

Revue des méthodes multiparamétriques pour l'estimation de la qualité des sols dans le cadre de l'aménagement du territoire

E. Rabot_(1, 2), C. Keller₍₁₎, J.-P. Ambrosi₍₁₎ et S. Robert₍₃₎

- 1) Aix Marseille Université, CNRS, IRD, Coll France, CEREGE, 13545 Aix-en-Provence cedex 04, France
- 2) Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, Department Soil System Science, Halle (Saale), Allemagne
- 3) Aix Marseille Univ, Univ Nice Sophia Antipolis, Avignon Université, CNRS, ESPACE, Nice, France

*: Auteur correspondant: keller@cerege.fr

RÉSUMÉ

L'étalement urbain affecte principalement les territoires agricoles, dont la plupart ont un fort potentiel agronomique. Afin de contribuer à une gestion durable des sols, les indices de qualité des sols pourraient permettre de caractériser l'adéquation des sols à leurs potentiels usages agricoles, forestiers ou urbains dans le cadre de l'aménagement du territoire. Les indices de qualité des sols ont pour principal objectif de fournir une information synthétique de l'état des sols. Cependant, leur mise en œuvre est confrontée à la difficulté de rendre compte de la complexité du sol à travers un seul indice. Il existe ainsi une multitude d'indices de qualité des sols. Le choix des propriétés du sol à intégrer est primordial et dépend souvent de l'utilisation finale de l'indice, mais la manière de combiner les propriétés du sol et le poids qui leur est donné est tout aussi important. L'objectif de cette synthèse est ainsi de présenter les méthodes d'évaluation de la qualité des sols, dans leur aspect technique, et d'engager une réflexion sur les avantages et les inconvénients de chacune de ces approches. La définition de la qualité des sols impliquant l'utilisation de propriétés physiques, chimiques et biologiques, nous traitons essentiellement des méthodes multiparamétriques. Cette synthèse bibliographique montre qu'il est possible de passer outre certaines difficultés reconnues dans la conception de tels indices, en stratifiant judicieusement les usages et les fonctions du sol à prendre en compte selon l'échelle d'évaluation et en évitant l'agrégation des indicateurs en une note unique.

Comment citer cet article:

Rabot E., Keller C., Ambrosi J.-P. et Robert S. - 2017 - *Revue des méthodes multiparamétriques pour l'estimation de la qualité des sols dans le cadre de l'aménagement du territoire* *Etude et Gestion des Sols*, 24, 59-72

Comment télécharger cet article:

www.afes.egs/EGS-2017-24-4-Rabot-59-72

Comment consulter/télécharger

tous les articles de la revue EGS:
www.afes/egs/

Mots clés

Aménagement du territoire, indice de qualité des sols, qualité intrinsèque, qualité dynamique, fonctions du sol, usages du sol.

SUMMARY**REVIEW OF THE MULTIPARAMETER METHODS FOR SOIL QUALITY ASSESSMENT IN THE CONTEXT OF LAND-USE PLANNING**

Urban sprawl mainly affects agricultural areas, most of them having a high agronomic potential. To contribute to a sustainable management of soils, soil quality indices could be used to characterize the suitability of soils for their potential agricultural, forested, or urban land uses as part of land-use planning. Soil quality indices are designed to provide synthetic information about soil condition. However, their implementation is faced to the difficulty of summarizing soil complexity through one single index. Therefore, a lot of soil quality indices can be found in the literature. The choice of the soil properties to include is essential and often depends on the end use of the index, but the way in which soil properties are combined and the weight given to them is also important. The main objective of this review is thus to examine methods of soil quality assessment, in their technical aspect, and to compare the advantages and disadvantages of each approach. Because the definition of soil quality involves physical, chemical, and biological properties, this review essentially deals with multiparameter methods. This review shows that it is possible to bypass some of the difficulties known to affect the design of soil quality indices, by stratifying wisely land uses and soil functions according to the evaluation scale, and by avoiding the aggregation of soil indicators in a single value.

Key-words

Land-use planning, soil quality index, inherent soil quality, dynamic soil quality, soil functions, land uses.

RESUMEN**REVISIÓN DE LOS MÉTODOS MULTIPARAMÉTRICOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS SUELOS EN EL CONTEXTO DE LA ORDENACIÓN DEL TERRITORIO**

La expansión urbana afecta principalmente a las tierras agrícolas, la mayoría de ellas con alto potencial agronómico. Para contribuir a una gestión sostenible de los suelos, se podrían utilizar índices de calidad de los suelos para caracterizar la adecuación de los suelos para potenciales usos agrícolas, forestales o urbanos como parte de la ordenación del territorio. Los índices de calidad de los suelos están diseñados para proporcionar información sintética sobre el estado de los suelos. Sin embargo, su aplicación se enfrenta a dificultades para dar cuenta de la complejidad del suelo a través de un único índice. Por lo tanto, una gran cantidad de índices de calidad de los suelos se puede encontrar en la bibliografía. La elección de las propiedades del suelo a utilizar es crítica y a menudo depende del uso final del índice, pero la forma en que se combinan las propiedades del suelo y el peso que se les da es tan importante. El principal objetivo de esta revisión es examinar los métodos de evaluación de la calidad de los suelos, en su aspecto técnico, y comparar las ventajas y desventajas de cada enfoque. Puesto que la definición de la calidad de los suelos implica el uso de propiedades físicas, químicas y biológicas, esta revisión trata esencialmente de los métodos multiparamétricos. Esta revisión muestra que es posible pasar por alto ciertas dificultades reconocidas en la concepción de estos índices, estratificando de manera eficaz los usos del suelo y las funciones según la escala de evaluación, y evitando la agregación de los indicadores en una nota única.

Palabras clave

Ordenación del territorio, índice de calidad de los suelos, calidad inherente, calidad dinámica, funciones del suelo, usos del suelo.

L'impact des activités humaines sur les sols constitue depuis quelques années un sujet de préoccupation grandissant et l'on voit apparaître de plus en plus d'incitations à la maîtrise de l'étalement urbain (ex. : Sommet de la Terre à Rio, loi française SRU, COP21). En effet, en France, entre 2006 et 2012, les sols artificialisés ont progressé de 0,49 % par an (Janvier *et al.*, 2015), si bien que le rythme d'artificialisation du territoire est aujourd'hui plus rapide que la dynamique démographique (Cheverry et Gascuel, 2009 ; Prokop *et al.*, 2011). Ce phénomène affecte principalement des territoires agricoles, dont la plupart ont un fort potentiel agronomique (Antoni, 2011 ; Chéry *et al.*, 2014). Afin de répondre à cette problématique de la consommation des terres, il apparaît nécessaire de caractériser objectivement l'adéquation des sols à leurs potentiels usages agricoles, forestiers ou urbains, dans le cadre de l'aménagement du territoire. Depuis longtemps, des cartes thématiques traduisant l'aptitude des sols à la production agricole ont été déduites des cartes pédologiques (Begon *et al.*, 1978 ; Boiffin, 1980). Dans le même esprit, nous avons proposé de caractériser l'adéquation de sols pour de potentiels usages à l'aide d'un indice de qualité des sols (Keller *et al.*, 2012). En effet, les indices de qualité des sols (IQS) permettent de fournir une information synthétique de l'état des sols, et constituent à ce titre un outil directement utilisable pour la planification de l'espace.

Il existe à l'heure actuelle une multitude d'IQS, utilisant des approches et des données d'entrée variées. Une telle diversité démontre un intérêt certain de la part de la communauté scientifique et des utilisateurs du sol. C'est également un manque de consensus qui est ainsi illustré. Malgré cette abondance d'IQS, aucun indice n'a pu obtenir l'adhésion de tous. La mise en œuvre d'un IQS se veut volontairement simple, mais la démonstration de sa validité reste délicate. Sa mise en œuvre est, en particulier, confrontée à la difficulté de rendre compte de la complexité du sol à travers un seul indice. La notion d'IQS est ainsi soumise à critiques (Sojka et Upchurch, 1999 ; Letey *et al.*, 2003), conduisant à la création régulière de nouveaux indices. Par ailleurs, ces IQS ne se veulent pas toujours génériques, et sont conçus pour des conditions pédoclimatiques particulières et/ou ne sont pas adaptés à tous les types d'usages.

Afin de contribuer à une gestion plus durable des sols et à leur prise en compte dans l'aménagement du territoire, il nous semble nécessaire d'utiliser un IQS générique, adapté à la fois à des usages urbains, agricoles et forestiers. Nous pensons également que l'acceptation même du concept d'IQS doit passer par une recherche de méthodes d'évaluation scientifiquement robustes, compréhensibles par un public non éclairé et faciles à mettre en œuvre. Ainsi, à travers cette synthèse, nous nous proposons de recenser les différentes méthodes d'évaluation de la qualité des sols élaborées et utilisées jusqu'à aujourd'hui, dans leur aspect technique, et de mettre en évidence les avantages et les inconvénients de chacune d'elles. Nous nous baserons sur cette analyse pour proposer des pistes d'amélioration. Après

avoir rappelé quelques définitions concernant la qualité des sols, leurs fonctions, nous aborderons les méthodes de calcul des IQS en nous intéressant plus particulièrement aux méthodes multiparamétriques qui permettent de prendre en compte les propriétés physiques, chimiques et biologiques.

LE CONCEPT DE QUALITÉ DES SOLS

Définition de la qualité du sol

Il est tout d'abord nécessaire de s'entendre sur la notion de qualité du sol. Les différents auteurs s'accordent sur la définition proposée par l'association américaine de sciences du sol (SSSA, S-581): la qualité du sol est « la capacité d'un type de sol à fonctionner, au sein d'un écosystème naturel ou non, en satisfaisant la production animale et végétale, en maintenant ou améliorant la qualité de l'eau et de l'air et, en supportant la santé humaine et l'habitat humain » (Karlen *et al.*, 1997). Ainsi, Tóth *et al.* (2007), la décrivent comme une mesure de la capacité du sol à fournir des services écosystémiques, à travers son aptitude à accomplir des fonctions. La qualité du sol doit en particulier être vue comme une image composite des propriétés et processus physiques, chimiques et biologiques des sols (Karlen *et al.*, 1998).

Karlen *et al.* (2003) différencient une qualité du sol « intrinsèque » ou « statique » d'une qualité « dynamique ». La qualité intrinsèque est liée aux différents facteurs de la formation des sols. Elle n'est pas influencée par l'usage qui en est fait. Elle est souvent utilisée afin de comparer l'aptitude de sols entre eux ou pour évaluer l'adéquation d'un sol pour un usage spécifique (De la Rosa et Sobral, 2008). À l'inverse, la qualité dynamique reflète une évolution liée à l'usage et à la gestion actuelle du sol (Karlen *et al.*, 2003), souvent à une échelle plus fine, typiquement celle de la parcelle (Norfleet *et al.*, 2003). Elle permet d'observer la durabilité de l'usage, les processus concernés étant considérés comme réversibles à court terme. Ces deux types de qualité, bien qu'évalués avec des objectifs et des échelles distincts, sont néanmoins très liés. Comme le soulignent Norfleet *et al.* (2003), la gamme de variation des indicateurs de la qualité dynamique d'un sol est dépendante de sa qualité intrinsèque.

De multiples utilisations

Les problématiques ayant conduit à la conception des IQS relèvent pour la plupart de préoccupations anciennes. Les premiers travaux ayant trait à la productivité agricole argumentaient que maîtriser la qualité des sols devait permettre de minimiser l'impact de l'agriculture sur l'environnement et la santé humaine (National Research Council, 1993). Ainsi, ces études ont concerné les cultures annuelles, les prairies, les forêts ou plus rarement les cultures permanentes, et visaient à observer par exemple l'effet de pratiques culturales, telles que le travail du sol et la fertili-

sation (Shukla *et al.*, 2006 ; Mohanty *et al.*, 2007 ; Armenise *et al.*, 2013 ; de Paul Obade et Lal, 2016), l'impact de différents types de cultures (Diack et Stott, 2001 ; Ferraro, 2009) ou d'un changement d'usage des sols (Cherubin *et al.*, 2016). Les milieux urbains ont toutefois suscité un moindre intérêt (Laroche *et al.*, 2006 ; Rutgers *et al.*, 2008 ; Vrščaj *et al.*, 2008), avec des travaux ciblant principalement les problématiques de pollution des sols (Zornoza *et al.*, 2015). En général, la conception d'un IQS requiert un fort niveau de connaissance du fonctionnement des sols, en lien avec les pratiques de gestion. Le plus faible nombre d'IQS adaptés aux milieux urbains peut être attribué à l'état des recherches actuelles, moins avancées en ce qui concerne les sols artificialisés. Néanmoins, une demande d'apport de connaissances sur ces sols émerge, liée aux récentes préoccupations en matière d'aménagement durable des villes et de protection du patrimoine sol (Vrščaj *et al.*, 2008 ; Zornoza *et al.*, 2015). Si les travaux précédemment cités s'attachent à opérer des diagnostics à l'échelle de la parcelle, d'autres sont réalisés dans le cadre du suivi de la qualité des sols au niveau régional voire national (Kirchmann et Andersson, 2001 ; Loveland et Thompson, 2002 ; Lilburne *et al.*, 2004 ; Rutgers *et al.*, 2008). Plusieurs méthodes d'estimation de la qualité des sols sont même déjà opérationnelles, sous la forme de logiciels ou d'applications en ligne (Andrews *et al.*, 2004 ; De la Rosa *et al.*, 2004 ; Liebig *et al.*, 2004 ; Lilburne *et al.*, 2004 ; Bohanec *et al.*, 2007).

La notion de fonction du sol

Les sols sont régis par des processus complexes, d'ordre physique, chimique et biologique, qui interagissent et donnent au sol sa capacité à fonctionner. Cette « capacité à fonctionner » faisant appel au nombre et au type de fonctions qu'un sol est capable de réaliser (Tóth *et al.*, 2007), une majorité des IQS est fondée sur la notion de fonction du sol.

Le terme de fonction du sol peut être défini très simplement par « ce que fait le sol » (Seybold *et al.*, 1998). Les fonctions du sol correspondent ainsi au fonctionnement et processus intrinsèques du sol, indépendamment de tout intérêt humain (ex. : dynamique du carbone et des nutriments, rétention de l'eau, etc.). Les fonctions du sol prises en compte dans les IQS dépendent des objectifs de l'évaluation. Ces objectifs concernent, par exemple, l'aménagement de l'espace, la productivité agricole et forestière, la préservation de l'environnement ou la gestion de l'eau.

Si l'approche par les fonctions du sol est majoritairement choisie pour la conception d'IQS, c'est parce qu'elle est facile à appréhender pour un utilisateur non-scientifique, contrairement à certaines des propriétés mesurées dans le sol. Toujours par souci d'être aisément compris, certains IQS sont fondés sur les services écosystémiques (Velasquez *et al.*, 2007), tels que définis dans le *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005), et d'autres sur les menaces qui pèsent sur les sols (Tzilivakis *et al.*, 2005 ; Tóth *et al.*, 2007).

LES INDICATEURS: CARACTÉRISTIQUES ET DIVERSITÉ

Relation entre fonctions du sol et indicateurs

Les différentes fonctions du sol sont évaluées à l'aide de propriétés mesurées dans le sol. Les propriétés du sol les plus porteuses d'information sont alors dénommées « indicateurs ». Néanmoins, il n'existe pas de relation simple entre indicateurs et fonctions (Schoenholtz *et al.*, 2000). Souvent, un indicateur renseigne sur plusieurs fonctions et possède alors des valeurs optimales spécifiques à chacune d'elles (Vrščaj *et al.*, 2008). À l'inverse, une fonction peut être décrite par plusieurs indicateurs. Un bon indicateur doit être fiable, sa mesure aisée et reproductible, sensible aux différences de pratiques et facile à interpréter (Nortcliff, 2002). Il doit par ailleurs posséder des seuils connus et, si possible, être issu de bases de données déjà disponibles. La valeur de l'information fournie doit en effet être plus grande que le coût de son acquisition (Bremer et Ellert, 2004). Il serait irréaliste de mesurer l'ensemble des propriétés du sol et de l'écosystème, c'est pourquoi un jeu de données minimum (JDM), consistant en un nombre réduit d'indicateurs physiques, chimiques et biologiques est défini (Larson et Pierce, 1991). Plusieurs JDM ont été proposés et le choix des indicateurs à intégrer dans un IQS a été discuté dans divers articles de synthèse (Karlen *et al.*, 1998 ; Doran et Zeiss, 2000 ; Schoenholtz *et al.*, 2000 ; Loveland et Thompson, 2002 ; Moffat, 2003 ; Schloter *et al.*, 2003 ; Gil-Sotres *et al.*, 2005). Plusieurs études comparatives ont par ailleurs montré des tendances similaires entre les résultats issus d'un jeu de données total et d'un JDM, même si ces résultats étaient statistiquement différents (Qi *et al.*, 2009 ; Mukherjee et Lal, 2014 ; Cherubin *et al.*, 2016).

Indices multiparamétriques versus monoparamétriques

Beaucoup d'IQS mêlent ces indicateurs physiques, chimiques et biologiques. Ce sont des indices globaux ou multiparamétriques. D'autres IQS n'abordent qu'un seul de ces domaines. C'est en particulier le cas dans le domaine de la biologie (Dawson *et al.*, 2007 ; Chaer *et al.*, 2009 ; Huerta *et al.*, 2009). Les indicateurs microbiologiques et biochimiques sont considérés suffisamment sensibles aux variations des conditions du milieu pour caractériser l'évolution de la qualité des sols (Franzluebbers *et al.*, 1995 ; Yakovchenko *et al.*, 1996). Cette sensibilité aux conditions du milieu peut néanmoins s'exprimer à l'échelle saisonnière, ce qui en fait l'inconvénient majeur (Gil-Sotres *et al.*, 2005). Ces méthodes, souvent à la pointe des avancées dans le domaine considéré, sont parfois difficilement généralisables et demandent un fort degré d'expertise, les données de référence pour des sols de bonne qualité n'étant pas

toujours disponibles (Gil-Sotres *et al.*, 2005). Certains indices, nommés indices monoparamétriques, cherchent même à synthétiser la qualité du sol à l'aide d'un unique indicateur. Gardi *et al.* (2002) utilisent par exemple les populations de microarthropodes ou de collemboles. Concernant la qualité physique du sol, Dexter (2004) a développé l'indicateur « S », déterminé comme la pente au point d'inflexion de la courbe de rétention en eau du sol. Laroche *et al.* (2006) proposent la réserve utile. Il est néanmoins difficile de concevoir que l'utilisation d'un unique indicateur permette de représenter le fonctionnement global d'un sol et être sensible à toutes les atteintes qu'il puisse subir (Gil-Sotres *et al.*, 2005).

Doran et Parkin (1994) ont ainsi défini les critères qu'un bon IQS devait respecter: représenter les processus actifs de l'écosystème étudié, intégrer les processus physiques, chimiques et biologiques, être accessible à des utilisateurs variés et, être sensible aux modifications du climat et de l'usage. Au final, la plupart des auteurs s'accorde sur le fait que la détermination d'un IQS doit être basée, telle que la définition l'exige, sur les fonctions du sol (Doran *et al.*, 1996 ; Carter *et al.*, 1997 ; Karlen *et al.*, 1997 ; Haygarth et Ritz, 2009), et doit refléter sa multifonctionnalité (Nortcliff, 2002). Il devient ainsi évident que les indices intégrant plusieurs indicateurs sont les plus appropriés. Le choix des gammes de valeurs acceptables pour chaque indicateur et la manière de les combiner et de les pondérer au sein d'un IQS sont néanmoins sujets à discussion.

TOUR D'HORIZON DES MÉTHODES MULTIPARAMÉTRIQUES

La mise en œuvre de méthodes multiparamétriques demande, par définition, de synthétiser l'ensemble des informations

portées par les différents indicateurs, sans altérer la réalité. Dans cette synthèse, nous classons les méthodes existantes en trois catégories: les méthodes arithmétiques, écart à la référence et qualitatives.

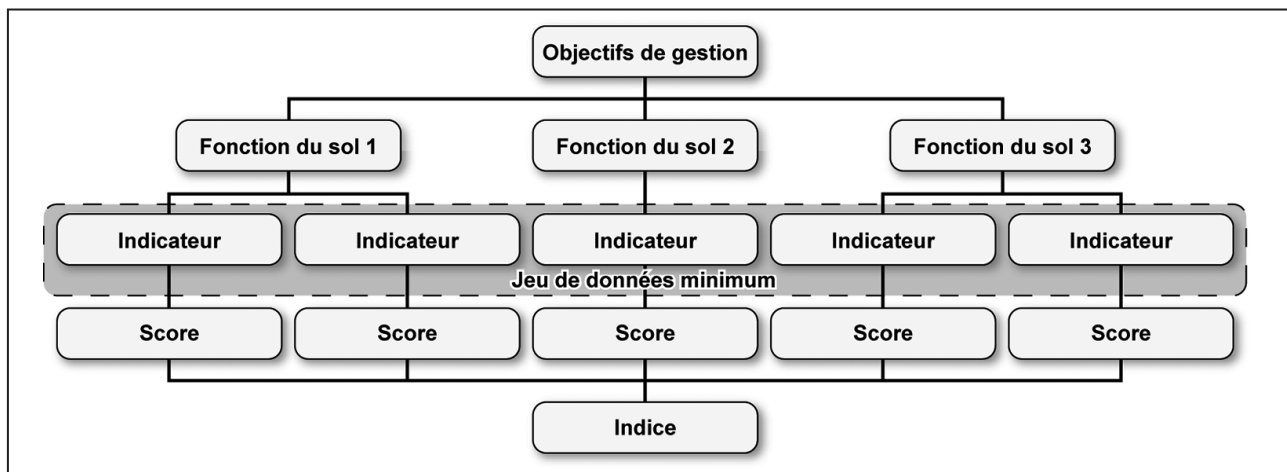
Les méthodes arithmétiques

Les méthodes arithmétiques se présentent essentiellement sous la forme d'un indice additif. C'est l'un des tous premiers IQS créé, à l'origine, pour des usages agricoles et une échelle parcellaire (Karlen *et al.*, 1994). Évaluer la gestion des sols à une échelle fine est en effet considéré comme plus aisé (Carter *et al.*, 1997). Il a ensuite été adapté à d'autres milieux, par l'utilisation d'indicateurs appropriés, et à des échelles d'évaluation plus larges, du bassin-versant à la région. L'indice additif est depuis lors couramment utilisé. Karlen *et al.* (2003) recommandent une démarche de construction en cinq étapes (figure 1).

La première étape consiste à identifier les fonctions du sol pertinentes pour les objectifs de gestion préalablement définis. Des indicateurs sont alors sélectionnés pour caractériser les fonctions du sol. L'ensemble de ces indicateurs constitue le JDM. À chaque indicateur est attribuée une note par l'intermédiaire de « fonctions score ». L'utilisation de scores permet l'agrégation d'indicateurs physiques, chimiques ou biologiques possédant des gammes de valeurs et des unités différentes. La dernière étape consiste à combiner ces valeurs en un indice unique. C'est une somme simple ou pondérée des scores obtenus par les différents indicateurs (Kelting *et al.*, 1999 ; Andrews *et al.*, 2004 ; Mohanty *et al.*, 2007 ; Marzaioli *et al.*, 2010). Une variante de cette démarche consiste à réaliser l'agrégation au niveau des fonctions du sol (Glover *et al.*, 2000 ; Diack et Stott, 2001). Nous pouvons également citer le calcul de l'IQS repris par Qi *et al.* (2009) et Rahmanipour *et al.* (2014) - dont l'utilisation est plus marginale - utilisant la moyenne et le minimum des scores

Figure 1 - Démarche de construction de l'indice additif (d'après Karlen *et al.*, 2003).

Figure 1 - General procedure for building the additive index (from Karlen *et al.*, 2003).



obtenus, afin de prendre en compte les facteurs limitants de la production agricole.

L'approche à dire d'experts

Les IQS les plus simples sur le modèle additif sont en grande partie conçus par expertise, notamment lors du choix d'un JDM, de la pondération ou lors de la définition de la fonction score. La méthode Delphi est en particulier utilisée afin d'accorder les points de vue d'un panel d'experts (Qi et al., 2009 ; Rodríguez et al., 2016).

Les fonctions score correspondent à des courbes de réponse indicateur/qualité, permettant d'évaluer la contribution d'un indicateur à la qualité du sol. Le score est normalisé, de 0 à 1, sans unité. Les fonctions score les plus fréquemment utilisées dans l'approche à dire d'experts sont les fonctions sigmoïdes, associées aux fonctions optimum, et les fonctions linéaires-plateau (figure 2) (Glover et al., 2000 ; Sun et al., 2003 ; Andrews et al., 2004 ; Bastida et al., 2006 ; Qi et al., 2009). La forme de la fonction score est basée sur la connaissance de la variation d'un indicateur par rapport à un objectif de gestion (environnemental, de productivité, etc.). Bien que s'appuyant sur des acquis scientifiques, les fonctions score sont par essence des approximations d'une réalité complexe. Lilburne et al. (2004) ont ainsi fait appel à un groupe d'experts pour concevoir des fonctions score « réalistes » se rapprochant au plus près de la réalité du milieu (figure 2). Outre la forme de la fonction score, l'expertise intervient dans le choix des seuils pour lesquels la valeur de l'indicateur est considérée comme acceptable. Ils sont définis à partir de limites biologiques et environnementales reconnues, ou de classes traditionnelles de la fertilité du sol (Kirchmann et Andersson, 2001). La construction de ces fonctions score demande en général une très bonne connaissance du comportement de chaque indicateur au sein de l'écosystème étudié (Andrews et al., 2002a).

L'approche statistique

Afin d'échapper à la subjectivité induite par l'expertise, certains auteurs construisent leur indice additif à partir de méthodes statistiques (Bastida et al., 2006), en s'appuyant sur la démarche conçue par Andrews et al. (2002b). Dans ce type d'approche, un grand nombre d'indicateurs est d'abord mesuré en différents sites d'étude. C'est le jeu de données total. À partir du jeu de données total, un ensemble de traitements statistiques est ensuite mis en œuvre pour sélectionner un JDM, pour l'attribution des scores et/ou pour la définition de la pondération.

Pour la sélection d'un JDM, les analyses en composantes principales et les analyses factorielles sont très souvent utilisées (Andrews et al., 2002b ; Lilburne et al., 2004 ; Bastida et al., 2006 ; Rezaei et al., 2006, Armenise et al., 2013). Andrews et al. (2002b) affirment, en effet, que les premières composantes issues de l'analyse en composantes principales permettent de représenter les caractéristiques du système sol. Une étape de présélection

des indicateurs est parfois réalisée. Par exemple, Andrews et al. (2002b), Sharma et al. (2005), Govaerts et al. (2006) et Armenise et al. (2013) ne retiennent que les indicateurs qui montrent des différences significatives entre les diverses pratiques culturales testées, à l'aide d'analyses de variance. Rezaei et al. (2006) retiennent les indicateurs qui montrent une forte corrélation avec des paramètres d'objectif (ex.: rendement). Au cours de ces traitements, les indicateurs sont injectés le plus objectivement possible. Certains sont donc potentiellement redondants et sont exclus à partir de paramètres statistiques (Andrews et al., 2002b ; Sharma et al., 2005 ; Li et al., 2007).

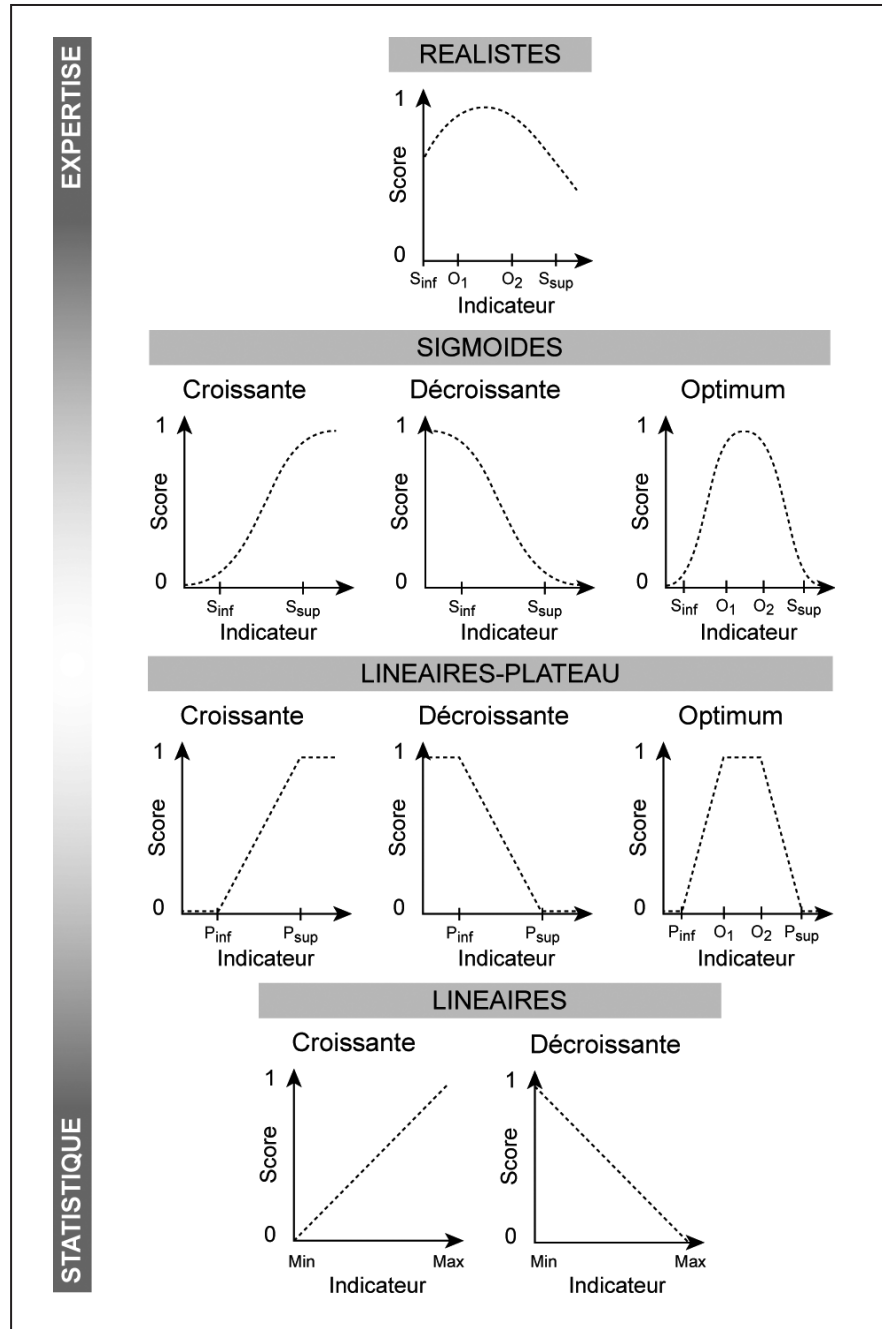
L'analyse statistique intervient parfois dans la définition des poids à accorder à chaque indicateur dans le calcul d'un indice additif pondéré. À titre d'exemple, Mohanty et al. (2007) ont utilisé les coefficients de détermination R^2 des régressions linéaires simples entre les différents indicateurs mesurés et le rendement des parcelles étudiées. En utilisant une analyse en composantes principales, la pondération a également été définie par le pourcentage de variance expliquée (Andrews et al., 2002b ; Sharma et al., 2005 ; Armenise et al., 2013). Afin d'introduire à la fois des variables qualitatives et quantitatives dans l'IQS, de Paul Obade et Lal (2016) dérivent la pondération d'une régression par les moindres carrés partiels. Lilburne et al. (2004) s'interrogent néanmoins sur la pertinence de la pondération statistique par rapport à la réalité du milieu et choisissent de ne pas l'appliquer.

Contrairement aux méthodes à dire d'experts utilisant des fonctions score non linéaires, des fonctions score linéaires sont définies dans le cas de l'approche statistique, en utilisant l'ensemble du jeu de données (Liebig et al., 2001 ; Sharma et al., 2005 ; Dawson et al., 2007 ; Marzaioli et al., 2010) (figure 2). Pour un indicateur donné et pour une fonction score croissante, chaque valeur du jeu de données est divisée par la valeur maximale mesurée et la valeur maximale obtient alors un score de 1. L'utilisation de fonctions score linéaires est largement dépendante du jeu de données initial et peut biaiser les scores si ce jeu de données contient des valeurs anormales (Andrews et al., 2002a). Afin de limiter l'effet de ces valeurs anormales, des fonctions score « linéaires-plateau » sont utilisées. Elles n'utilisent plus les valeurs extrêmes, mais les percentiles de la distribution du jeu de données (Idowu et al., 2008). La fonction score est alors linéaire croissante ou décroissante entre ces deux seuils (figure 2). Bastida et al. (2006) centrent quant à eux une courbe sigmoïde sur la valeur moyenne de leur jeu de données.

Ce type d'approche statistique nécessite un jeu de données total de taille conséquente, afin qu'il soit considéré comme représentatif des sols étudiés. Étant donné la méthode de construction de l'IQS, les résultats sont des valeurs relatives, représentatives d'un contexte pédoclimatique et d'usages spécifiques. Ainsi, Mukherjee et Lal (2014) considèrent qu'une fois le JDM établi, l'approche statistique permet d'observer des évolutions de la qualité des sols dans le temps, pour une combinaison sol/système de culture donnée. Les coûts liés à la mesure des

Figure 2 - Les différents types de fonctions score selon le degré d'expertise requis (S_{inf} : seuil inférieur, S_{sup} : seuil supérieur, O_1 - O_2 : gamme optimale, P_{inf} : percentile inférieur, P_{sup} : percentile supérieur). Synthétisé d'après Hussain *et al.* (1999), Glover *et al.* (2000), Andrews *et al.* (2002b), Lilburne *et al.* (2004) et Idowu *et al.* (2008).

Figure 2 - The different types of score functions depending on the level of expert knowledge required (S_{inf} : lower threshold, S_{sup} : upper threshold, O_1 - O_2 : optimal range, P_{inf} : lower percentile, P_{sup} : upper percentile). Summarized from Hussain *et al.* (1999), Glover *et al.* (2000), Andrews *et al.* (2002b), Lilburne *et al.* (2004), and Idowu *et al.* (2008).



propriétés du sol d'un jeu de données total s'en trouvent ainsi réduits (Mukherjee et Lal, 2014). Ces IQS ne peuvent donc pas être utilisés pour la comparaison de zones d'étude sans reprendre l'intégralité du traitement statistique. Le protocole statistique est quant à lui transférable à n'importe quel contexte, puisqu'il n'utilise aucun seuil ou valeur de référence. C'est la recherche d'une certaine objectivité qui a conduit à l'utilisation de méthodes statistiques. Cette objectivité totale n'est pourtant pas atteinte. En effet, des règles de décision sont préalablement établies et

un premier ensemble d'indicateurs à mesurer, le jeu de données total, est choisi avant la sélection statistique du JDM. Le fait d'obtenir des JDM différents selon la zone étudiée, avec une méthode de sélection similaire, démontre qu'il n'existe pas de JDM universel, valide en tout contexte, comme l'énoncent Brejda *et al.* (2000).

Les cartes de scores

La méthode des cartes de score constitue une variante de l'indice additif, car elle est basée sur une somme simple ou pondérée d'indicateurs issus uniquement d'observations de terrain (Ditzler et Tugel, 2002 ; Shepherd, 2009 ; Mueller *et al.*, 2012). Elle est fondée sur le principe que de nombreux indicateurs physiques, biologiques et parfois chimiques peuvent être déterminés visuellement (Shepherd, 2000). Cette méthode vise en particulier les agriculteurs souhaitant évaluer la qualité de leurs sols et de leurs pratiques facilement, rapidement et à faible coût. C'est donc un contexte agricole et une échelle parcellaire qui sont concernés. Les utilisateurs sont guidés par des « cartes de scores », sur lesquels ils reportent les résultats. Des indicateurs sont choisis comme faciles à estimer sur le terrain de façon qualitative, nommés « indicateurs locaux », par opposition aux « indicateurs techniques » mesurés en laboratoire (Barrios *et al.*, 2006). Les classes attribuées aux indicateurs sont volontairement simples (ex.: mauvais, moyen, bon). La sensibilité de ces indicateurs vis-à-vis d'un changement du milieu peut néanmoins être questionnée. Si un déclin de la qualité du sol est visible à l'œil nu, les processus de dégradation mis en cause sont probablement très avancés et il peut être déjà trop tard pour planifier des actions à mettre en œuvre pour y remédier (Nortcliff, 2002).

Les méthodes « écart à la référence »

Le second type d'IQS compare les sols évalués à un sol de référence, considéré comme de bonne qualité. Toute la difficulté réside alors dans la définition du sol de qualité optimale. De nombreuses recherches ayant porté sur la qualité des sols agricoles, la qualité d'un sol a souvent été reliée à une bonne productivité, pour une atteinte à l'environnement réduite (Gil-Sotres *et al.*, 2005). Fedoroff (1987) a tenté d'introduire une approche plus objective, avec la notion de climax. Un sol est défini comme sol de référence s'il est en équilibre avec son environnement, c'est-à-dire sous une végétation climacique. L'impact anthropique y est minime. Ainsi, il existe plusieurs types de sols climaciques, en fonction de la zone géographique considérée. À partir de ce postulat, divers auteurs ont tenté de modéliser l'équilibre existant entre les différentes propriétés du sol à l'aide de régressions linéaires multiples (Trasar-Cepeda *et al.*, 1998 ; Zornoza *et al.*, 2008), principalement sous des usages forestiers (Zornoza *et al.*, 2015). Ainsi, Zornoza *et al.* (2008) estiment les teneurs en azote et en carbone organique à partir de modèles établis sur des sols climaciques. La différence entre les teneurs estimées et réelles constitue l'IQS.

Afin de faciliter le diagnostic, certains auteurs introduisent la notion d'usage des sols. L'indice BISQ (*Biological Indicator for Soil Quality*), issu du réseau de surveillance de la qualité des sols néerlandais, est un exemple d'IQS de type « écart à la référence » (Rutgers *et al.*, 2008). Afin d'établir cet IQS, des analyses chimiques et biologiques ont porté sur des combinaisons

d'usages forestiers, agricoles et urbains, et de types de sols à l'échelle nationale. Au sein de ce jeu de données, des experts ont identifié des sites de référence en termes de qualité du sol et de durabilité des pratiques culturales pour chaque combinaison usage/type de sol. Les résultats de l'IQS sont ainsi donnés sous forme de pourcentages par rapport à la valeur moyenne des sites de référence. L'utilisation de sols existants comme référence permet de prendre en compte les interactions entre les différents indicateurs, c'est-à-dire que les valeurs optimales de chaque indicateur sont cohérentes entre elles (ex.: la teneur en matière organique optimale est cohérente avec la texture). L'inconvénient majeur est que les sites choisis comme référence ne constituent pas nécessairement un optimum pour une combinaison usage/type de sol donnée et qu'il pourrait exister des combinaisons de meilleure qualité non échantillonnées (Rutgers *et al.*, 2008). De plus, certaines pratiques modifient les propriétés du sol et conduisent au dépassement des valeurs du sol de référence. L'IQS établi par Vrščaj *et al.* (2008), adapté pour le milieu urbain, mesure un écart de classes d'indicateurs par rapport à la classe requise pour un usage donné. L'IQS final est une somme pondérée des écarts à la référence.

Les méthodes qualitatives

Les méthodes qualitatives sont des méthodes empiriques, construites à partir de règles de décision fondées sur la connaissance des processus naturels. Leur formalisme étant bien moins rigide que celui des méthodes arithmétiques, il existe une grande variété de méthodes. Nous présentons ici quelques exemples.

Facteurs limitant l'usage

Le système support de décision MicroLEIS DSS (De la Rosa *et al.*, 2004) permet d'estimer l'adéquation entre les sols et des usages agricoles et forestiers sous climat méditerranéen. Il est construit avec une approche qualitative en utilisant la notion de facteur limitant. Si un seul des indicateurs n'est pas compris dans la gamme de valeurs permettant un bon développement végétal, cet indicateur est considéré comme un facteur limitant et il n'y a pas adéquation du sol avec le type de culture ou l'espèce végétale évaluée.

Dans l'approche utilisée par Halvorson *et al.* (1996) et Diadato et Ceccarelli (2004) sur des parcelles agricoles, les indicateurs du JDM sont comparés à des valeurs seuils, dépendantes de données réglementaires, environnementales ou de la distribution statistique du jeu de données. L'IQS est ensuite fourni sous la forme d'un nombre de dépassements de seuils. Il convient alors de définir le nombre de dépassements autorisés pour que la qualité du sol soit considérée comme acceptable.

Sanchez *et al.* (2003) proposent l'utilisation du système de classification des sols par aptitude à la fertilité de Buol *et al.* (1975). Selon une nomenclature bien définie, un code est attribué aux unités de sols cartographiées, indiquant clairement quel est

le facteur limitant de la croissance végétale. Ce type d'approche permet une vision globale et rapide des propriétés du sol, plus synthétique qu'une carte des sols accompagnée de sa notice. Aucune autre information n'étant apportée, c'est donc à l'utilisateur d'évaluer l'adéquation du sol avec l'usage envisagé au vu des contraintes identifiées. La méthode ainsi proposée est celle utilisée pour l'élaboration des cartes thématiques dérivées des cartes pédologiques (ex.: aptitude agricole, à l'irrigation, à l'épandage).

Les méthodes hiérarchiques

L'IQS développé par Bohanec *et al.* (2007) utilise une méthode hiérarchique, c'est-à-dire qu'il existe plusieurs niveaux emboîtés auxquels l'évaluation est réalisée. Il convient de noter qu'on ne parle pas ici des classifications ascendantes ou descendantes hiérarchiques utilisées en statistique et permettant de rassembler des individus en groupes homogènes. Dans l'IQS de Bohanec *et al.* (2007), les données brutes, au niveau le plus bas, sont de plus en plus agrégées jusqu'à déterminer la qualité du sol. L'agrégation est réalisée à l'aide de règles de décision établies par expertise, du type « si..., alors... », ce qui permet de prendre en compte l'interaction entre les indicateurs. Une note est exprimée à chaque niveau de ce modèle hiérarchique. L'utilisateur peut ainsi observer les résultats intermédiaires et identifier les facteurs limitants. Néanmoins, le nombre important d'agré-gations (*i.e.*, 13) à réaliser avant d'obtenir le résultat de l'IQS peut entraîner une accumulation des approximations.

Kaufmann *et al.* (2009) et Ferraro (2009) enrichissent l'approche hiérarchique en mettant en pratique le concept de logique floue. Contrairement à la méthode hiérarchique qui manipule des classes, les systèmes experts flous permettent de prendre en compte les incertitudes sur la façon de représenter la contribution d'un indicateur à une fonction des sols et celle des fonctions à la qualité du sol (Kaufmann *et al.*, 2009).

VALIDATION DES INDICES DE QUALITÉ DES SOLS

Dans certains contextes, il est possible de valider la méthode mise en œuvre. Des données de terrain sont alors comparées aux résultats de l'IQS. Cette validation est souvent réalisée à l'aide de corrélations ou de régressions linéaires simples ou multiples sur des paramètres d'objectif (Andrews *et al.*, 2002b ; Andrews *et al.*, 2004 ; Rezaei *et al.*, 2006 ; Qi *et al.*, 2009 ; Mukherjee et Lal, 2014). Les régressions permettent également de tester la validité du JDM (Andrews *et al.*, 2002b ; Andrews *et al.*, 2004 ; Rezaei *et al.*, 2006), et l'efficacité des fonctions score est parfois observée à l'aide d'analyses de variance (Andrews *et al.*, 2004). Zornoza *et al.* (2008) vérifient que la calibration de leur indice « écart à la référence » est toujours valide après un an. Ils testent également la méthode sur d'autres sites d'étude, tout comme le réalisent

Andrews *et al.* (2004) avec changement d'échelle, Brejda *et al.* (2000) ou Velasquez *et al.* (2007). Ce travail de validation n'étant pas réalisé de façon systématique, les IQS proposés ne peuvent pas toujours être considérés comme entièrement opérationnels. En comparant plusieurs méthodes de construction d'IQS (*i.e.*, les indices additifs simples, pondérés et statistiques, utilisant un JDM ou un jeu de données total), Mukherjee et Lal (2014) et Cherubin *et al.* (2016) ont observé des résultats suffisamment corrélés pour recommander l'utilisation de la plus simple des méthodes. L'étude de Cherubin *et al.* (2016) a également conclu que la méthode additive pondérée, utilisant le jeu de données total, était la plus sensible aux changements d'usage des sols.

DISCUSSION

Les méthodes existantes sont-elles pertinentes ?

Les avantages et les inconvénients de chacune des méthodes d'estimation de la qualité des sols étudiées dans cette synthèse sont présentés dans le *tableau 1*. Une grande partie des IQS a été développée sur le modèle additif à dire d'experts. Il a démontré son caractère opérationnel, puisqu'il est d'ores et déjà adopté par une partie des utilisateurs visés grâce à la simplicité du concept et à la mise à disposition d'outils. Des réserves quant à sa validité ont néanmoins été émises. La pertinence d'une combinaison linéaire ne peut être établie qu'en opérant des régressions multiples sur des paramètres d'objectifs agronomiques ou environnementaux. La qualité d'un sol est alors souvent associée à une bonne productivité agricole et cette méthode n'est pas transposable en milieu non agricole. La recherche d'une certaine objectivité et d'un fondement scientifique plus robuste ont ensuite mené à l'utilisation de plus en plus courante d'indices additifs calculés sur des bases statistiques. Ces méthodes statistiques demandent un jeu de données important en termes d'indicateurs et de situations à décrire (*i.e.*, climat, usages, types de sols) pour être représentatives. L'objectivité de la démarche évite ainsi les raccourcis quant au déclassement des sols en milieu urbain. Un autre intérêt réside dans l'étape de présélection des indicateurs du JDM, car elle permet de ne retenir que les plus pertinents en fonction des objectifs de l'étude et d'éliminer les indicateurs redondants. Dans le cas de la surveillance d'une zone d'étude donnée au cours du temps, les coûts liés à la mesure des indicateurs s'en trouvent alors réduits. Si les résultats ne peuvent pas être comparés à d'autres zones d'étude, la méthode est quant à elle entièrement transférable à d'autres contextes pédologiques, climatiques ou d'usages, puisqu'elle ne contient aucune référence à un milieu spécifique. Cependant, comme la construction des axes de l'analyse en composantes principales est basée sur l'explication de la plus

Tableau 1 - Comparaison des différentes méthodes d'estimation de la qualité des sols.**Table 1** - Comparison of the different methods for soil quality assessment.

	Avantages	Inconvénients
Méthode arithmétique: à dire d'experts	<ul style="list-style-type: none"> - Nombreuses ressources bibliographiques - Concept simple 	<ul style="list-style-type: none"> - Pertinence d'une combinaison linéaire d'indicateurs ? - Demande une très bonne connaissance des indicateurs dans le milieu considéré pour le choix des fonctions score et de la pondération - Essentiellement utilisable en contexte agricole - Ne permet pas d'identifier les facteurs limitants
Méthode arithmétique: statistique	<ul style="list-style-type: none"> - Objectivité - Adaptable à tous contextes pédologiques, climatiques et d'usages - Permet d'éliminer les indicateurs redondants - Ne nécessite pas de connaissances approfondies en pédologie 	<ul style="list-style-type: none"> - Pertinence d'une qualité dérivée d'une variabilité statistique ? - Comparaisons entre sites d'étude impossibles si les résultats ne sont pas issus du même traitement statistique - Requiert un jeu de données de taille importante - Résultat dépendant du jeu de données à disposition - Nécessite des connaissances en statistiques - Ne permet pas d'identifier les facteurs limitants
Cartes de scores	<ul style="list-style-type: none"> - Application rapide, faible coût 	<ul style="list-style-type: none"> - Uniquement adaptée à un contexte agricole et une échelle parcellaire - Faible sensibilité des indicateurs utilisés - Nécessite une formation sur le terrain - Nécessite d'être réalisée par le même opérateur pour des comparaisons temporelles et entre sites
Ecart à la référence	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptée à tous contextes pédologiques, climatiques et d'usages - Permet de prendre en compte les interactions entre indicateurs 	<ul style="list-style-type: none"> - Pertinence de la comparaison d'un sol climacique avec des sols dédiés à d'autres usages ? - Difficulté pour la définition d'un sol de référence
Méthodes qualitatives	<ul style="list-style-type: none"> - Concept reconnu par les pédologues - Adaptée à tous contextes pédologiques, climatiques et d'usages - Permet d'identifier les facteurs limitants 	<ul style="list-style-type: none"> - Demande une très bonne connaissance des indicateurs dans le milieu considéré

grande proportion de variance, la définition de la qualité d'un sol ne semble associée qu'à la variabilité statistique du jeu de données. Andrews *et al.* (2002b) affirment que les facteurs identifiés sont représentatifs des caractéristiques du système sol, mais cela nous semble insuffisant pour en qualifier la qualité. Le résultat est donc largement dépendant du jeu de données à disposition et ces IQS ne semblent pas réellement opérationnels hors d'un contexte de recherche scientifique. Comme il n'est pas toujours aisé de relier le résultat d'une analyse statistique à la qualité du sol, ces méthodes se limitent parfois, à juste titre, à la sélection d'un JDM (Govaerts *et al.*, 2006 ; Rezaei *et al.*, 2006 ; Li *et al.*, 2007).

Les méthodes « écart à la référence » posent assez rapidement le problème de la définition de la référence. Un sol de référence, n'ayant subi aucune perturbation anthropique, reste rare et est parfois absent de la zone d'étude considérée (Gil-Sotres *et al.*, 2005). Nous pouvons par ailleurs nous interroger sur la pertinence et le réel apport d'information d'une comparaison entre un sol sous végétation climacique et un sol soumis à un autre usage.

La définition d'une référence pour une combinaison usage/type de sol demande quant à elle une très bonne connaissance de la zone d'étude, puisqu'il s'agit d'identifier les sols de la meilleure qualité ou, selon une approche plus holistique, les pratiques de gestion les plus durables, avant même de mettre en œuvre le diagnostic.

Enfin, les méthodes qualitatives utilisant la notion de contrainte en fonction de l'usage semblent représenter la meilleure alternative. Ces méthodes sont particulièrement adaptées lorsqu'il s'agit de définir l'adéquation entre un sol et un usage, qu'il soit urbain, agricole ou forestier. Cette démarche, se basant sur les facteurs limitants, se rapproche de celle des études d'aptitude des sols couramment établies en milieux agricoles et souvent associées à des propositions d'aménagement. Elle autorise l'identification facile des facteurs limitants, tout comme elle permettent les méthodes hiérarchiques. Les méthodes qualitatives, entièrement construites par expertise, demandent une très bonne connaissance des propriétés du sol et de leurs interactions possibles dans le milieu considéré.

Vers une meilleure acceptation du concept d'IQS ?

Le concept de qualité des sols est confronté à de nombreuses difficultés de mise en œuvre, liées notamment à l'interaction des processus affectant les sols, ainsi qu'à la variabilité des propriétés les caractérisant à l'échelle spatiale et temporelle. À cette complexité, se superpose l'effet des activités humaines à travers de multiples utilisations du sol et techniques de gestion. Le concept d'IQS est ainsi soumis à critiques. Une meilleure acceptation apparaît pourtant essentielle si l'on souhaite utiliser un IQS dans le cadre de l'aménagement du territoire. Nous pensons qu'une meilleure acceptation du concept d'IQS peut être atteinte à l'aide de choix méthodologiques adaptés à la complexité du sol et de ses usages.

Les opposants à l'utilisation d'indices dans le diagnostic ou le suivi de la qualité des sols soulignent que le sol ne possède pas d'état « standard » ou « pur » contrairement à l'eau et à l'air, ce qui constitue une difficulté majeure pour la conception des IQS (Sojka et Upchurch, 1999 ; Letey *et al.*, 2003). L'eau et l'air peuvent être caractérisés par des propriétés physiques, chimiques ou biologiques, lesquelles sont comparées à des seuils à ne pas dépasser. Cette démarche n'est plus directement applicable dans le cas des sols, puisque les indicateurs mesurés présentent des gammes de valeurs très différentes selon les contextes pédoclimatiques et d'usages. Il existe, de plus, de nombreuses interactions entre ces différents indicateurs (Arshad et Martin, 2002). La difficulté réside alors dans le fait de pouvoir représenter une réalité complexe à partir de quelques propriétés du sol. Certains considèrent cette tâche impossible (Sojka et Upchurch, 1999 ; Letey *et al.*, 2003). À travers cette synthèse des méthodes de construction des IQS, nous avons pourtant identifié quelques approches judicieuses. En particulier, nous pensons comme certains auteurs que la notion de qualité des sols n'est pas dissociable de la notion d'usage (Sojka et Upchurch, 1999 ; Lilburne *et al.*, 2004 ; Vrščaj *et al.*, 2008). En reprenant la comparaison avec l'eau et l'air, l'apparente facilité dans le choix de leurs critères de qualité est liée au fait que l'eau et l'air sont essentiellement envisagés à travers leurs liens avec la santé humaine (Bispo *et al.*, 2011). Il existe ainsi des usages prépondérants de l'eau et de l'air, liés à la consommation humaine, sur lesquels sont fondés les diagnostics et les seuils. Sur le même principe pour les sols, avec une approche par les usages, les objectifs à atteindre sont plus clairement identifiés : quelles sont les fonctions à satisfaire pour avoir une adéquation de l'usage avec le sol considéré ? Les seuils à ne pas dépasser sont alors spécifiques d'un usage donné et plus faciles à établir. Cette approche permet également de reconnaître la diversité des usages que peut accueillir un sol afin de ne pas compromettre des usages futurs. De plus, en procédant de la sorte, l'estimation de la qualité du sol convient à des préoccupations situées aussi bien en contexte rural qu'en contexte urbain (Doran *et al.*, 1996 ; Carter *et al.*, 1997 ; Karlen *et al.*, 1997).

Un certain nombre de critiques liées aux IQS a également pu naître d'une trop faible conscience du rôle de l'échelle d'évaluation dans la résolution d'un tel indice. À titre d'illustration, dans le domaine agricole, un sol peut être de bonne qualité pour une culture, mais de mauvaise qualité pour une autre (Letey *et al.*, 2003). Mohanty *et al.* (2007) ont par exemple montré que des sols avec un IQS élevé fournissaient des rendements en blé élevés mais des rendements en riz faibles. Ce problème est en réalité inhérent à l'échelle d'évaluation et confirme la nécessité de raisonner en termes d'usages. Comme c'est le cas dans tout diagnostic, la finesse du résultat dépend de la finesse de la donnée d'entrée. Dans le cas d'une évaluation à l'échelle parcellaire en milieu agricole, les différents types de cultures devraient être considérés comme autant d'usages différents, tel que le réalise par exemple le système support de décision MicroLEIS DSS (De la Rosa *et al.*, 2004). L'étape du choix des indicateurs du JDM est alors d'une importance particulière, tout comme la liste des usages, découpée plus ou moins finement, sur laquelle porte l'évaluation.

Letey *et al.* (2003) relèvent par ailleurs qu'un sol « bon » pour une fonction peut être « mauvais » pour une autre. Il semble ainsi difficile d'attribuer une note de qualité à un tel sol. Ce problème naît de l'agrégation des indicateurs en une note unique. Nous regrettons ainsi le faible nombre d'IQS permettant de mettre en évidence les facteurs limitants en n'agrégant pas les indicateurs. Certains auteurs ont pourtant mentionné une volonté de la part d'agriculteurs de pouvoir observer la complexité de leurs sols à travers un indice non agrégé (Ditzler et Tugel, 2002 ; Wander *et al.*, 2002). Nous proposons donc une solution alternative à l'agrégation : placer l'IQS à l'échelle des fonctions. Ainsi, chaque fonction est évaluée et un résultat global est éventuellement fourni sous la forme d'un nombre de fonctions satisfaites. C'est la multifonctionnalité du sol qui peut ainsi être évaluée. Dans le même esprit, Lilburne *et al.* (2004) ont choisi de fournir un IQS sous la forme de quatre composantes de la qualité (*i.e.*, ressource organique, état physique, fertilité et acidité). Velasquez *et al.* (2007) utilisent la notion de sous-indicateurs et Halvorson *et al.* (1996) parlent d'un nombre de dépassements de seuil. Bone *et al.* (2010) proposent même un diagnostic indépendant des fonctions du sol et sans agrégation, par l'utilisation d'indicateurs « transfonctionnels ». Dans tous les cas, l'avantage est de pouvoir identifier rapidement l'indicateur révélant la non-adéquation, voire de planifier des actions à mettre en œuvre pour y remédier.

CONCLUSION

Les IQS sont utilisés avec deux objectifs bien distincts : évaluer la capacité d'un sol à remplir des fonctions indépendamment d'un usage (qualité intrinsèque) et estimer l'efficacité et le caractère durable de son fonctionnement au sein de son écosystème

sous un certain usage (qualité dynamique). Diverses méthodes ont été développées, une grande majorité traitant de la qualité dynamique, notamment pour des usages agricoles. Peu sont dédiées à l'aménagement du territoire, permettant de réfléchir à l'adéquation de sols pour différents usages.

À l'heure actuelle, il n'existe pas d'IQS universel, applicable à tous contextes, objectifs et échelle d'évaluation. Il reste cependant une marge de manœuvre dans l'amélioration de l'adéquation des IQS à leur application. Il apparaît en particulier évident que la prise en compte de la qualité des sols dans l'aménagement du territoire implique des IQS adaptés et probablement plus polyvalents. Ainsi, le caractère générique d'un tel IQS devra sans doute passer par un indice méthodologiquement robuste mais modulable en termes d'usages, de types de sols et d'échelles d'étude (Keller et al., 2012). Dans ce sens, les méthodes qualitatives apparaissent les plus prometteuses. Elles répondent aux critères requis pour une utilisation dans le cadre de l'aménagement du territoire puisqu'elles s'avèrent faciles d'utilisation, adaptées à divers usages, utilisables par une diversité d'acteurs et proches de la réalité du milieu, bien que s'appuyant essentiellement sur la connaissance d'experts. Enfin, il semble possible de passer outre certaines difficultés reconnues dans la conception de tels indices, en stratifiant judicieusement les usages et les fonctions du sol à prendre en compte selon l'échelle d'évaluation et en évitant l'agrégation des indicateurs en une note unique.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Antonio Bispo et Joël Moulin pour leurs critiques très constructives d'une première version de cet article. Ce travail a été financé par le programme GESSOL (Fonctions environnementales et gestion du patrimoine sol) du ministère en charge de l'écologie et du développement durable et de l'ADEME (conventions S.7 0006897, S.7 0006898 et S.7 0006899) et par l'Observatoire Hommes-Milieus du bassin minier de Provence (OHM-BMP, CNRS).

BIBLIOGRAPHIE

- Andrews S.S., Karlen D.L. et Mitchell J.P., 2002a - A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 90, 1, pp. 25-45.
- Andrews S.S., Mitchell J.P., Mancinelli R., Karlen D.L., Hartz T.K., Horwath W.R., Pettygrove G.S., Scow K.M. et Munk D.S., 2002b - On-farm assessment of soil quality in California's central valley. *Agronomy Journal*, 94, 1, pp. 12-23.
- Andrews S.S., Karlen D.L. et Cambardella C.A., 2004 - The Soil Management Assessment Framework: A quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 6, pp. 1945-1962.
- Antoni V., 2011 - L'artificialisation des sols s'opère aux dépens des terres agricoles. Commissariat Général au Développement Durable, Service de l'observation et des statistiques, Le point sur, 4 p.
- Armenise E., Redmile-Gordon M.A., Stellacci A.M., Ciccarese A. et Rubino P., 2013 - Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. *Soil and Tillage Research*, 130, pp. 91-98.
- Arshad M.A. et Martin S., 2002 - Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88, 2, pp. 153-160.
- Barrios E., Delve R.J., Bekunda M., Mowo J., Agunda J., Ramisch J., Trejo M.T. et Thomas R.J., 2006 - Indicators of soil quality: A South-South development of a methodological guide for linking local and technical knowledge. *Geoderma*, 135, pp. 248-259.
- Bastida F., Luis Moreno J., Teresa H. et García C., 2006 - Microbiological degradation index of soils in a semiarid climate. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 12, pp. 3463-3473.
- Begon J.C., Mori A. et Hardy R., 1978 - Un système de classement des terres suivant leur aptitude à la production agricole. Son application à une région de culture intensive dans le bassin parisien. *Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, pp. 1274-1285.
- Bispo A., Blanchart E. et Delmas A.B., 2011 - Indicateurs de la qualité des sols, pp. 509-527. In: Girard M.C., Walter C., Rémy J.C., Berthelin J. et Morel J.M. (Eds), Sols et environnement, Dunod, Paris.
- Bohanec M., Cortet J., Griffiths B., Znidarsic M., Debeljak M., Caul S., Thompson J. et Krogh P.H., 2007 - A qualitative multi-attribute model for assessing the impact of cropping systems on soil quality. *Pedobiologia*, 51, 3, pp. 239-250.
- Boiffin J., 1980 - Les bases agronomiques de l'évaluation des sols: appréciation et contrôle de la fertilité et des aptitudes culturales. Techniques Agricoles, Paris.
- Bone J., Head M., Barraclough D., Archer M., Scheib C., Flight D. et Voulvoulis N., 2010 - Soil quality assessment under emerging regulatory requirements. *Environment International*, 36, 6, pp. 609-622.
- Brejda J.J., Moorman T.B., Karlen D.L. et Dao T.H., 2000 - Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and Southern High Plains. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 6, pp. 2115-2124.
- Bremer E. et Ellert K., 2004 - Soil quality indicators: A review with implication for agriculture ecosystems in Alberta. Alberta environmentally sustainable agriculture soil quality program, Alberta agriculture, food and rural development, Alberta, 32 p.
- Buol S.W., Sanchez P.A., Cate R.B. et Granger M.A., 1975 - Soil fertility capability classification, pp. 126-141. In: Bornemisza E. et Alvarado A. (Eds), Soil Management in Tropical America, North Carolina State University, Raleigh.
- Carter M.B., Gregorich E.G., Anderson D.W., Doran J.W. et Janzen H.H., 1997 - Concepts of soil quality and their significance, pp. 1-17. In: Gregorich E.G. et Carter M.R. (Eds), Soil quality for crop production and ecosystem health. Elsevier, Developments in Soil Science, Amsterdam.
- Chaer G.M., Myrold D.D. et Bottomley P.J., 2009 - A soil quality index based on the equilibrium between soil organic matter and biochemical properties of undisturbed coniferous forest soils of the Pacific Northwest. *Soil Biology and Biochemistry*, 41, 4, pp. 822-830.
- Cherubin M.R., Karlen D.L., Cerri C.E.P., Franco A.L.C., Tormena C.A., Davies C.A. et Cerri C.C., 2016 - Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. *PLoS ONE*, 11, 3.
- Chéry P., Lee A., Commagnac L., Thomas-Chery A.L., Jalabert S. et Slak M.F., 2014 - Impact de l'artificialisation sur les ressources en sol et les milieux en France métropolitaine. *Cybergeo: European Journal of Geography*, document 668.
- Chevry C. et Gascuel C., 2009 - Sous les pavés la terre. Omniscience, Montreuil, 208 p.
- Dawson J.J.C., Godsiffe E.J., Thompson I.P., Ralebitso-Senior T.K., Killham K.S. et Paton G.I., 2007 - Application of biological indicators to assess

- recovery of hydrocarbon impacted soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 39, 1, pp. 164-177.
- De la Rosa D., Mayol F., Diaz-Pereira E. et Fernandez M., 2004 - A land evaluation decision support system (MicroLEIS DSS) for agricultural soil protection. *Environmental Modelling & Software*, 19, 10, pp. 929-942.
- De la Rosa D. et Sobral R., 2008 - Soil quality and methods for its assessment, pp. 167-200. In: Braimoh A.K. et Vlek P.L.G. (Eds), *Land Use and Soil Resources*, Springer Netherlands, Dordrecht.
- de Paul Obade V. et Lal R., 2016 - Towards a standard technique for soil quality assessment. *Geoderma*, 265, pp. 96-102.
- Dexter A.R., 2004 - Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120, 3-4, pp. 201-214.
- Diack M. et Stott D.E., 2001 - Development of a soil quality index for the Chalmers silty clay loam from the midwest USA, pp. 550-555. In: Stott D.E., Mohtar R.H. et Steinhardt G.C. (Eds), *Sustaining the global farm. Selected paper from the 10th international soil conservation organisation meeting, West Lafayette*.
- Diodato N. et Ceccarelli M., 2004 - Multivariate indicator kriging approach using a GIS to classify soil degradation for Mediterranean agricultural lands. *Ecological Indicators*, 4, 3, pp. 177-187.
- Ditzler C.A. et Tugel A.J., 2002 - Soil quality field tools: Experiences of USDA-NRCS Soil Quality Institute. *Agronomy Journal*, 94, 1, pp. 33-38.
- Doran J.W. et Parkin T.B., 1994 - Defining and assessing soil quality, pp. 3-21. In: Doran J.W., Coleman D.C., Bezdicek D.F. et Stewart B.A. (Eds), *Defining soil quality for a sustainable environment*, SSSA Inc., Madison, WI.
- Doran J.W., Sarrantonio M. et Liebig M., 1996 - Soil health and sustainability, pp. 1-54. In: Sparks D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*, Academic Press, San Diego.
- Doran J.W. et Zeiss M.R., 2000 - Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15, 1, pp. 3-11.
- Fedoroff N., 1987 - The production potential of soils. Part 1. Sensitivity of principal soil types to the intensive agriculture of north-western Europe, pp. 65-86. In: Barth E. et L'Hermite P. (Eds), *Scientific Basis for Soil Protection in the European Community*, Elsevier, London.
- Ferraro D.O., 2009 - Fuzzy knowledge-based model for soil condition assessment in Argentinean cropping systems. *Environmental Modelling & Software*, 24, 3, pp. 359-370.
- Franzluebbers A.J., Zuberer D.A. et Hons F.M., 1995 - Comparison of microbiological methods for evaluating quality and fertility of soil. *Biology and Fertility of Soils*, 19, 2-3, pp. 135-140.
- Gardi C., Tomaselli M., Parisi V., Petraglia A. et Santini C., 2002 - Soil quality indicators and biodiversity in northern Italian permanent grasslands. *European Journal of Soil Biology*, 38, 1, pp. 103-110.
- Gil-Sotres F., Trasar-Cepeda C., Leirós M.C. et Seoane S., 2005 - Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 37, 5, pp. 877-887.
- Glover J.D., Reganold J.P. et Andrews P.K., 2000 - Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 80, 1-2, pp. 29-45.
- Govaerts B., Sayre K.D. et Deckers J., 2006 - A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and Tillage Research*, 87, 2, pp. 163-174.
- Halvorson J.J., Smith J.L. et Papendick R.I., 1996 - Integration of multiple soil parameters to evaluate soil quality: A field example. *Biology and Fertility of Soils*, 21, 3, pp. 207-214.
- Haygarth P.M. et Ritz K., 2009 - The future of soils and land use in the UK: Soil systems for the provision of land-based ecosystem services. *Land Use Policy*, 26, pp. 187-197.
- Huerta E., Kampichler C., Geissen V., Ochoa-Gaona S., de Jong B. et Hernandez-Daumas S., 2009 - Towards an ecological index for tropical soil quality based on soil macrofauna. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 44, 8, pp. 1056-1062.
- Hussain I., Olson K.R., Wander M.M. et Karlen D.L., 1999 - Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil and Tillage Research*, 50, 3-4, pp. 237-249.
- Idowu O.J., van Es H.M., Abawi G.S., Wolfe D.W., Ball J.I., Gugino B.K., Moebius B.N., Schindelbeck R.R. et Bilgili A.V., 2008 - Farmer-oriented assessment of soil quality using field, laboratory, and VNIR spectroscopy methods. *Plant and Soil*, 307, 1-2, pp. 243-253.
- Janvier F., Nirascou F. et Sillard P., 2015 - L'occupation des sols en France: progression plus modérée de l'artificialisation entre 2006 et 2012. Commissariat Général au Développement Durable, Service de l'observation et des statistiques, Le point sur, 4 p.
- Karlen D.L., Wollenhaupt N.C., Erbach D.C., Berry E.C., Swan J.B., Eash N.S. et Jordahl J.L., 1994 - Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn. *Soil and Tillage Research*, 31, pp. 149-167.
- Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., Cline R.G., Harris R.F. et Schuman G.E., 1997 - Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 1, pp. 4-10.
- Karlen D.L., Gardner J.C. et Rosek M.J., 1998 - A soil quality framework for evaluating the impact of CRP. *Journal of Production Agriculture*, 11, 1, pp. 56-60.
- Karlen D.L., Ditzler C.A. et Andrews S.S., 2003 - Soil quality: Why and how? *Geoderma*, 114, 3-4, pp. 145-156.
- Kaufmann M., Tobias S. et Schulin R., 2009 - Quality evaluation of restored soils with a fuzzy logic expert system. *Geoderma*, 151, 3-4, pp. 290-302.
- Keller C., Lambert-Habib M.-L., Robert S., Ambrosi J.-P. et Rabot E., 2012 - Méthodologie pour la prise en compte des sols dans les documents d'urbanisme: application à deux communes du bassin minier de Provence. *Sud-Ouest Européen*, 33, pp. 11-24.
- Kelting D.L., Burger J.A., Patterson S.C., Aust W.M., Miwa M. et Trettin C.C., 1999 - Soil quality assessment in domesticated forests - A southern pine example. *Forest Ecology and Management*, 122, 1-2, pp. 167-185.
- Kirchmann H. et Andersson R., 2001 - The Swedish system for quality assessment of agricultural soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 72, 2, pp. 129-139.
- Laroche B., Thorette J. et Lacassin J.-C., 2006 - L'artificialisation des sols: pressions urbaines et inventaire des sols. *Etude et Gestion des Sols*, 13, 3, pp. 223-235.
- Larson W.E. et Pierce F.J., 1991 - Conservation and enhancement of soil quality. In: *Proceedings of the International Workshop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World. Vol. 2, Technical papers*. International Board for Soil Research and Management, Bangkok, pp. 175-203.
- Letey J., Sojka R.E., Upchurch D.R., Cassel D.K., Olson K., Payne B., Petrie S., Price G., Scott H.D., Smethurst, P. et Triplett G., 2003 - Deficiencies in the soil quality concept and its application. *Journal of Soil and Water Conservation*, 58, 4, pp. 180-187.
- Li G., Chen J., Sun Z. et Tan M., 2007 - Establishing a minimum dataset for soil quality assessment based on soil properties and land-use changes. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 7, pp. 2715-2724.
- Liebig M.A., Varvel G. et Doran J., 2001 - A simple performance-based index for assessing multiple agroecosystem functions. *Agronomy Journal*, 93, 2, pp. 313-318.
- Liebig M.A., Miller M.E., Varvel G.E., Doran J.W. et Hanson J.D., 2004 - AEPAT: Software for assessing agronomic and environmental performance of management practices in long-term agroecosystem experiments. *Agronomy Journal*, 96, 1, pp. 109-115.

- Lilburne L., Sparling G. et Schipper L., 2004 - Soil quality monitoring in New Zealand: Development of an interpretative framework. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104, 3, pp. 535-544.
- Loveland P.J. et Thompson T.R.E., 2002 - Identification and development of a set of national indicators for soil quality. National Soil Resource Institute, R&D Technical report P5-053/2/TR, Bristol, 48 p.
- Marzaioli R., D'Ascoli R., De Pascale R.A. et Rutigliano F.A., 2010 - Soil quality in a Mediterranean area of Southern Italy as related to different land use types. *Applied Soil Ecology*, 44, 3, pp. 205-212.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA), 2005 - Ecosystems and human well-being: Opportunities and challenges for business and industry. World Resources Institute, Washington, DC, 31 p.
- Moffat A.J., 2003 - Indicators of soil quality for UK forestry. *Forestry*, 76, 5, pp. 547-568.
- Mohanty M., Painuli D.K., Misra A.K. et Ghosh P.K., 2007 - Soil quality effects of tillage and residue under rice-wheat cropping on a Vertisol in India. *Soil and Tillage Research*, 92, 1-2, pp. 243-250.
- Mueller L., Schindler U., Shepherd T.G., Ball B.C., Smolentseva E., Hu C., Hennings V., Schad P., Rogasik J., Zeitz J., Schindwein S.L., Behrendt A., Helming K. et Eulenstein F., 2012 - A framework for assessing agricultural soil quality on a global scale. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58, S1, pp. S76-S82.
- Mukherjee A. et Lal R., 2014 - Comparison of soil quality index using three methods. *PLoS ONE*, 9, 8.
- National Research Council, 1993 - Soil and water quality: An agenda for agriculture. National Academy Press, Washington, DC, 542 p.
- Norfleet M.L., Ditzler C.A., Puckett W.E., Grossman R.B. et Shaw J.N., 2003 - Soil quality and its relationship to pedology. *Soil Science*, 168, 3, pp. 149-155.
- Nortcliff S., 2002 - Standardization of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88, pp. 161-168.
- Prokop G., Jobstmann H. et Schönbauer A., 2011 - Overview of best practices for limiting soil sealing or mitigating its effects in EU-27. European Commission, 227 p.
- Qi Y., Darilek J.L., Huang B., Zhao Y., Sun W. et Gu Z., 2009 - Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149, 3-4, pp. 325-334.
- Rahmanipour F., Marzaioli R., Bahrami H.A., Fereidouni Z. et Bandarabadi S.R., 2014 - Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. *Ecological Indicators*, 40, pp. 19-26.
- Rezaei S.A., Gilkes R.J. et Andrews S.S., 2006 - A minimum data set for assessing soil quality in rangelands. *Geoderma*, 136, 1-2, pp. 229-234.
- Rodríguez E., Peche R., Garbisu C., Gorostiza I., Epelde L., Artetxe U., Irizar A., Soto M., Becerril J.M. et Etxebarria J., 2016 - Dynamic quality index for agricultural soils based on fuzzy logic. *Ecological Indicators*, 60, pp. 678-692.
- Rutgers M., Mulder C., Schouten A.J., Bloem J., Bogte J.J., Breure A.M., Brussaard L., de Goede R.G.M., Faber J.H., Jagers op Akkerhuis G.A.J.M., Keidel H., Korhals G.W., Smeding F.W., Ter Berg C. et van Eederen N., 2008 - Soil ecosystem profiling in The Netherlands with ten references for biological soil quality. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Report 607604009/2008, 88 p.
- Sanchez P.A., Palm C.A. et Buol S.W., 2003 - Fertility capability soil classification: A tool to help assess soil quality in the tropics. *Geoderma*, 114, 3-4, pp. 157-185.
- Schlöter M., Dilly O. et Munch J.C., 2003 - Indicators for evaluating soil quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 98, 1-3, pp. 255-262.
- Schoenholtz S.H., Miegroet H.V. et Burger J.A., 2000 - A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: Challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*, 138, 1-3, pp. 335-356.
- Seybold C.A., Mausbach M.J., Karlen D.L. et Rogers H.H., 1998 - Quantification of soil quality, pp. 387-404. In: Lal R., Kimble J.M., Follet R.F. et Stewart B.A. (Eds), Soil processes and the carbon cycle, CRC Press LLC, Boca Raton, FL.
- Sharma K.L., Mandal U.K., Srinivas K., Vittal K.P.R., Mandal B., Grace J.K. et Ramesh V., 2005 - Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. *Soil and Tillage Research*, 83, 2, pp. 246-259.
- Shepherd T.G., 2000 - Visual Soil Assessment. Vol. 1. Field guide for cropping and pastoral grazing on flat to rolling country. horizons.mw & Landcare Research, Palmerston North, 84 p.
- Shepherd T.G., 2009 - Visual Soil Assessment. Vol. 1. Field guide for pastoral grazing and cropping on flat to rolling country, 2nd ed. Horizons Regional Council, Palmerston North, 119 p.
- Shukla M.K., Lal R. et Ebinger M., 2006 - Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil and Tillage Research*, 87, 2, pp. 194-204.
- Sojka R.E. et Upchurch D.R., 1999 - Reservations regarding the soil quality concept. *Soil Science Society of America Journal*, 63, pp. 1039-1054.
- Sun B., Zhou S. et Zhao Q., 2003 - Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma*, 115, 1-2, pp. 85-99.
- Tóth G., Stolbovoy V. et Montanarella L., 2007 - Soil quality and sustainability evaluation. An integrated approach to support soil-related policies of the European Union. Office for Official Publications of the European Communities, EUR 22721 EN, Luxembourg, 40 p.
- Trasar-Cepeda C., Leirós C., Gil-Sotres F. et Seoane S., 1998 - Towards a biochemical quality index for soils: An expression relating several biological and biochemical properties. *Biology and Fertility of Soils*, 26, 2, pp. 100-106.
- Tziliavakis J., Lewis K.A. et Williamson A.R., 2005 - A prototype framework for assessing risks to soil functions. *Environmental Impact Assessment Review*, 25, 2, pp. 181-195.
- Velasquez E., Lavelle P. et Andrade M., 2007 - GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 39, 12, pp. 3066-3080.
- Vrščaj B., Poggio L. et Ajmone-Marsan F., 2008 - A method for soil environmental quality evaluation for management and planning in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 88, 2-4, pp. 81-94.
- Wander M.M., Walter G.L., Nissen T.M., Bollero G.A., Andrews S.S. et Cavanaugh-Grant D.A., 2002 - Soil quality: Science and process. *Agronomy Journal*, 94, 1, pp. 23-32.
- Yakovchenko V., Sikora L.J. et Kaufman D.D., 1996 - A biologically based indicator of soil quality. *Biology and Fertility of Soils*, 21, 4, pp. 245-251.
- Zornoza R., Mataix-Solera J., Guerrero C., Arcenegui V., Mataix-Beneyto J. et Gomez I., 2008 - Validating the effectiveness and sensitivity of two soil quality indices based on natural forest soils under Mediterranean conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 40, 9, pp. 2079-2087.
- Zornoza R., Acosta J.A., Bastida F., Domínguez S.G., Toledo D.M. et Faz A., 2015 - Identification of sensitive indicators to assess the interrelationship between soil quality, management practices and human health. *SOIL*, 1, 1, pp. 173-185.