M d'oxalate d'ammonium dont le pH est voisin de 7, est apparue en France en 1954. L'objectif de cette méthode n'était plus de simuler l'action des racines dans le sol (les racines ne rejettent jamais de l'oxalate d'ammonium à pH 7 dans le milieu) mais celui d'assurer la mise en solution des ions phosphate contenus dans des composés calciques, essentiellement des carbonates : l'oxalate d'ammonium mis au contact des composés calciques devient de l'oxalate de calcium qui précipite dans le milieu réactionnel, ce qui favorise, en raison de la loi d'action de masse, la poursuite de la dissolution des composés calciques des sols. Cette réaction chimique, en dissolvant des composés calciques, libère en conséquence dans la solution, les ions phosphate contenus dans les composés calciques.

L'indicateur quantité de phosphate extraite par la méthode Joret-Hébert apparaît donc plus comme un réactif capable de caractériser la stabilité de composés calciques, autres que les phosphates, que celle des composés phosphatés, même calciques. De plus cette analyse illustre que cette méthode sera inopérante dans les sols basiques mais non calciques.

Comme l'a rappelé avec beaucoup d'à propos Lucien Faedy (2003) l'utilisation fonctionnelle d'un indicateur, à vocation de conseils, impose de disposer d'un référentiel renseignant sur l'action à conduire lorsque l'indicateur atteint telle ou telle valeur. En clair, dans notre situation : le sol est-il en mesure d'assurer seul la fourniture de phosphore aux plantes ou bien faut-il apporter un engrais à la culture à mettre en place et si oui en quelle quantité apporter cet engrais ?

L'établissement d'un référentiel repose, dans tous les cas concernant les éléments nutritifs, sur l'établissement de relations statistiques entre le comportement, et principalement le rendement avec et sans apports d'engrais phosphaté, d'une culture et la quantité de phosphore extraite par le réactif dans le traitement sans apport d'engrais. Dans le cas de la méthode Joret-Hébert, le référentiel a été établi en pots de culture conduits en serre. Puis les relations obtenues ont été transposées aux conditions de champ, probablement sans hésitation car elles favorisaient des apports d'engrais importants, et en tous les cas bien supérieurs aux exportations prévisibles des cultures à venir, une situation qui s'accordait assez bien avec la foireuse théorie de la vieille grasse, c'est-à-dire une hypothèse qui ne reposait sur aucune base conceptuelle et mécaniste avérée.

Or cette transposition pot de culture à plein champ présente un biais sévère par rapport aux conditions d'utilisation de relations statistiques. En effet nul ne peut transposer une information glanée dans une situation à une autre situation que s'il a pris la précaution de vérifier que les systèmes étudiés sont de même nature. Or, dans ce cas précis, on est en droit d'affirmer que les conditions de pots de culture sont significativement différentes de celles de

plein champ. Les pots de culture exacerbent les différences de rendement. Le référentiel devait être établi au champ et non en serre. C'est ce fait qui explique, pour l'essentiel, que les valeurs de seuil conduisant à des apports de P sur les cultures aient largement décru lorsque le groupe PK du COMIFER analysa nombre de résultats de plein champ provenant de dispositifs très bien contrôlés et de longue durée (Boniface et Trocmé, 1988).

A peu près à l'époque où Joret et Hébert lançaient leur méthode, Olsen et de nombreux collaborateurs (1954) proposaient d'utiliser une solution de bicarbonate de sodium 0.5 M à pH 8.5 pour extraire le phosphore. Ce faisant, ils revenaient, sans le signaler d'ailleurs, à l'idée de Daubeny qui faisait de HCO_3^- un acteur majeur du fonctionnement des racines. Cependant ils en augmentent la concentration et stabilisent le pH à un niveau peut-être un peu élevé. Le résultat est cependant là : le référentiel proposé, et surtout adapté à chaque condition locale, a eu pour conséquence une diminution des recommandations de fertilisation phosphatée préalablement peu adaptées et trop souvent excessives. Les résultats obtenus avec cette méthode, et adaptés à nos conditions (Morel *et al.*, 1992), ne peuvent que conduire, tout un chacun, à faire appel, pour des sols dont le pH est supérieur à 6.1, 6.2, aux quantités de phosphore extraites par la **méthode Olsen** comme **indicateur de routine le plus susceptible de renseigner sur une éventuelle contrainte P originnaire du sol pour satisfaire la demande végétale** (Fardeau *et al.*, 1988).

Compte tenu de la méthode d'obtention (avec et sans engrais) de ce type de référentiel et du fait que le rendement d'une culture dépend actuellement, dans notre pays, essentiellement majoritairement de la quantité d'énergie qui lui est fournie de l'extérieur par l'agriculteur, le référentiel est bien plus informatif des **rendements** des différentes cultures avec fertilisation que des **quantités de phosphore** que les plantes sont capables d'extraire du sol pendant leur croissance en l'absence d'engrais phosphatés. Il ne peut être que le référentiel du phosphore prélevé avec certitude dans les situations où la quantité d'énergie fournie au système serait de l'ordre de grandeur de celle effectivement apportée à l'occasion de l'établissement du référentiel. En conséquence il serait raisonnable que ce type de référentiel ne soit pas utilisé dans des situations où les apports d'énergie de toute nature (engrais, pesticides, irrigation, labour...) seraient significativement différents. Force est bien de constater que personne procède à de telles vérifications avant emploi des référentiels.

Que retenir de l'aventure plus que centenaire de la quête à **l'indicateur miracle** qui permettrait de prévoir les propriétés des terres à libérer leurs ions au bénéfice de ces grandes gourmandes que sont les plantes, ces accumulateurs, voire hyperaccumulateurs, de phosphore ?

1 - L'indicateur «**quantité de P extraite**» par différents réactifs est certainement un progrès par rapport à la seule observation des rendements des cultures.

- 2 - La quantité de P extraite d'une terre dépend de l'agressivité chimique du réactif. C'est pourquoi le seul qualificatif qu'il est possible d'utiliser pour ce type d'approche est «**P extrait par la méthode X**» et non P assimilable ou P phytodisponible que seule la plante est actuellement en mesure de réellement révéler, la hiérarchisation des mécanismes intimes en jeu n'étant que rarement explicitée. La quantité extraite diminue lorsque l'agressivité du réactif diminue pour simuler le milieu racinaire, ce qui peut poser, dans certains cas, en analyse de routine (et non pas en analyse recherche), des problèmes de dosage dans les solutions d'extraction.
- 3 - Le premier facteur explicatif du prélèvement de phosphore, comme celui de très nombreux autres éléments que ceux-ci soient nutritifs ou potentiellement toxiques, est la concentration des ions phosphates (ou des autres éléments) dans la solution du sol qui est la source première des ions prélevés (Barber, 1995). Il serait donc souhaitable de disposer d'une quantification directe de cette concentration. Mais les difficultés rencontrées pour le dosage des quantités extraites des terres par des solutions de sol, ainsi que les interférences possibles avec des argiles omniprésentes dans un laboratoire d'analyse de routine, sont des contraintes fortes difficiles à dépasser.
- 4 - La nutrition des plantes est un processus qui dépend du temps. La plante ne croit pas d'un seul coup, instantanément. L'indicateur actuel quantité extraite ne permet pas de **rendre compte de la cinétique de libération des ions phosphate**.
- 5 - C'est pourquoi des chercheurs ont imaginé des protocoles expérimentaux faisant appel à des extractions séquentielles susceptibles de renseigner sur les cinétiques de libération. Le principe implicite est que les fractions extraites avec les réactifs les moins agressifs (qui, pour coller à un anthropomorphisme rampant, sont forcément tendres !!) seraient les plus disponibles pour les plantes. La première méthode vulgarisée avec ce type d'approche a été la méthode Chang et Jackson (1954). Son objectif était de fractionner le phosphore du sol en phosphore adsorbé, lié à l'aluminium, lié au fer, lié au calcium, pour aboutir à une dernière fraction notée phosphore résiduel ou récalcitrant. Des chercheurs se sont assez rapidement rendus compte que chacune de ces fractions contenait des formes plus ou moins assimilables par les cultures et que cette approche n'était pas une approche agronomique fonctionnelle. Depuis cette époque, d'autres extractions séquentielles ont été proposées, en particulier par des chercheurs canadiens. Le principe est invariant : les fractions extraites les premières seraient les plus phytodisponibles.
- 6 - Lorsque la plante prélève dans la solution du sol, celle-ci s'épuise très vite en ions phosphate puisque les quantités présentes dans la solution du sol à un instant donné ne représentent que de 0.1% à 5% des quantités prélevées. Les ions phosphates de la solution sont renouvelés par des ions mobiles présents en phase solide. Et *in fine* c'est cette vitesse de transfert des ions, depuis les constituants des terres jusqu'à leur solution où évoluent et puisent les racines, qui va contrôler l'importance des prélèvements de P durant la période de croissance de la plante.
- 7 - Des méthodes développées par la recherche pour apprécier ces cinétiques, et leurs modifications, en fonction de différentes pratiques culturales existent. Il s'agit en particulier de la **méthode dite des échanges isotopiques ou dite de dilution isotopique** qui permet de rendre compte de l'effet temps, de l'effet concentration, etc.... La supériorité de cette méthode comme indicateur des propriétés des phosphates dans les terres a deux causes.
- * Tout d'abord, à la différence de toutes les méthodes d'extraction chimique, séquentielles ou non, dont l'objet est de dissoudre des constituants des sols contenant des phosphates et de libérer les phosphates qui y sont présents, la méthode des cinétiques d'échanges isotopiques renseigne sur la mobilité des ions sans avoir à les déloger de leurs sites d'accueil.
 - * Ensuite, comme son nom l'indique et comme le permet la technique, cette méthode permet de quantifier des quantités d'ions capables de quitter, au cours du temps et par unité de temps, les phases solides des sols pour rejoindre la solution du sol. Cette information peut ultérieurement être comparée aux cinétiques de prélèvement par les cultures. Il est apparu que ces cinétiques sont très dépendantes de la répartition, entre la phase solide et la phase liquide des terres, des formes mobiles, en quelque sorte le pouvoir tampon du sol. Cette approche isotopique, très performante, est actuellement onéreuse et peut-être peu transposable en analyse de routine. C'est donc par le biais de fonctions de pédotransfert que pourrait peut-être un jour être résolu le problème de l'estimation des cinétiques de libération des ions phosphates assimilables. De telles fonctions de pédotransfert devraient prendre en compte simultanément des quantités extraites par un réactif guère plus agressif que les racines des cultures et surtout un pouvoir tampon du sol pour les ions phosphates. Ce concept de pouvoir tampon est absolument universel puisqu'on le retrouve aussi bien sur des échantillons issus de mars (Mautner et Sinaj, 2002) que sur les échantillons rapportés de la lune (Ming et Henninger, 1989)
- 8 - Retour sur la méthode Olsen. L'analyse détaillée des cinétiques d'extraction des phosphates par le bicarbonate de sodium selon Olsen (non prévue dans la méthode originale et celle couramment utilisée et normalisée) illustre que la donnée quantitative Olsen est en fait un véritable indicateur au sens de Trochery (2003) puisqu'il contient au moins deux informations (pour parties cachées). Il apparaît qu'en cours d'extraction des phosphates sont bien extraits mais qu'une fraction des phosphates est réadsorbée sur les constituants des sols, illustrant pour partie le pouvoir tampon du sol : le résultat de l'extraction Olsen est donc une information complexe

puisqu'elle est le résultat de deux processus opposés : une dissolution et une réadsorption.

En conclusion, les connaissances scientifiques grandissant, les outils analytiques progressant et bénéficiant pour partie du progrès des connaissances, l'indicateur « phosphate extrait des terres » imaginé pour renseigner sur le phosphore phytodisponible, évoluera encore ! comme bien d'autres indicateurs analysés en routine. La démarche proposée, quantité extraite et pouvoir tampon, devrait alors être étendue à tous les éléments dont le destin est majoritairement sous le contrôle de mécanismes physico-chimiques. Seuls échapperaient alors à cette approche générale l'azote et le soufre dont le destin est sous la dépendance de processus biologiques séquentiels sur lesquels l'Homme, même celui de science n'a aucune maîtrise à l'échelle du champ, la seule de produire de la nourriture pour tous.

2. Indicateurs concernant d'autres éléments nutritifs majeurs.

Potassium

Le principe le plus souvent retenu pour examiner la taille pool d'ions K du sol qui pourraient nourrir la plante est différent de celui utilisé pour les phosphates. Il s'agit dans le cas de K, et de celui de bien des cations, de faire « sortir » les cations K^+ de leurs « caches » situées sur ou dans les constituants du sol avec d'autres cations, le plus souvent de l'ammonium NH_4^+ (Bosc, 1988). Cette méthode techniquement simple, donc bon marché, autorise l'obtention de résultats très reproductibles. Il s'agit là d'une approche un peu discutable en terme de rapport avec le prélèvement par les plantes, car les plantes n'apportent pas de cations en quantité significative aux terres. Le potassium ainsi extrait est du potassium échangeable contre l'ion ammonium et ne devrait en aucun cas être appelé potassium assimilable. De plus, comme pour les phosphates, rien dans cette méthode ne renseigne sur les vitesses de transfert des constituants solides des sols jusqu'à la racine.

Azote.

Chacun connaît les méfaits de l'azote décuplés par le piège de la sécheresse. Et tout un chacun connaît les déterminations d'azote nitrique et/ou ammoniacal en sortie d'hiver sur des échantillons de terre effectuées pour décider du niveau de fumure azotée en sortie d'hiver. Ces déterminations sont bien des indicateurs de fertilité au sens de Trochery (2003) puisque la valeur de l'indicateur conduit à une action de fertilisation azotée. Mais cet indicateur à un côté très éphémère. Car chacun sait que ces formes minérales d'azote ne sont que 1 à 2% de l'azote total du sol et que ce type de mesure ne fournit aucune indication sur le futur de la nutrition azotée dès lors que le stock minéral mesuré aura été prélevé par la culture.

L'azote des sols est essentiellement sous des formes organiques dont la transformation en formes minérales (NH_4^+

et NO_3^-) est sous la dépendance du fonctionnement de micro-organismes du sol. C'est pourquoi ont été développées des méthodes d'incubation des terres qui permettant de déterminer les quantités d'azote qui seront minéralisées si les conditions climatiques (et agronomiques) du champ sont identiques à celles du laboratoire d'analyse. Les limites de telles mesures sont assez évidentes, mais cette approche permet cependant de fournir une valeur par excès des quantités d'azote susceptibles d'apparaître sous forme minérale dans le profil.

3. Indicateurs concernant les oligo éléments et les éléments trace potentiellement toxiques (ajoutés et naturels tel Al)

Oligoéléments

Les indicateurs concernant l'éventuelle possibilité de transfert vers la plante des oligo-éléments, à l'exception du bore extrait à l'eau chaude (méthode conseillée par le Vatican pour d'autres objectifs), sont des quantités extraites par des réactifs généralement chélatant les cations (Lebourg *et al.*, 1996). Pour les oligoéléments on utilise deux seuils pour fixer l'action d'apport ou de non apport. L'un, le plus faible, correspond à la valeur inférieure au-dessous de laquelle on est certain que tout apport, effectué au bon moment, sous la « bonne forme » physique et/ou chimique aura pour conséquence un accroissement des prélèvements donc des rendements chaque fois que ce facteur sera le premier des facteurs limitants. L'autre, le plus élevé, correspond à la situation au-delà de laquelle tout apport supplémentaire n'aura aucun effet sur les rendements, voire conduit, pour certains des oligo-éléments, à une situation de toxicité.

Éléments traces potentiellement polluants

La présence de ces éléments est synonyme de risque de diminution de la fertilité d'un sol. Les indicateurs utilisés pour estimer les risques de transfert vers les plantes des éléments trace potentiellement toxiques (abusivement appelés à tort éléments trace métalliques certains, comme l'arsenic, étant franchement des métalloïdes) sont estimés via les mêmes techniques que celles employées pour les oligoéléments nutritifs. La différence entre ces deux catégories tient essentiellement au référentiel utilisé. Pour les éléments trace non indispensables aux cultures, et comportant des risques de toxicité, car certains éléments en trace sont « transparents » par rapport aux processus vitaux, il est recommandé d'établir 3 seuils (Sterckeman et Fismes, 2005).

1. Le premier, le plus bas, est le **seuil d'alerte**. Il correspond au fond pédogéochimique, ou bruit de fond de la zone.
2. Le second est le **seuil d'investigation**. Il devrait être déclenché chaque fois que le seuil d'alerte est significativement dépassé.
3. Enfin le troisième est le **seuil d'assainissement**. Il devrait être déclenché chaque fois que la teneur de l'élément trace dans le sol induit une toxicité chez les végétaux et/ou fait courir un risque aux consommateurs des produits agricoles alors

qu'il peut ne pas entraîner d'effet toxique pour la croissance végétale.

A.2. Indicateurs concernant la (ou les) matières organiques !

La matière organique, parce qu'elle est notre substance même, et qu'elle est de surcroît la preuve de la vie lorsque cette matière organique restée organisée, est historiquement mythique. Nombreux sont ceux qui se préoccupent (en pensée) de la diminution de sa teneur dans l'horizon supérieur des sols. A ce titre, certains soutiennent qu'elle possède toutes les propriétés, et surtout les meilleures et qu'elle devrait être l'unique source de restitution de matières fertilisantes aux sols!

Sa présence, comme son absence, ont des conséquences environnementales et agronomiques multiples, physiques (Decoopman, 2003), chimiques et biologiques sur les sols et les agrosystèmes (Brady & Weil, 1994 ; Balesdent *et al.*, 2000). Cette multiplicité d'actions (Brady et Weil, 1994), pour ne pas dire cette duplicité, ne rend pas aisée notre examen, et surtout le jugement que l'on serait en droit de porter sur ces constituants. Et en raison de cette multiplicité de fonctions agronomiques, souvent interactives et parfois à effet contraire au regard de la fertilité, il s'agit probablement du constituant pour lequel on se doit, avant de chercher à utiliser un indicateur de la matière organique, de parfaitement définir la cible visée (chimie du sol, physique du sol, biologie du sol). Que veut-on savoir exactement dans l'échantillon de sol sous examen ? On sait depuis longtemps, par exemple, que l'approche à coup de PAF (perte au feu), qui donne une quantité approchée de la matière organique, n'est pratiquement informative d'aucune caractéristique d'intérêt agronomique.

Les constituants organiques des sols ont été longtemps déterminés en faisant appel à la chimie d'extraction avec des solutés dont on pensait que l'agressivité croissante était en mesure de rendre compte de la plus ou moins grande résistance des molécules aux dégradations biophysicochimiques. Cette philosophie semble de plus en plus remise en cause avec l'arrivée d'outils de la physique, telle la RMN, utilisée pour suivre les évolutions des structures moléculaires des matières organiques des sols (Parnaudeau, 2004).

La quantité de matières organiques contenue dans nos sols est globalement 3 fois plus importante que celle présente au-dessus du sol. Et en ce sens le « stockage » de la matière organique dans les sols, sa séquestration (Arrouays *et al.*, 2002a ; 2002b ; Balesdent *et al.*, 2005), peuvent avoir à terme un effet significatif sur l'évolution de l'effet de serre. C'est un de rares cas où l'approche PAF peut être indicative lorsqu'elle est pratiquée à quelques années de distance!

B. Indicateurs physico-chimiques

Il s'agit en fait d'indicateurs quantifiant des propriétés des sols représentatifs de certains des états chimiques des terres,

et surtout de leurs phases liquides, dont les déterminations sont effectuées en mettant en œuvre des méthodes de la physique.

B.1. pH

Chacun connaît cette donnée a pour objet de quantifier la concentration des ions H⁺ dans les solutions de sol. On peut déterminer en fait deux pH pour chaque échantillon de terre : l'un dans l'eau, l'autre dans KCl M (Baize, 1988). Le premier nous renseigne sur l'acidité effective de la solution ; le second a pour objectif est de déloger les ions H⁺ de la CEC, renseigne sur l'acidité potentielle.

B.2. Capacité d'échange de cations (CEC)

Cet indicateur procure une représentation d'une propriété essentielle des terres qui contribue à leur procurer une partie de leur valeur fonctionnelle intrinsèque. Cet indicateur doit représenter l'aptitude de la phase solide à faire passer depuis les constituants solides des terres, en particulier les argiles minéralogiques mais pas uniquement elles, jusqu'à la solution du sol, certains cations en particulier ceux directement impliqués dans la nutrition des plantes. Cette propriété, qui représente en fait une propriété fonctionnelle, illustre à la fois la fonction de garde-manger pour les plantes et un réservoir jouant un rôle majeur en tant que pouvoir tampon de la pression osmotique entre le milieu extérieur et les cellules des racines.

B.3. Conductivité électrique

Les sols nous apparaissent d'abord comme des phases solides, signifiant par là même que, durant la pédogénèse ces phases ne se dissolvent pas aisément ou bien que certaines se recréent. Néanmoins les solutions de sol contiennent toutes des ions en solution, et ce sont ces ions en solution qui assurent la nutrition minérale des plantes. Lorsque la concentration ionique en solution dépasse une certaine valeur les plantes subiront « un effet de sel », en clair ne seront plus en mesure de contrôler la pression osmotique au sein de leurs cellules qui gonfleront ou se dessècheront puis dépériront. Il s'agit bien en fait de constituants chimiques présents dans la solution mais la présence dans la solution du sol est mesurée au moyen d'une mesure physique : la conductivité électrique de la solution. Cette caractéristique présente un intérêt dans au moins deux situations : les sols salins, essentiellement sodiques en France, et les supports de culture dont les CEC sont souvent peu importantes et ne permettent pas « d'éponger », c'est-à-dire de tamponner, des ions en excès (par rapport aux risques de stress osmotiques pour les cultures). On admet qu'au-delà de 80 mS cm⁻¹ les plantes commencent à souffrir et qu'au-delà de 160 mS cm⁻¹ seules des plantes adaptées à des milieux salins, telles les halophytes, sont capables de se développer.

C. Quelques indicateurs descriptifs des états physiques des sols influençant la fertilité visible des sols

Rappelons ici qu'un sol est une association de trois phases : du solide représentant de l'ordre de 65 à 70 % (les particules de sol), du liquide correspondant à 25 à 30 % (l'eau et ses éléments dissous) et des gaz dont la présence représente de l'ordre de 5 à 10 %. La partie solide n'est pas un continuum de matériel solide. Il s'agit en fait d'une matrice contenant les deux autres phases (air et eau) susceptibles de se déplacer au sein des particules, et ce avec des contraintes limitées. Le sol est donc finalement un ensemble physiquement organisé dont la structure ne doit pas être trop maltraitée pour autoriser la circulation de l'eau et des gaz.

De très nombreuses caractéristiques descriptives des états physiques des sols sont susceptibles d'influencer le transfert des éléments nutritifs depuis le sol jusqu'aux plantes, c'est-à-dire d'être, in fine, des indicateurs de fertilité dès lors qu'ils sont quantifiables.

Certaines propriétés, et leurs indicateurs, sont propres aux constituants des sols, à la terre *sensu stricto*, d'autres sont relatives aux propriétés du sol vis-à-vis de l'eau (Arshad *et al.*, 1996).

C.1. Indicateurs sol *sensu stricto*

Texture du sol.

Tout un chacun connaît le triangle de texture (argile, limon, sable). Il est certainement la seule caractéristique sol universellement admise et utilisée ! Il s'agit aussi de la caractéristique la plus stable d'un sol. Elle est déterminée soit par méthode pifométrique (un peu la technique du doigt mouillé) soit par une technique quantifiant l'information relative à la vitesse, donc au temps, de descente des particules dans de l'eau lequel est sous la dépendance de la loi de Stokes.

Cette méthode, quoique universelle, n'est pas sans poser quelques problèmes en raison de l'ambiguïté liée à l'utilisation du terme argile (ou clay en anglais) pour désigner, dans le cadre de la caractérisation de la texture des sols, les particules inférieures à 2 µm. Or le terme argile désigne aussi des structures bien précises, bien cristallisées et possédant vis-à-vis des cations dont K, des propriétés précises, propriétés qui ne sont pas celles de toutes les particules dont la seule caractéristique est, ici dans le cadre de la définition de la texture, d'être inférieure à 2 µm.

Densité volumique, DV.

Il s'agit de la masse de terre par unité de volume. Elle est exprimée en g cm⁻³. Cet indicateur varie avec les pratiques conduisant aux compressions de toutes natures, tels le piétinement animal ou le passage des engins lourds dans des

conditions d'humidité favorisant la compaction. Il s'agit d'abord d'un indicateur de compaction des terres, l'accroissement de la compaction limitant les possibilités de pénétration et de développement des racines, donc des transferts des sols aux plantes.

Porosité, P, et pourcentage des pores occupés par l'eau et/ou par des gaz.

La porosité P correspond au volume des pores présents dans un volume de terre donné. Ces pores peuvent être remplis par des gaz (air c'est-à-dire N₂ et O₂, mais aussi CO₂, voire N₂O dans des conditions réductrices) et/ou de l'eau. Elle est exprimée en cm³ cm⁻³. Elle calculée à partir de la densité volumique (DV) et de la densité des particules (DP) constitutives des terres qui est généralement considérée comme égale à 2,65 g cm⁻³. P, lorsqu'elle est exprimée en %, a pour valeur :

$$P = [1 - DV/DP] 100$$

Le pourcentage de pores occupés par des gaz se déduit de la densité volumique et de la teneur en eau. La teneur en eau étant très variable au cours du temps, le pourcentage est aussi très variable.

Structure du sol et agrégation des particules.

Un agrégat peut être défini comme un groupe de deux, ou très souvent bien plus, particules élémentaires qui sont liées en formant une unité dont la résistance est supérieure à celle des particules séparées constituant l'agrégat. Accroître l'agrégation des particules augmente la porosité, particulièrement les macropores qui favorisent l'infiltration et la circulation de l'air, donc le développement des racines. Cette caractéristique est essentiellement déterminée par la méthode du tamisage humide (Le Bissonnais *et al.*, 2003).

Résistance à la pénétration. Cette caractéristique est un indicateur de possibilité de croissance des racines. Elle dépend évidemment de la teneur en eau qui doit obligatoirement être connue pour interpréter les informations. Cette résistance est mesurée avec un pénétromètre, mais cet outil ne possède pas encore une forme normalisée et admise par tous. C'est une caractéristique qui peut varier pour un sol donné d'un facteur # 1000 (0.01 Mpa à 8 Mpa avec MPa = 10 bars). La pénétration des racines, donc leur développement, est significativement réduite à partir de pression voisine de 1.5 MPa. Une telle contrainte limite d'abord le prélèvement des éléments les moins mobiles dans le sol pour lesquels la part du prélèvement actif par rapport au prélèvement passif par entraînement avec l'eau de transpiration est toujours supérieure à 90 % du prélèvement total.

Profondeur d'enracinement.

Cette profondeur influence deux facteurs impliqués dans le prélèvement des éléments nutritifs. Il s'agit d'une part de

la quantité d'eau disponible dans l'horizon susceptible d'être exploré par les racines et d'autre part de la quantité d'éléments nutritifs disponibles. Cette profondeur d'enracinement est terriblement dépendante des pratiques agricoles.

C.2. Indicateurs quantifiant de l'état de l'eau dans le milieu poreux sol

Indicateur d'état : la teneur en eau d'une terre

La teneur en eau est un paramètre essentiellement variable au cours du temps contrôlé par les pluies, l'évapotranspiration, l'irrigation et les conditions de circulation de l'eau dans le profil.

Indicateur d'état potentiel : la capacité de rétention au champ

Il s'agit de la quantité d'eau qui peut être retenue par une terre menée à saturation puis laissée sous drainage naturel. La transposition au champ correspond à l'eau retenue pour des tensions comprises selon les sols entre 10 à 33 kPa. Le point de flétrissement permanent est une donnée associée. Il correspond à la quantité d'eau retenue par un sol en dessous de laquelle les plantes ne peuvent plus extraire suffisamment d'eau pour maintenir leur évapotranspiration. Il correspond à une tension de l'ordre de 1500 kPa. La quantité d'eau contenue par le sol entre la capacité de rétention et le point de flétrissement représente *de facto* l'eau disponible pour la plante (Bruand *et al.*, 2003).

Indicateur de mobilité de l'eau : Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique, K, est la quantification de la vitesse de déplacement de l'eau dans le profil. Cet indicateur influe sur de nombreux facteurs impliqués dans la fertilité effective d'un sol, tels l'infiltration, le drainage, l'hydromorphie, le flux de solutés dans le profil...

D. Quelques indicateurs biologiques.

Ambiguïté de la signification de ce type de donnée au regard des fonctions assurées

Les indicateurs les plus souvent évoqués *dans la littérature française* pour caractériser les biomasses telluriques sont principalement les vers de terre et la biomasse microbienne.

Les organismes vivants d'une terre sont fréquemment classés par leur taille (Blair *et al.*, 1996) une caractéristique qui n'a que rarement significativement reliée à une fonction écologique. C'est ainsi que l'on trouve des spécialistes pointus de :

- la microflore et microfaune (bactéries, champignons, nématodes...) de 0,05 µm à 100 µm ;

* la mésofaune (Acariens, collemboles, Araignées...) de 100 µm à 2 mm ;

* la macro et la méga faune (vers de terre, mollusques, taupes, lapins...) >2 mm et >20 mm ;

mais rarement des généralistes prenant en considération, dans chaque écosystème, l'ensemble des biomes.

Les fonctions écologiques qui peuvent être assurées par les biomasses telluriques (hors racines dont l'objet est précisément de capter les éléments nutritifs dans la terre) vont globalement de la fragmentation physique des végétaux et animaux à leur décomposition moléculaire (Hendrix *et al.*, 1990 ; Pankhurst *et al.*, 1998). Le *tableau 2* rend compte de certaines de ces fonctions en relation avec les organismes principaux qui les assurent.

D.1. Macro faune.

Les vers de terre font souvent rêver (Cluzeau *et al.*, 2003). Il est évident que l'absence de ces invertébrés est *de facto* souvent synonyme de pâle fertilité du sol. Mais, à l'opposé, leur présence n'est pas un gage certain de fertilité pour les végétaux, c'est-à-dire, pour revenir à la définition utilisée, un gage d'aptitude du sol à procurer aux plantes des éléments nutritifs en quantités adéquates. Bien d'autres invertébrés peuvent être utilisés comme indicateur, mais aucun ne fascine comme le ver de terre ! Allez donc savoir pourquoi ? Référence non explicitée au serpent biblique ? Une chose est certaine il ne s'agit nullement d'un indicateur à signification biunivoque.

D.2. Indicateurs de biomasse microbienne du sol.

Ces indicateurs sont d'une part la quantité de C ou de N contenue dans la biomasse microbienne (Chaussod, 1996) d'autre part quelques fonctions mises en œuvre par cette biomasse, les plus fréquemment utilisées étant soit l'activité de dégradation de la matière organique mesurée par la quantité de CO₂ dégagée dans des conditions standard d'incubation considérées comme favorables à la vie microbienne soit quelques fonctions enzymatiques particulières. On « exploite » ainsi une fonction planétaire primordiale, souvent appelée bien abusivement respiration du sol (Metzger *et al.*, 2003) à savoir la transformation, par minéralisation, des composés organiques en CO₂.

L'analyse approfondie de la fonction « minéralisation », dans le cadre de l'interprétation de la fertilité d'une terre, est utile pour comprendre quelles peuvent être les significations de l'indicateur « respiration du sol ». Cette analyse est présentée dans le *tableau 3*.

La détermination des quantités de C et/ou de N de la biomasse microbienne est au mieux un indicateur de ce qui a vécu, ou vit encore, dans le sol. Quant à l'observation du *tableau 3*, elle laisse à penser qu'une activité respiratoire importante du sol n'est peut-être pas un indicateur de fertilité durable, toute diminution significative de la teneur des MO dans les sols ayant une influence négative sur nombre de transferts d'élément nutritifs vers les plantes.

En conséquence bien des connaissances restent à acquérir dans le domaine des indicateurs biologiques des sols (De La

Paz Jimenez *et al.*, 2002). De plus, si l'on ajoute à ce nécessaire accroissement des connaissances en matière de biologie des sols, le fait que l'homme n'a absolument aucune maîtrise sur le fonctionnement des microorganismes habitant les sols, on est en droit de se demander si ces indicateurs de biologie des sols indiquent vraiment quelque chose qui permettrait de renseigner sur la fertilité d'un sol et sur son évolution possible, à défaut d'être probable.

C'est pourquoi le *tableau 2* méritait d'être complété par un autre (*tableau 4*) où sont explicités les effets qui peuvent paraître positifs ou négatifs en terme de niveau et d'évolution de la fertilité. Même si la colonne bénéfiques liés à la présence des microorganismes est plus longue que celle dédiée aux effets négatifs dus à la présence des microorganismes, il serait osé d'en conclure à l'intérêt final de ceux-ci.

En fait on se doit d'insister sur le fait que toute personne passant commande d'une analyse de type biologie des sols, et tout particulièrement doit se poser la question de savoir ce qu'elle recherche exactement dans le résultat. Elle ne doit en aucun cas attendre de l'analyste qu'il lui fournisse une réponse à une question qui n'a pas été posée ! L'attrait, voire **l'engouement par principe**, pour le « bio » ne suffit peut-être pas à en démontrer l'intérêt agronomique et une valeur environnementale certaine.

E. Indicateurs calculés

A coté des indicateurs mesurés directement sur des échantillons de terre, il est également possible de déterminer

des relations statistiques permettant de calculer certains indicateurs (*tableau 5*). Les relations ainsi établies portent le nom de **fonctions de pédotransfert** que l'on peut classer en 2 grands types.

E.1. Indicateurs directement mesurables

Il s'agit d'indicateurs dont on peut faire une mesure directe, mais que l'on peut estimer la valeur au moyen d'une fonction de pédotransfert déduite d'autres données disponibles. Nous présentons, à titre d'exemple, deux fonctions de pédotransfert utilisées pour estimer la capacité d'échange de cations.

- Selon Larson et Pierce (1994),

CEC (cmol⁺ kg⁻¹) = [% d'argile x (capacité moyenne d'échange de chaque type argile) + [%C/58 x 200] où Montmorillonite = 100 cmol⁺ kg⁻¹, Illite = 30 cmol⁺ kg⁻¹ et kaolinite = 8 cmol⁺ kg⁻¹,

- Selon Bigorre (1999),

CEC (cmol⁺ kg⁻¹ à pH=7) = 0.037 Argile (g kg⁻¹) + 0.273 Corg (g kg⁻¹).

Ce sont les mêmes variables de base qui sont utilisées (teneur du carbone organique et argiles minéralogiques dans un cas ou argiles granulométriques dans l'autre cas) dans les deux fonctions de pédotransfert les coefficients affectés à chaque de ces variables différent quelque peu.

De telles fonctions sont *de facto* des propositions implicites de mécanismes destinées à rendre compte de propriétés des sols. Il s'agit donc plus d'une approche permettant de comprendre l'origine d'une observation que d'une méthode utilisée pour calculer un indicateur prédictif.

Tableau 3. Récapitulatif descriptif schématique de l'analyse de la «respiration du sol»

Table 3. Summary scheme of soil respiration analysis

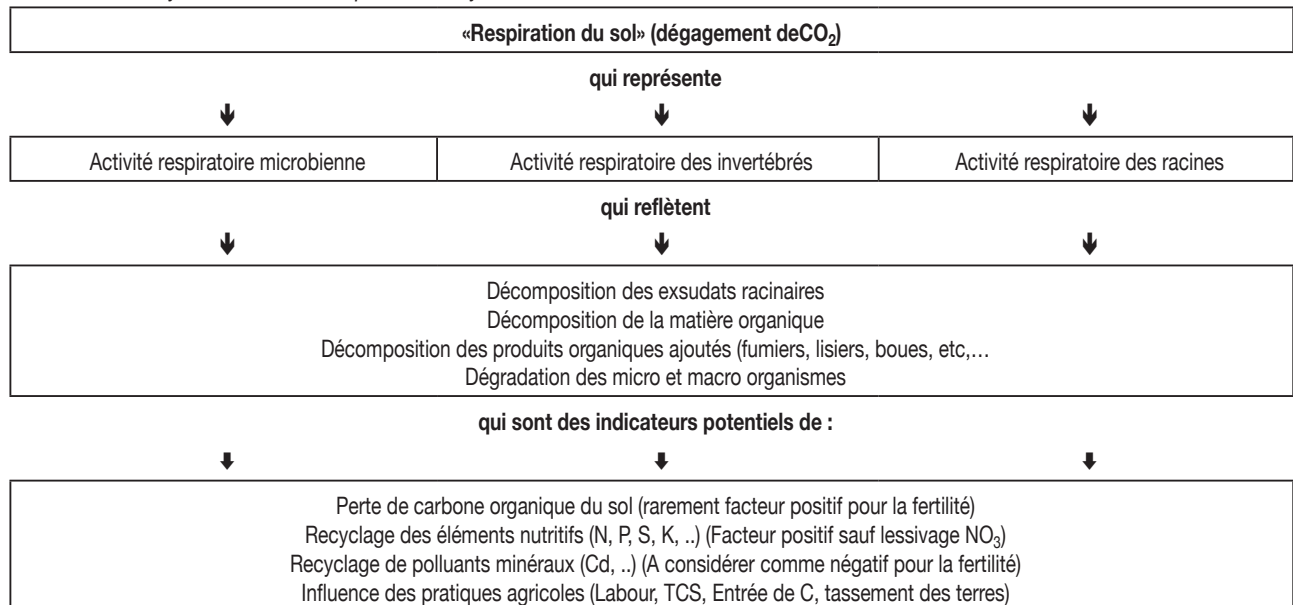


Tableau 4 - Conséquences du fonctionnement des microorganismes du sol jugées positives et négatives.**Table 4** - Positive or negative consequences of the soil micro-organisms functioning.

Effets bénéfiques des microorganismes	Effets négatifs des microorganismes
Effets en relation directe avec la fertilité apparente des sols	
Recyclage d'éléments nutritifs	Libération d'éléments à contre temps par rapport à la demande végétale (NO ₃ par exemple)
Fourniture d'un pool d'éléments nutritifs directement assimilables	Dégradation la matière organique du sol en formes minérales
Favorise la structure du sol	Dégradation les résidus de culture
Construction de la matière organique stable	Source de pathogènes végétaux, animaux et humains
Dégradation des résidus de récolte	
Dégradation des animaux morts	
Fixation de l'azote	
Peuvent parfois favoriser le développement des plantes (mycorhizes)	
Effets autres en relation avec la qualité des sols	
Contrôle (parfois) des populations microbiennes nuisibles	Production de gaz à effet de serre
Consommation de gaz à effet de serre	Dégradation des pesticides (perte d'efficacité)
Réserve massive de matériel génétique	
Dégradation des composés biotoxiques	

Tableau 5 - Quelques propriétés des sols qui peuvent être estimées à partir : (1) de variables le plus souvent mesurées en routine ; (2) et de modèles simples ou de fonctions de pédotransfert (Doran et Parkin, 1999).**Table 5** - Some soil properties that can be estimated with classical soil tests or pedotransfer functions (Doran and Parkin, 1999).

Propriétés des sols	Variables de base à utiliser dans les outils de prédiction de la propriété
Indicateurs calculés mais aussi mesurables directement	
Capacité d'échange de cations	Carbone organique + type d'argile et teneur de chaque type
Capacité de rétention en eau (CRE)	% sable, limon, argile + carbone organique + Bulk densité
Conductivité hydraulique	Texture du sol
Profondeur d'enracinement	Bulk density, capacité de rétention en eau et pH
Lessivage potentiel	Texture du sol, pH, carbone organique, profondeur, CEC, conductivité hydraulique
Indicateurs synthétiques non mesurables directement	
Activité microbienne aérobie et anaérobie	% des pores de la terre rempli d'eau
Activité microbienne ou pollution potentielle	pH et conductivité électrique
Cycle de C et N	Respiration du sol (+ température du sol et capacité de rétention en eau)
Productivité du sol	Bulk density, capacité de rétention en eau, pH, conductivité électrique et aération

E.2. Indicateurs synthétiques

Ce second type d'indicateur correspond à des fonctions de pédotransfert composites dont l'objet est typiquement l'estimation d'un paramètre dont la mesure n'est pas aisée, voire impossible avec les moyens disponibles. L'exemple est donné ici par une tentative de description de la productivité d'un sol, c'est-à-dire l'explicitation des causes de la fertilité (dans un contexte climatique donné). Une telle approche permet des comparaisons entre sites possédant la même caractéristique climatique.

E.3. Validité des fonctions de pédotransfert

Toutes les fonctions de pédotransfert sont construites par des approches statistiques et non par des approches mécanistes, même lorsque les mécanismes sont sous-jacents. C'est pourquoi, faut-il encore le rappeler encore une fois,

On n'a pas le droit d'utiliser une fonction obtenue par une approche statistique en dehors de sa «zone» spatio-temporelle de validation avérée.

F. Variabilité temporelle et spatiale de quelques indicateurs de fertilité des sols

La fertilité d'un sol n'est pas, dans une parcelle donnée, une donnée statique mais une propriété variable au cours du temps (Smaling *et al.*, 1997). Elle évolue en fonction et en raison des perturbations du sol imposées par l'homme agriculteur et qui sont nécessaires à la mise en place de la culture et à la croissance des végétaux. Il en résulte des variations spatio-temporelles. C'est pourquoi, quels que soient l'indicateur et le référentiel associés utilisés, la détermination d'indicateurs de la fertilité doit être répétée dans le temps et dans l'espace afin de saisir le sens des évolutions et modifier, en conséquence, les pratiques culturales utilisées pour maintenir ou faire évoluer la fertilité dans le sens souhaité. Le *tableau 6* illustre l'importance de ces variabilités. Il est complété par une recommandation de fréquence des différentes déterminations.

IV. DES RÉFÉRENTIELS

Les référentiels sont les outils d'interprétation des indicateurs. Sans référentiel il n'y a pas d'action possible. Ils permettent en principe de faire des choix d'actions de pratiques culturales en fonction des objectifs choisis.

Il existe pour chaque variable de très nombreux référentiels, ce qui complique souvent le choix des actions à entreprendre.

Tableau 6 - Variabilité des valeurs des indicateurs dans le temps et l'espace. Fréquence de mesure recommandée. (Sarrantonio *et al.*, 1996)

Table 6 - Variability of some indicators values in space and time. Recommended time intervals for measurement.

Indicateur	Variabilité relative (dans le temps et l'espace)	Fréquence de prélèvement recommandée	Période de prélèvement recommandée
Phosphate – Potassium	Faible dans le temps	Une fois tous les 4 ans	Avant apports d'engrais P et K
Nitrate	Très grande	Question posée ? Nutrition des plantes, pollution des eaux ?	Printemps pour cultures ; automne pour pollution !
pH du sol	Faible	1 fois tous les 4 ans	Indifférente
Conductivité électri.	Modérée	1 fois par an	Fonction de N-NO ₃
Masse volumique	Modérée	Fonction des pratiques (2 fois an ⁻¹)	Après le labour et période compaction
Capacité de rétention en eau	Modérée	Une fois par an	Simultanée à masse volumique
Vitesse d'infiltration	Grande	Avec densité volumique	Simultanée à masse volumique
Respiration du sol	Grande	Dépend de la question posée	Après le labour ; après enfouissement résidus de récolte

Tableau 7 - Rendements relatifs de différentes cultures en fonction du pH du sol (Smith et Doran, 1996).**Table 7** - Relative yields of some crops in relation to pH.

	Rendements relatifs aux différents pH		
	5,7	6,8	7,5
Maïs	83	100	85
Blé	89	100	99
Avoine	99	98	100
Orge	80	95	100
Luzerne	42	100	100
Trèfle rouge	49	89	100
Soja	80	100	93

Le cas des éléments majeurs comme P et K en est certainement la meilleure illustration. L'origine de ces différences est très variable et résulte autant de considérations théoriques avérées ou non (cas de la vieille grasse !) que de résultats de terrain.

Ceux régionalisés du COMIFER pour P et K sont suffisamment connus (et utilisés) pour qu'ils ne soient pas représentés ici. Il en est de même pour d'autres tel Régifert®, (Denoroy, 2004).

C'est pourquoi nous présentons ici un référentiel concernant le pH en liaison avec les rendements qui sont généralement, rappelons-le, une conséquence des prélèvements des éléments nutritifs. Le choix de l'agriculteur d'apporter des amendements basiques apparaît alors directement lié à la culture à venir et non directement lié à une fonction du sol prise en dehors du contexte de l'agroécosystème. (Julien, 2005²).

Quel que soit l'indicateur, il n'y a pas de référentiel général utilisable pour toute la France. Chaque référentiel doit être référencé temporellement et spatialement, en clair régionalisé.

V. Modifier les fertilités des sols.

Quelles actions possibles ?

Tous les organismes vivants modifient leur environnement et l'homme ne fait pas exception. Ces modifications ont pour origine les processus vitaux qui leur imposent, pour vivre, de prélever des nutriments dans leur écosystème (Ranger *et al.*, 2002) mais aussi d'y rejeter leurs déchets, conséquences de leur métabolisme. Nombreux parmi les humains sont ceux qui souhaitent dominer leurs semblables. Mais là n'est pas l'objet de ce document. Notons seulement que la recherche agronomico-biologique et les méthodes de développement qui y sont associées représentent de fait une démarche traduisant la volonté de l'homme de dominer les agroécosystèmes (Vitousek *et al.*, 1997), en particulier l'aptitude des écosystèmes à fournir aux cultures mises en place les éléments nutritifs qui leur sont

nécessaires pour atteindre les objectifs de rendements fixés. Cette volonté dominante s'exerce parfois sans avoir tenté, au préalable, de comprendre les mécanismes majeurs qui régissent le fonctionnement intime des agroécosystèmes (Boiffin et Stengel, 1999), ce qui peut aboutir à des résultats contraires aux espérances.

Les actions susceptibles de modifier la fertilité révélée d'un sol comportent toujours deux volets complémentaires. Elles consistent à modifier :

- l'état et la dynamique des éléments nutritifs disponibles pour les plantes ;
- les conditions de fonctionnement de la plante, ici des capteurs de la ressource nutritive, à savoir les racines et leurs auxiliaires, en modifiant les conditions d'accès aux ressources nutritives.

A. Accroître les fertilités révélées des sols

De nombreuses actions peuvent favoriser la fourniture des éléments nutritifs aux plantes. La solution la plus intuitive est celle qui consiste à accroître **la taille et la mobilité intrinsèque de la ressource nutritive** mise à disposition de la plante. Et pour ce faire on pratique la fertilisation avec l'espoir d'accroître la fertilité révélée du sol. Et c'est ainsi que le Comifer (1993) a formalisé ces notions en stipulant que :

L'objectif de la fertilisation P et K est de satisfaire les besoins nutritionnels des plantes en complétant l'offre du sol en éléments minéraux dans des conditions économiquement rentables

La fertilisation est-elle le seul moyen d'accroître les prélèvements des éléments nutritifs ? À coup sûr non, comme l'ont largement démontré Blanchet, Maertens et Bosc (1974) il y a quelques années en pratiquant des expérimentations concernant les nutriments P et K des cultures dans lesquelles ils ont fait varier l'importance de la source nutritive, l'alimentation hydrique et le tassement du sol. Parlant de la terre, les résultats obtenus pourraient être résumés comme suit :

Il vaut mieux être pauvre mais humide que riche mais sèche.

ce qui signifie que dans un certain nombre de situations il est beaucoup plus intéressant, en terme de potentialité de prélèvement des éléments, de disposer d'un sol dans lequel les teneurs des éléments disponibles par unité de masse de sol sont peu élevées mais dans lequel les racines se déplacent aisément que d'un sol à teneur en éléments assimilables élevée dans lequel les racines n'arrivent pas à progresser en raison en particulier de la sécheresse. Il faut donc éviter de tomber dans le *piège de la sécheresse* !

Dans les milieux sous climats tropicaux, qui sont aussi le plus souvent des milieux de pays en voie de développement ne disposant pas de matières fertilisantes de synthèse, l'accroissement de la fertilité repose sur l'utilisation raisonnée des microorganismes fixateurs d'azote et sur une gestion intégrale des matières organiques (Wooner et Swift, 1994 ; Oberson *et al.*, 2006). Cette pratique permet au mieux de maintenir le niveau de fertilité.

B. Diminuer les fertilités révélées des terres

De très nombreuses actions conduisent à limiter les transferts de nutriments vers les plantes. On trouve, comme pour le cas précédent, les actions réduisant la taille de la source nutritive et celles limitant les possibilités de développement et le fonctionnement des racines. L'action la plus intuitive est la pratique qui consiste à restituer aux sols moins d'éléments nutritifs que les quantités exportées hors du champ par les cultures. Cette pratique porte le nom de «soil mining» (Van der Pool, 1990). La conséquence de cette pratique est, dans tous les cas, une évolution de valeur des indicateurs (quantité, intensité et capacité aussi parfois appelée pouvoir tampon) traduisant une diminution de la fertilité des terres. Certes la taille (indicateur quantité) du compartiment nutritif diminue. Mais de plus, en raison de la chimie des éléments nutritifs présents dans les sols, le potentiel chimique (indicateur intensité) des éléments (Barber, 1995) diminue, ce qui entraîne l'accroissement du pouvoir tampon, et en conséquence une diminution des potentialités de transfert des éléments vers les racines. Cette pratique, trop fréquente dans de nombreux pays en voie de développement qui font le choix de ne pas investir dans l'agriculture vivrière, correspond en quelque sorte à une pratique de la **double peine** : non seulement il y a moins de réserves assimilables mais encore celles qui restent sont moins assimilables.

Parmi les autres actions fréquentes défavorables à l'expression pleine et entière de la fertilité maximale d'un sol, on se doit d'évoquer, à côté des pratiques douteuses conduisant au tassement du sol, les pratiques agricoles qui conduisent à détériorer la structure du sol et des agrégats. C'est pourquoi nous rappelons ici les observations pratiquées sur le dispositif

des **42 parcelles de Versailles**. Un emploi inapproprié d'engrais minéraux acidifiant a conduit à une désagrégation totale des particules et à rendre le sol totalement imperméable en temps de pluie (Pernes-Debuysier et Tessier, 2002)

VI. Pratiques agricoles et fertilité durable

A. Agriculture durable

Le besoin de nourriture pour l'humanité étant une constante spatiale et temporelle, il importe, si l'on souhaite que la satisfaction de ce besoin reste assurée de manière **durable pour tous**, que les fonctions écologiques se perpétuent durablement. Ce qui a conduit de nombreux auteurs, ou des conférences internationales, à définir quelques caractéristiques majeures d'un développement durable. La définition que nous pouvons proposer pour une **agriculture durable**, gage d'une production de nourriture continue est la suivante (Harwood, 1990) : «**est une agriculture qui peut évoluer indéfiniment vers une plus grande utilité pour l'homme, une plus grande efficacité dans l'utilisation des ressources, et un bilan environnemental qui est favorable aux humains et à la majorité des autres organismes** ».

B. Quelques conditions minimales requises pour tendre vers la durabilité

Pour tendre vers une **fertilité durable** (Scholes *et al.*, 1994) il semble souhaitable que :

- l'érosion, qui est un phénomène naturel, ne soit pas supérieure à la vitesse de formation du sol ; ce qui se traduit, à l'échelle de l'agriculteur agissant, par une érosion qui doit être voisine de zéro, **le sol n'étant pas à notre échelle une ressource, une richesse, renouvelable.**
- les conditions physiques du sol permettant la circulation de l'eau, de l'air et des racines, soient maintenues, voire améliorées, l'une des conditions centrales pour qu'il en soit ainsi étant que la teneur de la matière organique soit maintenue ou accrue ;
- le pH du sol, dont la décroissance est un processus naturel inévitable (Robert et Stengel, 1999), soit maintenu suffisamment haut pour éviter toute toxicité due à Al ou toute toxicité due d'autres éléments, tel l'anthropique Cd ;
- la constitution dans le sol de stock de graines de mauvaises herbes, de parasites et de maladies soit combattue ;
- les éléments nutritifs prélevés par les cultures (et exportés hors de la parcelle) soient retournés à la parcelle en quantité égale à celle exportées ; en clair il s'agit d'utiliser la méthode des bilans. Cette recommandation impose que chacun sache mettre en oeuvre la méthode des bilans à différentes échelles de temps et d'espace, en particulier sur les temps longs et sur tout le territoire de l'exploitation (Kockmann, 2005).

La durabilité, en matière de fertilité, sera assurée pour autant qu'aucune des fonctions écologiques majeures du sol ne soit éliminée de manière irréversible par les pratiques agricoles inappropriées !

C. Quel niveau de fertilité entretenir ? Pourquoi et à quel prix ?

Il fut longtemps question, dans les pays d'Europe occidentale, de fumure de redressement et de fumure d'entretien, à côté en France de la fumure de fond probablement encore plus mal définie que les deux premiers types de fumure.

La fumure de redressement avait été imaginée pour «redresser les fertilités», essentiellement P et K, et consistait à apporter des quantités d'élément nettement supérieures aux quantités exportées hors des champs avec les récoltes pour constituer de la «vieille graisse». Depuis que notre collègue Maurice Bosc (1988) a clairement formulé que «la vieille graisse est d'autant plus efficace qu'elle est plus jeune» la recommandation d'une telle pratique a fait long feu.

La fumure d'entretien avait pour objet «d'entretenir la fertilité», ce qui en clair signifiait maintenir la valeur de l'indicateur relatif à l'élément nutritif (le plus souvent une quantité extraite par un soluté donné) à un niveau tel que tout ajout supplémentaire d'élément nutritif n'ait plus pour conséquence un accroissement du rendement, même pour les cultures considérées comme les plus exigeantes.

Le choix fait ici pour définir la fertilité conduit à donner une toute autre signification à la fumure d'entretien. Celle-ci ne doit plus avoir pour objet de maintenir au-delà du niveau considéré comme satisfaisant une quantité extraite du sol par un soluté «judicieusement choisi» mais la fumure d'entretien doit avoir pour objet de maintenir la croissance des plantes au niveau choisi. Cette évolution prend en compte le fait que la teneur d'un sol en un élément donné, même lorsque tous les autres éléments sont considérés au top, explique au mieux 25 % des variations de rendements observés entre les différentes situations. Ce sont ainsi environ 75 % des variations des rendements qui sont expliquées par les autres facteurs de la fertilité exprimée.

VII. QUELLES LIMITES CONCEPTUELLES ET PRATIQUES CONCERNANT LES DÉMARCHES ANALYTIQUES MISES EN ŒUVRE POUR APPRÉCIER LA FERTILITÉ DES TERRES ET DES INDICATEURS ASSOCIÉS ? ET QUEL FUTUR ?

A. Quelques limites conceptuelles et/ou fonctionnelles concernant quelques indicateurs actuellement utilisés pour apprécier la (les) fertilité(s) des sols

L'indicateur doit aider à prendre des décisions opérationnelles d'action (Trochery, 2003). L'appréciation des limites de toute action est inhérente à la cible à atteindre et la quantification, au moyen d'indicateurs, de la fertilité d'un sol ne peut échapper à cette contrainte. Que nous apportent, ou que ne nous apportent pas, nos indicateurs de fertilité actuels ?

A.1. Les limites liées aux approches analytiques de laboratoire

La fertilité en un site donné est appréciée, jugée, quantifiée en fin de compte, par le rendement, quantitatif ou économique, de la culture mise en place ou à mettre en place. Ce rendement n'échappe pas au principe du facteur limitant énoncé par Liebig il y a plus de 150 ans. C'est le facteur le plus contraignant qui va limiter le rendement et il ne servira à rien de modifier, dans un sens favorable à l'accroissement des rendements, les autres indicateurs tant que la première des contraintes ne sera pas levée. Les facteurs de contrôle des rendements étant à la fois multiples et très divers, puisqu'ils concernent des processus chimiques, physiques et biologiques dans les sols, chacun doit se demander si des approches analytiques de laboratoire, forcément parcellaires, sont réellement en mesure de nous indiquer avec certitude quel est le premier des facteurs limitant dans la situation examinée.

A.2. Les limites dues au contenu des indicateurs utilisés.

La nutrition des plantes est un processus cinétique impliquant à la fois le très court terme (de l'heure à 48 heures) au niveau des zones de prélèvement racinaire et le moyen terme (de la journée à 3 mois) pour l'ensemble du système racinaire.

Or la majorité des indicateurs utilisés actuellement en analyse de routine, y compris à l'échelle planétaire, pour caractériser les propriétés des éléments nutritifs, ou même ceux potentiellement toxiques, sont des indicateurs de taille de compartiments d'éléments nutritifs assimilables. Connaître,

à un instant donné, la taille d'un compartiment nourricier ne renseigne que rarement sur le potentiel de transfert de l'élément vers la plante et sur l'évolution de la taille du compartiment sous l'influence d'une part des prélèvements des plantes et d'autre part des pratiques culturales. **On mesure des états, ou plus exactement un état, celui de l'instant de la mesure, alors qu'il nous faudrait apprécier des flux potentiels !** On décrit une fertilité statique alors qu'elle est fertilité dynamique. Il y a donc autour des aspects « dynamique des éléments nutritifs ou toxiques » un pas conceptuel important à franchir, ce qu'entreprennent des chercheurs (eux-mêmes dynamiques !) (Morel, 2002).

A.3. Analyses de terre versus analyse de sol

Parmi les limites effectives actuelles on doit noter la confusion trop souvent faite entre les termes **analyse de terre** et **analyse de sol**. Le second terme est souvent utilisé à tort en lieu et place du premier. Les plantes développent généralement leurs racines dans plusieurs horizons. L'analyse de sol doit alors comporter non seulement quelques analyses de la terre de l'horizon supérieur mais l'analyse de différentes caractéristiques des différents horizons. Ce point est fréquemment oublié et peut gravement nuire à l'interprétation des observations (en particulier sous prairies permanentes).

B. Et le futur ?

L'essentiel de ce futur dans ce domaine a été récemment présenté (Denoroy *et al.*, 2005). On n'en rappelle ici que les grandes lignes. Constatant que l'estimation des flux potentiels est d'une plus grande importance que la connaissance même affinée des stocks, il s'agit désormais :

- de disposer de nouveaux indicateurs analytiques descriptifs de la mobilité du stock des éléments assimilables ;
- de mettre au point des modèles de développement des cultures, ce qui permettrait d'explorer rapidement des situations contrastées sans dépendre de trop nombreuses expérimentations au champ ;
- de s'intéresser davantage à l'environnement puisqu'un sol fertile, gage d'une récolte florissante parce que les éléments nutritifs se transfèrent sans difficulté vers les plantes, conduit généralement à du transfert d'éléments nutritifs vers les eaux, ce qui les rend eutrophes comme les terres qui les entourent. Il est certainement illusoire d'avoir côte à côte des sols eutrophes et des eaux oligotrophes !

A ces évolutions souhaitables et dans l'air du temps, il est certainement aussi utile d'envisager une analyse de la résilience des sols (Bezdicsek *et al.*, 1996). Ce concept relativement récent doit rendre compte, tout à la fois :

- de la tolérance du sol à l'égard de stress, en particulier vis-à-vis de ses conditions de son utilisation qui sont *de facto* perturbatrices;

- de l'aptitude du sol à retrouver, après une perturbation, à un nouvel état d'équilibre.

En guise de conclusion, évidemment non durable !

Il n'y a pas de réalisation et de valorisation de la fertilité d'un sol sans intervention humaine. On est donc toujours en présence d'une fertilité révélée. L'expression, à notre vue, de la fertilité est dépendante d'abord de la quantité d'énergie, en sus de l'énergie solaire, fournie par l'homme. Il existe donc un aspect énergétique au concept de fertilité. Ce qui pourrait autoriser à définir un sol fertile :

comme un sol qui, pour produire une quantité donnée de produits consommables (estimée en unités énergétiques), va requérir la quantité minimale d'énergie.

La fertilité est-elle identifiable à une ressource naturelle renouvelable ? La réponse est probablement positive tant que des pratiques humaines n'ont pas porté définitivement atteinte à une fonction écologique que seul le sol est en mesure de remplir. A côté de celle de support à la vie végétale, celle permettant la minéralisation des matières organiques en est certainement une de celles à protéger. Sans elle nous serions enfouis sous nos propres déchets.

La fertilité d'un sol est-elle un bien à protéger individuellement ou collectivement ? La réponse est loin d'être évidente car le sol, sauf exception, n'est pas propriété collective.

Enfin pour maintenir durables l'eau et air, on évite de leur ajouter quelque chose ! Mais dans le cas du sol et de sa fertilité, la situation est un peu plus compliquée car les récoltes retirent quelque chose du sol et l'agriculteur, l'homme du début de la chaîne productrice, doit rapporter un minimum de choses pour maintenir le niveau de fertilité ! Il doit donc être expert en méthode du bilan ! Cette dernière remarque pour rappeler qu'en matière de fertilité des sols :

il est impératif de faire progresser simultanément les performances des outils analytiques, les connaissances fondamentales et leur enseignement.

L'exemple de l'étude de l'acidification des sols récemment explicité par Jean-Luc Julien (2005) est à ce titre particulièrement exemplaire.

BIBLIOGRAPHIE SUCCINCTE

- Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet J.F., Soussana J.F., Stengel P., 2002a - *Mitigation of the greenhouse effect. Increasing carbon stocks in French agricultural soils?* INRA. Paris. ISBN 2-7380-1054-7. 33 pages.
- Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Payet P.A., Soussana J.F. Stengel P., 2002b - Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France. INRA. Paris. 332 p.
- Arshad MAC, Lowery B., Grossman B., 1996 - Physical tests for monitoring soil quality. In: *Doran JW and Jones AJ, eds). Methods for assessing soil quality. Special Publication 49.* SSSA. Madison USA. pp. 123-141.
- Bachelard G., 1960 - *La formation à l'esprit scientifique. Contribution à une psychanalyse de la connaissance objective.* Vrin 4^e édition. Paris.
- Baize D., 1988 - Guide des analyses courantes en pédologie. INRA. Paris. ISBN 2-7380-0075-4. 172 pages.
- Balesdent J., Chenu C., Balabane M., 2000 - Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Res.*, 53: 215-230.
- Balesdent J., Leclerc B., Houot S., 2005 - Quels modèles pour suivre ou prévoir le devenir du carbone organique apporté aux sols ? In : *Thévenet G & Faedy L, eds - Fertilisation et société.* pp.87-115. Imprimerie Saint-François. Blois. pp 179-187.
- Barber SA, 1995 - Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach. John Wiley. New York. 414 pages. ISBN.0 471 58747 8.
- Barbier G., 1955 - Essai de définition de la fertilité du sol. *Bulletin de l'AFES.* 67 : 210-217.
- Bezdicsek DF, Papendick RI, Lal R, 1996 - Introduction: Importance of soil quality top health and sustainable land management. In: *Doran JW and Jones AJ, eds). Methods for assessing soil quality. Special Publication 49.* SSSA. Madison USA. pp. 1-8. ISBN. 0-89118-826-6.
- Bigorre F, 1999 - Contribution des argiles et des matières organiques à la rétention d'eau dans les sols. Signification et rôle fondamental de la capacité d'échange en cations. *CR Acad. Sci, Paris*, 330 : 245-250.
- Blair JM, Bohlen PJ, Freckman DW., 1996 - Soil invertebrates as indicators of soil quality. In: *Doran JW and Jones AJ, eds). Methods for assessing soil quality. Special Publication 49.* SSSA. Madison USA. pp. 273-191. ISBN. 0-89118-826-6.
- Blanchet M, Maertens C, Bosc M, 1974 - Principaux facteurs agronomiques déterminant l'adsorption des éléments nutritifs par les racines. *Bull. AFES.* 69-78.
- Boiffin J, Stengel P, 1999 - Réapprendre le sol : nouvel enjeu pour l'agriculture et l'espace rural. In : *Démeter 2000.* pp 147-211. Armand Colin. Paris.
- Boniface R, Trocmé S, 1988 - Enseignements fournis par des essais de longue durée. Essais sur la fumure phosphatée. In : *Gachon L, ed - Phosphore et potassium dans les relations sol-plante : conséquence sur la fertilisation.* pp.279-402. INRA. Paris. ISBN 2 7380 0007 X.
- Bosc M, 1988 - Enseignements fournis par des essais de longue durée. Essais sur la fertilisation potassique. In : *Gachon L, ed - Phosphore et potassium dans les relations sol-plante : conséquence sur la fertilisation.* pp. 403-466. INRA. Paris. ISBN 2 7380 0007 X.
- Brady NC, Weil RR, 1994 - *The nature and properties of soils.* Prentice Hall Intern. Ed. New Jersey. ISBN. 0-13-243189-0. 740 pages.
- Bruand A, Cousin I, Richard G, 2003 - Prédiction des propriétés de rétention en eau des sols : outils disponibles et perspectives. In : *Thévenet G & Faedy L, eds). Les fertilités des sols et les systèmes de cultures.* pp 87-96. Imprimerie Saint-François. Blois.
- Buresh RJ, Sanchez P, Calhoun, 1997 - *Replenishing soil fertility in Africa.* SSSA special publication number 51. 251 pages. SSSA. Madison. Wisconsin. ISBN. 0 89118 829 0.
- Chang SC; Jackson ML, 1957 - The fractionation of soil phosphorus. *Soil Science.* 83: 133-144.
- Chaussod R, 1996 - La qualité biologique des sols : évaluation et implications. *Etude et gestion des sols.* 3-4 : 261-278.
- Chenu C., 2003 - Comment caractériser les matières organiques du sol ? In : *Thévenet G & Faedy L, eds). Les fertilités des sols et les systèmes de cultures.* pp 107- 116. Imprimerie Saint-François. Blois.
- Cluzeau D., Peres G., Decaens T., Bureau F., Grandin V., Giteau J.-L., 2003 - Caractérisation microbiologique des sols tempérés : évaluation des lombriciens et de leurs activités. In : *Thévenet G & Faedy L, eds). Les fertilités des sols et les systèmes de cultures.* pp 118- 126. Imprimerie Saint-François. Blois.
- Comifer, 1993 - *Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique.* Comifer. Paris. 28 pages.
- Cooke GW, 1967). *The control of soil fertility.* Crosby Lockwood. London. 360 p.
- Daubeny S, 1845 - On the distinction between the dormant and active ingredients of the soils. *J. R. Agri. Soc. England.* 7: 237-245.
- Decoopman B, 2003 - Amendements organiques et effets sur les propriétés des sols de limon; In : *Thévenet G & Faedy L, eds). Les fertilités des sols et les systèmes de cultures.* pp 167-176. Imprimerie Saint-François. Blois.
- De La Paz Jimenez M, De la Horra AM, Pruzzo L, Palma RM, 2002 - Soil quality : a new index based on microbiological and biochemical parameters. *Biol. Fert. Soils.* 35:302-306.
- Denoroy P, Dubrulle, P.; Villette, C.; Colomb, B.; Fayet, G.; Shoesser, M.; Pellerin, S.; Pellerin, F.; Boiffin, J., 2004 - Regifert. Interpréter les analyses de terres. INRA. Paris.130 p. ISBN. 2-7380-1168-3
- Denoroy P, Le Souder C, Fardeau JC, 2005 - Comprendre le fonctionnement des agroécosystèmes pour ajuster l'offre de phosphore, potassium et magnésium aux besoins des cultures. In : *Thévenet G & Faedy L, eds - Fertilisation et société.* pp.87-115. Imprimerie Saint-François. Blois.
- Doran JW, Jones AJ, 1999 - *Methods for assessing soil quality.* SSSA special publication number 49. 410 pages. SSSA. Madison. Wisconsin. ISBN. 0 89118 826 6.
- Doran JW, Parkin TB, 1994 - Defining and assessing soil quality. In *Doran et al., ed - Defining soil quality for a sustainable environment.* pp 3-21. SSSA, Special publication 35, Madison.
- Doran JW, Parkin TB, 1999 - Quantitative indicators of soil quality : a minimum data set. In: *Methods for assessing soil quality.* SSSA special publication number 49. pp. 25-38. SSSA. Madison. Wisconsin. ISBN. 0 89118 826 6
- Doran JW, Safley M, 1998 - Defining and assessing soil health and sustainable productivity. In: *Pankhurst CE, Doube BM, Gupta VVSR, eds - Biological Indicators of soil health.* pp. 1-28. CABI. Wallingford. ISBN 0 85199 158 0.
- Dyer B, 1894 - Available "mineral" plant food in soils. *Journal of the chemical Society,* vol LXV, 135-167.
- Elliott ET, 1998 - Rationale for developing bioindicators of soil health. In: *Pankhurst CE, Doube BM, Gupta VVSR, eds - Biological Indicators of soil health.* pp. 49-78. CABI. Wallingford. ISBN 0 85199 158 0
- Emsley J, 2000 - The shocking history of phosphorus. A biography of the Devil's element. Pan Books. London. ISBN 0 330 39005 8.
- Faedy L, 2003 - Introduction du président du GEMAS. In : *Thévenet G & Faedy L, eds). Les fertilités des sols et les systèmes de cultures.* pp 9-11.. Imprimerie Saint-François. Blois.
- Fardeau JC, 1992 - La fertilité des sols et son entretien. In : *Brun-Bellut J et Morel JL, eds - Agriculture , Environnement, Qualité.* pp51-73. ENSAIA-INPL. Nancy.
- Fardeau JC, Morel C, Boniface R, 1988 - Pourquoi choisir la méthode Olsen pour estimer le phosphore assimilable des sols. *Agronomie,* 8 : 577-584.
- Feller C, Bouline J, Pedro G., 2001 - Indicateurs de fertilité et durabilité des systèmes de culture au début du XIX^e siècle. *Etude et Gestion des sols.* 8,1 : 33-46.
- Ferti-orga. Site d'échanges par courrier électronique sur la fertilisation organique. fertiorga@yahoogroupes.fr

- GEMAS – COMIFER, 2003 - *Les fertilités du sol et les systèmes de culture*. Thévenet G & Faedy L, eds). 200 pages. Imprimerie Saint-François. Blois.
- Hallsworth EG, 1969 - The measurement of soil fertility. The national soil fertility project. *Journal of the Australian Institute of agricultural science*. 78-89.
- Harwood RR, 1990 - A history of sustainable agriculture. In: *Sustainable agricultural systems*. pp 3-19. Edwards CA, Lal R, Maden P, Miller RH, House G, eds - Soil and water conservation society. Ankeny. USA. ISBN. 0-937534-21-X.
- Hendrix PF, Crossley DA Jr, Blair JM, Coleman DC, 1990 - Soil biota as components of sustainable agroecosystems. In: *Sustainable agricultural systems*. pp 637-654. Edwards CA, Lal R, Maden P, Miller RH, House G, eds - Soil and water conservation society. Ankeny. USA. ISBN. 0-937534-21-X.
- Heuzé G, 1962 - *Les assolements et les systèmes de culture*. Hachette. Paris. 530 pages.
- Jacks GV, 1963 - The biological nature of soil productivity. *Soils and fertilizers*. 26: 147-150.
- Jansson SL, 1967 - Soil organic matter and fertility. In: *Proceedings of the meeting of commission II and IV of the ISSS*. pp 1-10.
- Julien, J.L.; Charlet, L.; Dambrine, E.; Delvaux, B.; Dufey, J.E.; Fardeau, J.-C.; Le Cadre, E.; Tessier, D., 2005 - L'acidification des sols. In : Michel-Claude Girard, Coordinateur), Christian Walter, Coordinateur), Jean-Claude Rémy, Coordinateur), Jacques Berthelin, Coordinateur), Jean-Louis Morel, Coordinateur), Sols et environnement. Paris, FRA - : Dunod 2005. 516-537
- Joret G, Hébert J, 1955 - Contribution à la détermination des besoins des sols en acide phosphorique. *Ann. Agron.* 233-299.
- Kockmann F., Reau R., Boulet P., Eveillard P., Papy F., 2005 - Gérer la fertilité des sols de l'exploitation, entre contraintes et performances. In : *Thévenet G & Faedy L, eds - Fertilisation et société*. pp.211-222 Imprimerie Saint-François. Blois.
- Larson WE, Pierce FJ, 1994). The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. pp 37-52. In: *Doran JW et al., eds - Defining soil quality for a sustainable environment*. Pub. 35. SSSA, Madison, WI.
- Lebourg A, Sterckeman T, Ciesielski H, Proix N, 1996 - Intérêt de différents réactifs d'extraction chimique pour l'évaluation de la biodisponibilité des métaux en traces des sols. *Agronomie*. 16 : 201-205.
- Le Bissonnais Y, Duval O, Chenu C, 2003 - Comment mesurer la stabilité de la structure des agrégats du sol pour évaluer la sensibilité à la battance et à l'érosion. In : *Thévenet G & Faedy L, eds - Les fertilités des sols et les systèmes de culture*. pp.97-106. Imprimerie Saint-François. Blois
- Liebig J von, 1855 - Principles of agricultural chemistry, with special reference to the late researches made in England. Walton & Marly. London.
- Mautner MN, Sinaj S, 2002 - Water-extractable and exchangeable phosphate in Martian and carbonaceous chondrite meteorites and in planetary soil analogs. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66, 17): 3161-3174.
- Metzger L, Nassr-Amellal N, 2003 - Comment analyser l'activité microbienne du sol. In : *Thévenet G & Faedy L, eds - Les fertilités des sols et les systèmes de culture*. pp.127-138. Imprimerie Saint-François. Blois.
- Ming DW and Henninger DL, 1989 - *Lunar base agriculture: soils for lunar plant growth*. Ming DW and Henninger DL, eds - ASA, Madison, USA. 255 p. ISBN. 0-89118-100-8.
- Morel C, Plenchette C, Fardeau JC, 1992 - La fertilisation raisonnée du blé. *Agronomie*. 12 :565-579.
- Morel C, 2002 - *Caractérisation de la phytodisponibilité du P du sol par la modélisation du transfert des ions phosphate entre le sol et sa solution*. Mémoire d'HDR, INPL-ENSAIA Nancy. 80 pages. www.bordeaux.inra.fr/TCEM.
- Oberson A, Bünemann EK, Friesen DK, Rao IM, Smithson PC, Turner BL, Frossard E, 2006 - Improving phosphorus fertility in tropical soils through biological interventions. In : *Uphoff H, ed - Biological approach to improving the fertility and the sustainability of soil systems*. pp 531-545.
- Olsen SR, Cole CV, Watanabe FS, Dean LA, 1954 - *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium carbonate*. USDA Circ 939. 19 pages.
- Pernes-Debuysier A, Tessier D, 2002 - Influence de matières fertilisantes sur les propriétés des sols. Cas des 42 parcelles de l'INRA de Versailles. *Etude et gestion des sols*. 9,3 :177-186.
- Pankhurst C, Doube BM, Gupta VVSR, 1998 - *Biological indicators of soil health*. 448 pages CAB International. Wallingford UK. ISBN. 0 85199 158 0.
- Parnaudeau V, 2004 - Caractéristiques biochimiques de produits organiques résiduels, prédiction et modélisation de leur minéralisation dans les sols. Thèse. Université de Rennes 3. 200 pages.
- Pieri C, 1989 - *Fertilité des sols de savane*. Ministère de la coopération et CIRAD-IRAT ed 444 pages. ISBN 2 87614 024 1.
- Pimentel D, Hurd LE, Bellotti AC, Forster MJ, Oka IN, Sholes OD, Whitman RJ, 1973 - Food production and the energy crisis. *Science*. 182: 443-449.
- Quintana-Murci L, Hombert JM, 2005 - Gènes et langues : Une évolution parallèle ? In *Hombert JM, ed):Aux origines des langues et du langage*. pp. 308-327. Fayard. Paris.
- Ranger J, Gelhaye D, Turpault MP, 2002 - Impact des plantations forestières traitées semi-intensivement sur la fertilité minérale des sols et la qualité de l'environnement. *Etude et gestion des sols*. 8,3 : 159-176.
- Robert M, Stengel P, 1999 - Sols et agriculture : ressource en sol, qualité et processus de dégradation. *Cahiers d'études et de recherches francophones. Agricultures*. 8,4 : 301-308.
- Rusch HP, 1972 - *La fécondité du sol. Pour une conception biologique de l'agriculture*. Le courrier du livre. Paris. 312 pages.
- Saint Esprit, 1968 - *Study week on organic matter and soil fertility*. John Wiley & Sons. New York. 1018 pages.
- Sarrantonio M, Doran JW, Liebig MA, Halvarson JF, 1996 - On-farm assessment of soil quality and health. In: Doran JW and Jones AJ, eds - *Methods for assessing soil quality*. SSSA special publication number 49. pp. 169-185. SSSA. Madison. Wisconsin. ISBN. 0 89118 826 6.
- Scholes MC, Swift MJ, Heal OW, Sanchez PA, Ingram JSI, Dalal R, 1994 - Soil fertility research in response to the demand for sustainability. In: *Woomer PL, Swift MJ, eds - The biological management of tropical soil fertility*. John Wiley & Sons. pp 1- 14. ISBN 0 471 95095 5.
- Sébillotte M, 1989 - *Fertilité et systèmes de production*. INRA. Paris. 369 pages.
- Segond L, 1965 - La genèse. Formation de l'homme et de la femme & Le jardin d'Eden, et le péché d'Adam. In : *La sainte bible*. pp 6-7. La société biblique française. Paris.
- Smaling EMA, Nandwa SM, Janssen BH, 1997 - Soil fertility in Africa is at stake. In: *Replenishing soil fertility in Africa*. SSSA special publication number 51 pp.47-61. Madison, Wisconsin.
- Smith JL, Doran JW(1996 - Measurement and use of pH and electrical conductivity for soil analysis. In: *Doran JW and Jones AJ, eds). Methods for assessing soil quality*. SSSA special publication number 49. pp. 169-185. SSSA. Madison. Wisconsin. ISBN. 0 89118 826 6.
- Steiner KG, 1996 - *Causes of soil degradation and development approaches to sustainable soil management*. 52 pages. Margraf verlag, Weikersheim, D. ISBN. 3-8236-1259-X.
- Sterckeman T, Fismes J, 2005 - *Programme PHYTOREF. Etablissement d'un référentiel pour des méthodes chimiques de diagnostic des risques liés à la phytodisponibilité des éléments en traces dans les sols. Etude de faisabilité*. 89 pages. ENSAIA-INPL/INRA. Vandoeuvre les Nancy. Téléchargeable sur site ADEME.
- Thaër AD, 1811-1816. *Principes raisonnés d'agriculture*. Trad de l'all. Par EVB Crud, JJ Prechoud, ed - 4 t Paris 372-266-504-473 p.

- Thaer AD, 1856 - *The principles of practical agriculture*. Translated by Shaw W and Johnson CW. Saxton and Company publ. New York, 551 p.
- Thévenet G, 2003 - La fertilisation des cultures : une dose nécessaire et suffisante pour une agriculture résolument durable. In : Thévenet G & Faedy L, eds - *Les fertilités des sols et les systèmes de culture*. pp.13-18. Imprimerie Saint-François. Blois
- Trochery F, 2003 - Des indicateurs pour quoi faire ? In : Thévenet G & Faedy L (eds) - *Les fertilités des sols et les systèmes de culture*. pp.177-186. Imprimerie Saint-François. Blois
- Van der Pool F, 1990 - Soil mining as a source for farmer's income in Southern Mali. *Amsterdam Royal Tropical Institute*.
- Vitousek PM, Mooney HA, Lubchenco J, Melillo JM, 1997 - Human domination of earth's ecosystems. *Science*.277:494-499.
- Woomer PL, Swift MJ, 1994 - *The biological management of tropical soil fertility*. John Wiley & Sons. 242 pages.