

Les services écosystémiques des sols : du concept à sa valorisation

par Monsieur Christian Walter
professeur de Science du sol à AgroCampus Ouest

Monsieur Antonio Bispo
ingénieur Sol et environnement
à l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe)

73

Madame Claire Chenu
professeur de Science du sol à AgroParisTech

Madame Alexandra Langlais-Hesse,
chargée de recherche CNRS en droit
à l'Institut Ouest Droit et Europe (IODE) de Rennes

et Monsieur Christophe Schwartz,
professeur à l'université de Lorraine

SOMMAIRE DE L'ARTICLE

Introduction

1. Évolution de la perception du rôle des sols

2. Les services écosystémiques fournis par les sols

- 2.1. Les services d'approvisionnement
- 2.2. Les services de régulation
- 2.3. Les services culturels
- 2.4. Les services d'auto-entretien

3. La valorisation des services écosystémiques

- 3.1. L'évaluation biophysique des services
- 3.2. Les approches de monétarisation
- 3.3. La protection juridique des services écosystémiques du sol

Conclusion

Références bibliographiques

74

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Tableau 1

Évaluation à l'échelle mondiale de différents types de services d'approvisionnement dépendant des sols via l'agriculture, la production forestière ou l'extraction directe de matériaux du sol

Tableau 2

Relations entre les services fournis par les sols, les fonctions associées et les indicateurs de ces services ou fonctions

Tableau 3

Schéma récapitulatif des méthodes d'évaluation des actifs non-marchands

Tableau 4

Valeur économique moyenne de treize services écosystémiques rendus par les sols sur une exploitation laitière néo-zélandaise sur une période de trente-cinq ans

Figure 1

Le génie pédologique pour une refonctionnalisation écologique de sites dégradés

Graphique 1

Évolution entre 1980 et 2014 du nombre de publications scientifiques portant sur les services écosystémiques des sols, en regard d'autres concepts liés aux sols

Graphique 2

Schéma conceptuel positionnant le sol comme un capital naturel générant des services écosystémiques en réponse à des besoins humains

Graphique 3

Visualisation du stockage de carbone organique dans différents types de sol

INTRODUCTION

En lançant, en 2002, une nouvelle stratégie communautaire de protection des sols, la commissaire européenne à l'Environnement, Margaret Wallström, déclarait que l'Union européenne « *plaçait désormais la protection des sols au même rang que la protection de l'eau et de l'air* ». Le 22 septembre 2006, une proposition de directive du Parlement européen et du Conseil définissait un cadre pour la protection des sols : elle visait à poser les bases d'une meilleure prise en compte de ceux-ci dans la législation des États-membres et à permettre d'identifier et de combattre leur dégradation progressive, un enjeu unanimement reconnu comme important. Pourtant, en 2007, l'adoption définitive de la directive s'est heurtée à la minorité de blocage de cinq pays européens et, en avril 2014, après plusieurs tentatives infructueuses de relance, la Commission a décidé de retirer définitivement la proposition.

Cet échec a des causes multiples, notamment d'ordre politique et juridique. Mais la difficulté à faire reconnaître l'importance des sols pour les sociétés humaines a aussi, vraisemblablement, contribué à cette issue. Contrairement à l'eau et à l'air, les sols ne sont pas perçus comme des milieux ambiants directement nécessaires à la vie humaine¹, leur protection n'est pas jugée indispensable par le grand public et, de ce fait, ils sont peu considérés par les décideurs².

Le concept de « *service écosystémique* » vise à mieux faire reconnaître la contribution des écosystèmes au bien-être et à l'activité économique des hommes. Il peut donc contribuer à alimenter ce besoin de reconnaissance qui semble nécessaire pour envisager la protection des sols. Initié dès les années soixante-dix³, il s'est diffusé largement à partir d'un article fondateur publié en 1987 par deux chercheurs⁴ qui cherchaient à évaluer la valeur économique des services rendus par la nature. Mais c'est surtout son intégration dans le *Millennium ecosystem assessment*⁵ (MEA), commandité par les Nations unies

en 2005, qui a rapidement généralisé son emploi : notamment comme fondement de nombreux programmes de recherche actuels sur les sols.

Dans ce contexte, l'objectif de notre article est d'analyser ce concept de service écosystémique appliqué aux sols. Après une clarification des concepts, nous décrivons les principaux services écosystémiques assurés par les sols, puis nous envisagerons les modes d'évaluation et les pistes de valorisation de ces services dans la décision publique.

1. ÉVOLUTION DE LA PERCEPTION DU RÔLE DES SOLS

Dès 1972, la Charte européenne sur les sols a posé les bases d'une approche multifonctionnelle des sols. Son article 1 considère en effet « *le sol comme un milieu vivant et dynamique qui permet l'existence de la vie végétale et animale. Il est essentiel à la vie de l'homme en tant que source de nourriture et de matières premières. Il est un élément fondamental de la biosphère et contribue, avec la végétation et le climat, à régler le cycle hydrologique et à influencer la qualité des eaux* ».

Néanmoins, cette vision pionnière n'a guère été reprise dans les décennies suivantes. Les approches mono-fonctionnelles ont prévalu dans les démarches d'ingénierie et d'aménagement de la fin du vingtième siècle : les agronomes ou les forestiers s'intéressaient principalement à la fonction de production des sols (leur fertilité) et aux moyens de l'accroître ; les aménageurs urbains à leur rôle de support de l'habitat et des infrastructures ; les producteurs d'eau potable à leur effet de régulation des flux d'eau et des polluants vers les ressources en eau ; etc.

L'idée-force du rôle multifonctionnel des sols n'a été reprise que récemment⁶, notamment dans le cadre des travaux associés à la stratégie européenne de protection : les sols assurent au sein des écosystèmes des fonctions essentielles pour les sociétés et pour l'environnement⁷ et l'existence de ces fonctions justifie des mesures de protection, notamment juridiques, permettant de maîtriser les processus de dégradation

qui affectent de façon croissante les sols. Le projet de directive européenne de 2006 reprenait ce cadre conceptuel et sa finalité première était bien de lutter contre les menaces affectant, à l'échelle européenne, l'aptitude des sols à remplir leurs fonctions. Huit menaces y étaient identifiées (perte en matière organique, imperméabilisation, érosion, contamination, tassement, perte en biodiversité, salinisation, acidification) et celles-ci devaient faire l'objet de plans d'actions au sein de zones vulnérables préalablement identifiées par les États-membres. Au niveau mondial, la même volonté de lutter contre la dégradation des sols a été réaffirmée en 2013, dans la déclaration finale de la convention sur le développement durable de Rio +20 : son article 206 identifie un objectif de « *créer un monde où la dégradation des sols n'est plus un problème* ».

Parallèlement à ces évolutions conceptuelles développées par les spécialistes des sols, les notions de service écosystémique et de capital naturel ont émergé du champ de l'économie et ont été reprises, en 2005, dans le cadre du *Millennium ecosystem assessment* des Nations unies. Il donne les définitions générales suivantes :

- Capital naturel : « *stock de matières et d'information contenu dans un écosystème* »⁸
- Service écosystémique : « *bénéfice que les écosystèmes procurent aux hommes* »⁹.

Ces deux notions ont été définies pour donner une valeur aux ressources naturelles et aux biens et services qu'ils fournissent aux sociétés. Récemment, le concept de service écosystémique a été transféré dans la recherche en science du sol, notamment en relais des études menées sur les processus de dégradation des sols (*Graphique 1*). Le concept de sol, en tant que capital naturel, a lui été moins repris et semble rester spécifique au champ de l'économie de l'environnement.

1. Thiebaut, 2011.

2. Bouma, 2001.

3. Westmann, 1977.

4. Constanza et Daly, 1987.

5. MEA, 2005.

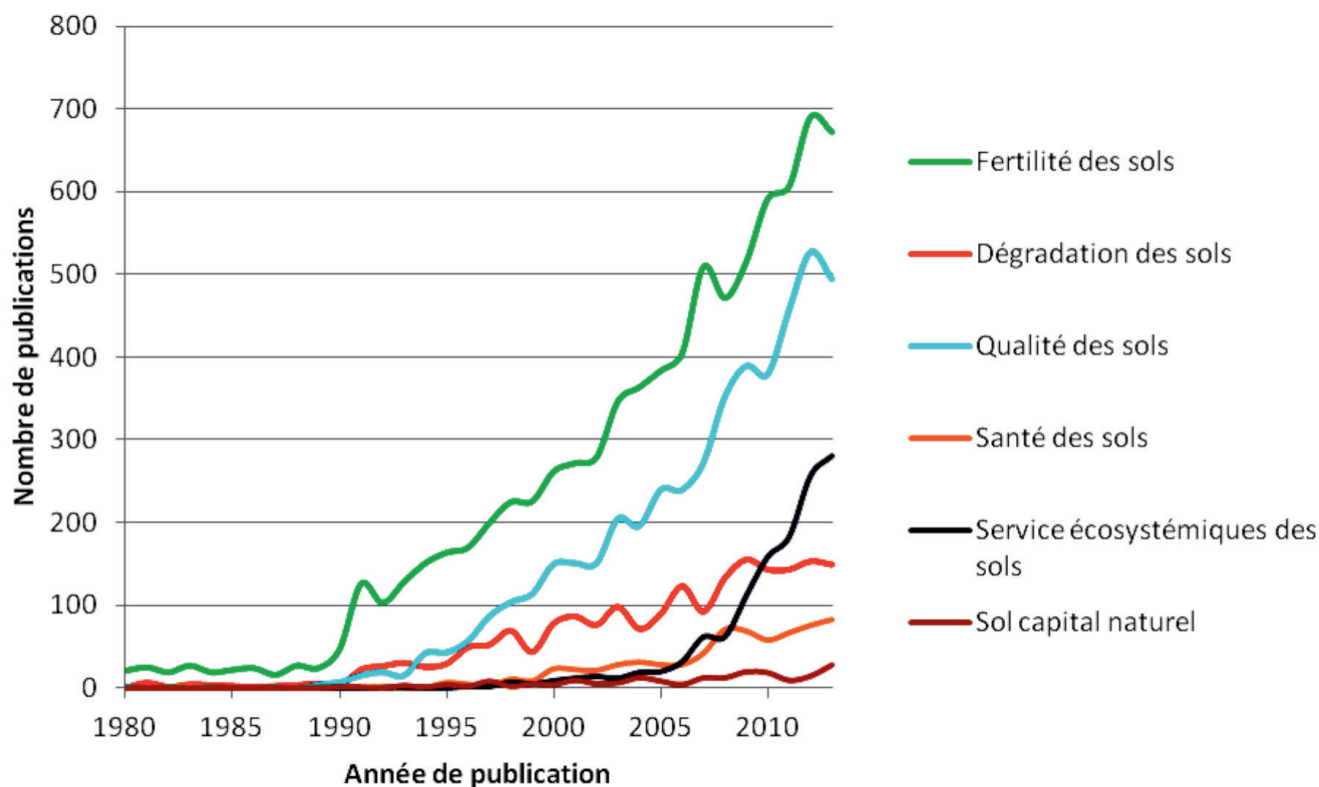
6. Doran et Parkin, 1996.

7. Blum, 2006.

8. Costanza et al., 1997.

9. MEA, 2005.

GRAPHIQUE 1
Évolution entre 1980 et 2014 du nombre de publications scientifiques portant sur les services écosystémiques des sols, en regard d'autres concepts liés aux sols
(Source : Web of knowledge, 2014)



2. LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES FOURNIS PAR LES SOLS

L'adaptation au sol du cadre conceptuel établi par le MEA en 2005 a fait l'objet de nombreux travaux récents. Le *Graphique 2* représente le schéma conceptuel proposé en 2010 par des chercheurs¹⁰ : il positionne le sol comme un capital naturel, caractérisé par ses stocks de matière et de biodiversité, mais aussi par les flux qu'il génère et qui permettent la fourniture d'un certain nombre de services répondant à des besoins humains. Ces services écosystémiques sont regroupés en quatre grandes catégories : les services d'approvisionnement, les services de régulation, les services culturels et les services d'auto-entretien.

10. Dominati et al., 2010.

2.1. Les services d'approvisionnement

Les services d'approvisionnement regroupent l'ensemble des productions issues des sols :

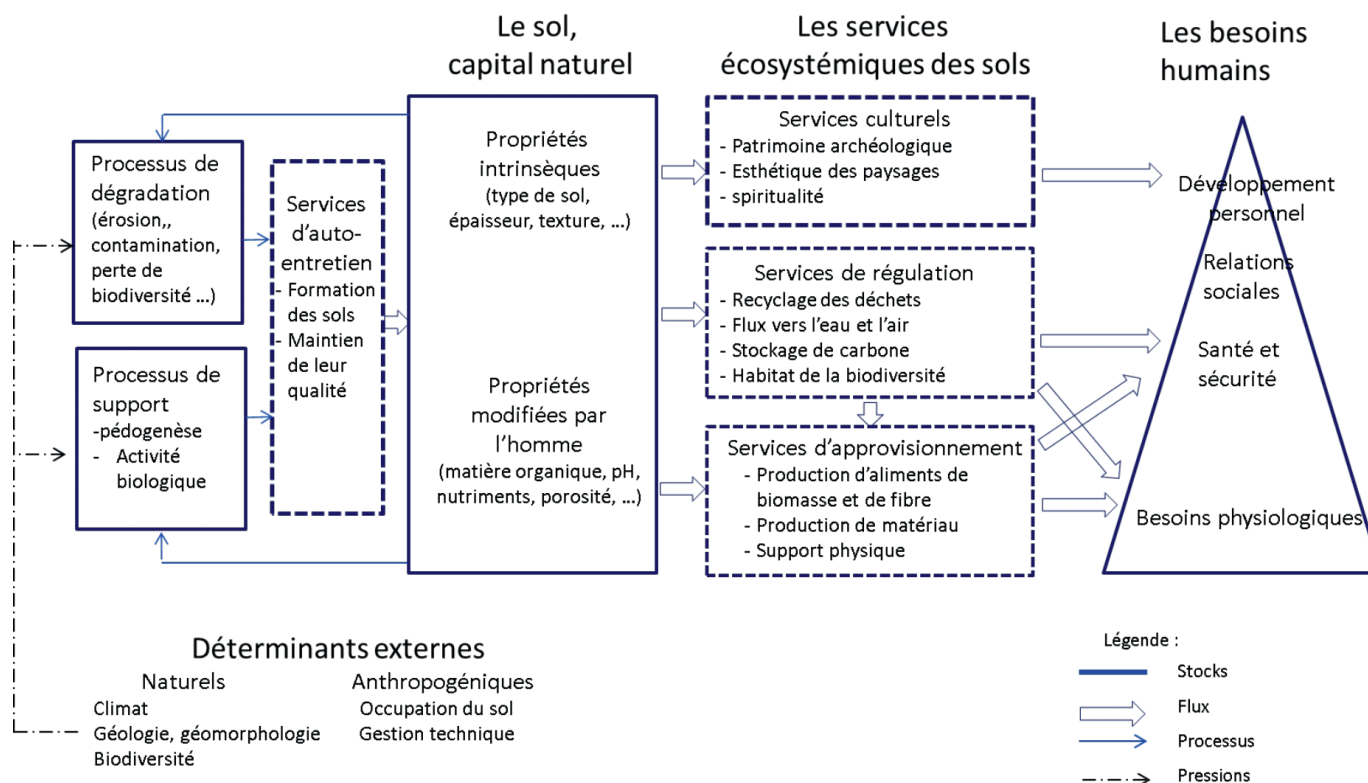
- Produits destinés à l'alimentation humaine, mais aussi aux animaux d'élevage
- Bois issus des forêts à vocation énergétique ou pour le bâtiment
- Fibre destinée à la production de textiles (coton, lin, etc.)
- Matériau brut extrait des sols pour servir de support horticole (tourbe, argile) ou pour servir de matériaux de construction (bauge, brique en terre)
- Ressource génétique issue de la biodiversité interne au sol qui fournit notamment des produits biochimiques et pharmaceutiques.

La fonction de support physique assurée par les sols est également incluse dans cette catégorie de services : les sols représentent

en effet la base physique sur laquelle les animaux, les humains, mais aussi l'ensemble des infrastructures se tiennent.

L'importance des services d'approvisionnement assurée par les sols est évidemment considérable. Le *Tableau 1* regroupe des statistiques, à l'échelle mondiale, des surfaces affectées à différentes productions, ainsi que l'importance des productions issues des sols par rapport à d'autres modes de production (pêche, culture hors-sol, etc.). Il apparaît notamment que plus de 90 % des besoins nutritionnels de la population humaine (97 % des calories et 93 % des protéines) sont couverts par des produits végétaux ou animaux fournis directement ou indirectement par les sols. Les projections futures, quels que soient les scénarios retenus, montrent que cette prédominance très forte va se maintenir, à la fois pour subvenir aux besoins nutritionnels (en quantité

GRAPHIQUE 2
Schéma conceptuel positionnant le sol comme un capital naturel
générant des services écosystémiques en réponse à des besoins humains
(adapté de Dominati et al., 2010)



et en qualité) d'une population mondiale en forte croissance et pour répondre aux défis de la transition énergétique. La nécessité de préserver et d'accroître les services d'approvisionnement fournis par les sols sera donc bien un enjeu majeur du vingt-et-unième siècle.

Notons que l'importance des sols dans les fonctions de production transparait peu dans les publications et les statistiques évaluant les services écosystémiques. Celles-ci considèrent, à l'instar du MEA, de grands types d'espaces (montagne, espaces cultivés, eaux intérieures, etc.) ou de grands secteurs d'activités économiques, à l'image du méta-programme de recherche de l'Institut national de recherche agronomique (INRA) qui s'intéresse aux services écosystémiques de l'agriculture et de la forêt. Les sols sont ainsi englobés dans des catégories où on peine à reconnaître leur importance spécifique dans

les services d'approvisionnement. Néanmoins, des programmes de recherche récents – en particulier le programme GESSOL¹¹ initié par le ministère de l'Écologie – associent les approches des sciences biophysiques et des sciences sociales pour mieux évaluer le rôle particulier des sols.

2.2. Les services de régulation

Les services de régulation dérivent à la fois des caractéristiques propres des sols et de leur position particulière à l'interface des autres grands compartiments de la planète Terre (biosphère, lithosphère, hydrosphère). Le sol est d'abord un acteur prépondérant du cycle de l'eau¹² via son rôle de partage des pluies entre infiltration et ruissellement, sa capacité de stockage supérieure à celle de

l'atmosphère et des rivières (de l'ordre de 50 à 400 litres par mètre carré), mais aussi les échanges et réactions biogéochimiques qui s'y produisent. Le sol joue un rôle essentiel de régulation, en quantité et en qualité, des transferts d'eau entre l'atmosphère, les nappes souterraines et les cours d'eau et il assure une fonction de réserve en eau pour les plantes et les organismes du sol.

Les sols abritent ensuite une diversité considérable d'organismes vivants appartenant, d'une part, à tous les groupes connus de micro-organismes (bactéries, actinomycètes, champignons, algues, protozoaires) et, d'autre part, à certains groupes d'animaux comme, par exemple, des nématodes, des lombriciens et des arthropodes¹³. Ces organismes présentent une très grande diversité. De plus, ils ont de très grandes interactions

11. Gessol : fonctions environnementales et gestion du patrimoine Sol (www.gessol.fr).

12. Dorffigler et Gascuel, 2014.

13. Cluzeau et al., 2011.

TABLEAU 1

Évaluation à l'échelle mondiale de différents types de services d'approvisionnement dépendant des sols via l'agriculture, la production forestière ou l'extraction directe de matériaux du sol

Services	Surfaces dédiées (millions ha)	Produits	Types de productions liées au sol	Productions liées au sol	Part dans la production totale (%)
Alimentation Humaine *	1 500 (cultures) + 3 300 (prairies)	Énergie	Végétaux	2 400 kcal/hab/j	84
			Animaux	400 kcal/hab/j	14
		Protéines	Végétaux	45 g/hab/j	56
			Animaux	29 g/hab/j	37
Fibres textiles *	36 (cultures)	Fibres naturelles	Végétaux (coton, lin, ...)	30 Mt	48
			Animaux (laine, soie)	2,3 Mt	4
Énergie **	4 000 (Forêt) + 3 (Plantations) + 40 (cultures énergétiques)	Chauffage	Bois	104 Mtep	18 % (1)
		Carburants	Biocarburants	0,2 Mtep	3 % (2)
		Électricité	biomasse	28 Mtep	2 % (3)
Matériaux ***	1 500 (forêts exploitées) 8 (tourbières exploitées)	Construction	Bois	1 650 Mm ³	
		Support horticole	Tourbe	11 000 t	

(1) en % de l'énergie dédiée au chauffage ; (2) en % de la production de carburants ; (3) en % de la production d'électricité

Sources :

* FAO statistical yearbooks : world food and agriculture, 2013 ; The state of world fisheries and aquaculture

** IEA, World Energy Outlook, 2013

*** FAO State of the World's Forests 2014 ; USGS Mineral resource program, Index Mundi, 2014

80

trophiques et physico-chimiques entre eux, avec les plantes (notamment leurs racines), mais aussi avec les constituants organo-minéraux des sols. L'étude des organismes des sols mobilise aujourd'hui les outils de biologie moléculaire qui ouvrent, progressivement, la voie à la connaissance des organismes non cultivables en laboratoire : soit plus de 95 % des bactéries et champignons du sol, jusque-là non identifiés par les approches microbiologiques classiques. Cette biodiversité du sol, encore méconnue, joue un rôle essentiel dans l'ensemble des processus biogéochimiques des sols, en particulier ceux affectant les cycles du carbone et des nutriments, notamment l'azote. Elle joue aussi un rôle important vis-à-vis de la protection des plantes puisqu'à la fois, des ravageurs des plantes (par exemple, des limaces) et des auxiliaires de culture (par exemple, des carabes) peuvent effectuer, en totalité ou en partie, leur cycle de développement ou de reproduction dans les sols. Les organismes des sols contribuent également à la structuration des sols en modifiant la

porosité (par exemple, lombriciens, enchytreides) ou la cohésion des sols (par exemple, par sécrétion de ciments organiques par les bactéries ou par le développement des hyphes de champignons), ce qui influence les propriétés physiques, mais également hydriques des sols.

De façon plus générale, les sols constituent un compartiment essentiel des grands cycles biogéochimiques des éléments, en particulier pour le carbone (*Encadré 1*), mais aussi pour d'autres éléments (N, O, P, K, Cu, Zn, ...). Ils constituent un lieu de stockage, de transformation et de transfert important du cycle naturel des éléments, mais, de plus, reçoivent une partie importante des flux d'origine anthropique. En effet, les activités anthropiques génèrent des apports volontaires au sol : ce sont toutes les pratiques de fertilisation ou d'amendement des sols et des apports fortuits liés aux dépôts atmosphériques ou à la présence de certains éléments, généralement à l'état de traces, dans les produits apportés au sol.

Le rôle des sols dans le cycle des éléments est en lien direct avec le service important qu'ils rendent en termes de recyclage des déchets. La France produit chaque année environ 900 millions de tonnes de déchets, issus des collectivités, des ménages, de l'industrie, des travaux publics ou de l'agriculture. Environ la moitié est recyclée en agriculture et donc épanchée sur les sols avec, pour motivations principales, de valoriser les éléments fertilisants des déchets et de profiter du rôle épurateur des sols pour bénéficier d'une filière de traitement à faible risque qui évite la mise en décharge ou l'incinération.

Ce recyclage est particulièrement important pour le phosphore, un élément nutritif essentiel de la production végétale. La fertilisation minérale classique de P repose sur l'exploitation de gisements de phosphates naturels, géographiquement concentrés à 85 % dans trois pays : Maroc, Chine et États-Unis. Or, dans les décennies à venir, la raréfaction de la ressource et une demande mondiale en très forte croissance vont fortement limiter la disponibilité et augmenter le coût de ce

type de fertilisant. En 2006, les apports aux sols agricoles français étaient constitués de 367 000 tonnes de phosphore issues du recyclage de déchets et de 286 000 tonnes issus de fertilisants ¹⁴. Mais l'efficacité du recyclage en phosphore des déchets ménagers et

des collectivités territoriales était inférieure à 50 %, en raison de l'importance persistante des mises en décharge et des pertes de P vers l'eau à partir des stations d'épuration. Il apparaît donc essentiel, à la fois pour des raisons économiques et environnementales, de continuer à développer des filières de recyclage maîtrisé de déchets vers les sols : elles

seules permettent d'envisager une gestion durable des ressources en P du globe.

2.3. Les services culturels

Les services culturels liés aux sols recouvrent, en premier lieu, un aspect lié à l'esthétique des paysages. Les différences de couleurs

14. Senthikumar et al., 2014.

>>> Encadré 1

Le stockage de carbone dans les sols

À l'échelle mondiale, les sols contiennent environ 1 500 milliards de tonnes de carbone sous forme organique dans la couche comprise entre 0 et 30 cm : soit davantage que l'ensemble du carbone contenu dans la végétation (600 milliards de tonnes) et dans l'atmosphère (720 milliards). Ramené à l'hectare, cela représente, en milieu tempéré, de 80 à 120 tonnes de C par hectare sous forêt et prairie et de 40 à 60 tonnes de C en milieu cultivé. À ce stock, il faut ajouter le carbone organique stocké à plus de 30 cm dans le sol. Il représente souvent plus de 20 % du stock organique total et, dans les sols calcaires, le carbone sous forme inorganique présent dans les carbonates (CaCO_3). Ces deux derniers stocks sont moins bien caractérisés que les stocks de carbone organique de surface, mais ils sont considérés comme ayant des temps de résidence très longs dans les sols, supérieurs au millénaire et donc participant moins aux flux de carbone, notamment vers l'atmosphère. De faibles variations des stocks de carbone organique des sols du monde peuvent influencer significativement la concentration en CO_2 de l'atmosphère. Ces stocks dépendent de l'équilibre entre, d'une part, des apports par la végétation et les amendements organiques et, d'autre part, des pertes liées à la minéralisation d'une fraction des matières organiques présentes et à la lixiviation des formes dissoutes de carbone organique. Cet équilibre entre apports et pertes dépend de divers facteurs, mais l'usage des terres et le climat sont déterminants dans son évolution. De ce fait, de nombreux travaux sont menés pour déterminer et cartographier les régions du monde où les sols représentent une source ou un puits de carbone vis-à-vis du carbone atmosphérique et prédire l'effet du changement climatique attendu sur ces sources ou puits. En Europe, les forêts et les prairies représentent actuellement les principaux puits de carbone ; à l'inverse, les cultures, où la dégradation de la matière organique prédomine, tendent à perdre du carbone (Soussana, 2014).

81

GRAPHIQUE 3 Visualisation du stockage de carbone organique dans différents types de sol



À gauche, jusqu'à plus de 1 mètre dans un sol tourbeux – Au centre, en surface et en profondeur d'un sol très acide sous forêt – À droite, dans les 25 premiers centimètres d'un sol cultivé sous prairie
(Crédit photographique : L. Berthier et AL. Le Bris, Agrocampus Ouest).

dominantes de la surface des sols (noire, brune, rouge, jaune, blanche) et l'importance de la nature des sols dans le type de végétations contribuent aux caractéristiques visuelles des paysages.

Le sol conserve la mémoire et l'empreinte des passages de l'Homme et de ses activités au fil du temps. Il protège les ossements, les objets et les constructions passées et les analyses permettent aux archéologues de reconstituer les climats et les écosystèmes passés, par exemple grâce à la datation de charbons de bois ou l'analyse des molécules organiques.

L'importance du sol dans l'art et sa place dans les conceptions philosophiques et religieuses sont parties intégrantes des fondements culturels des civilisations. Dans les religions, le sol est souvent représenté comme symbole de fécondité et de régénération de la vie, à l'image de l'expression de la Bible « *Tu es poussière et tu retourneras en poussière* »¹⁵.

82 Par ailleurs, le sol est utilisé comme source de couleurs et de pigments pour les peintures et les décorations des corps. Mais les représentations des sols en elles-mêmes se limitent souvent à leur seule surface. Les artistes intègrent rarement des représentations explicites des sols dans leurs œuvres, renforçant ainsi l'idée que la perception des sols est souvent indirecte, via les fonctions et les services qu'ils rendent aux sociétés. La représentation explicite des sols dans les représentations culturelles est récente. Elle s'est faite sous l'influence des travaux scientifiques qui, à partir de la fin du dix-neuvième siècle, ont défini le sol comme un objet naturel spécifique.

2.4. Les services d'auto-entretien

Les services d'auto-entretien – ou de support, selon la terminologie du *Millenium ecosystem assessment* (MEA) commandité par les Nations unies en 2005 – regroupent l'ensemble des fonctions nécessaires pour la production des autres services : sont ainsi considérés le cycle de l'eau, le cycle des

nutriments, la production primaire¹⁶ et la formation des sols. Ces services¹⁷ sont moins bien identifiés que les services d'approvisionnement, de régulation ou culturels. Mais ils mettent en jeu l'aptitude des sols à assurer, dans le temps et pour les générations futures, les services attendus par l'humanité. Il s'agit, d'une part, de la formation de sol à partir de l'altération de la roche sous-jacente ou à partir de matériaux d'apports (y compris d'origine anthropique). Elle implique des transformations – à l'échelle de décennies, de siècles et même de millénaires – des propriétés physiques, chimiques et biologiques du matériel initial et permet, progressivement, l'extension latérale et verticale des sols. Les ordres de grandeur de cette formation des sols par des processus naturels de pédogenèse sont faibles : de l'ordre de 0,04 à 0,08 millimètre par an, soit moins d'un centimètre par siècle. Cela justifie que l'on considère les sols comme une ressource non ou peu renouvelable, et ce d'autant que les pertes en sol par des processus de dégradation peuvent être beaucoup plus intenses et rapides.

L'autre aspect important des services d'auto-entretien qualifie la résistance et / ou la résilience du sol à maintenir ou à recouvrir un fonctionnement générateur de services malgré les pressions s'exerçant sur lui : contamination par des polluants, compaction de la structure, érosion, salinisation, modifications de régime hydrique suite au changement climatique, etc. Celles-ci peuvent perturber son fonctionnement, mais les interactions entre processus biologiques et physico-chimiques modulent la réponse du sol à ces pressions. Ces vingt dernières années, la recherche en écologie des sols a ainsi privilégié le rôle des organismes des sols et de leurs interactions sur les processus gouvernant le fonctionnement des sols, mettant en

évidence leur importance fondamentale. La recherche a notamment porté sur l'identification du méta-génome des organismes du sol et sur les relations entre la biodiversité du sol en termes de richesse spécifique et de composition et le fonctionnement du sol. L'explicitation de ces relations et leur prise en compte dans les pratiques d'évaluation de la qualité des sols et des services qu'ils rendent constituent un défi pour la recherche dans les années qui viennent.

3. LA VALORISATION DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

3.1. L'évaluation biophysique des services

Il n'existe pas, actuellement, de méthode reconnue ou consensuelle d'évaluation biophysique des services écosystémiques fournis par les sols. La difficulté tient notamment au fait qu'un service met généralement en jeu plusieurs fonctions et processus, lesquels peuvent contribuer à plusieurs services (*Tableau 2*).

Des indicateurs permettent de quantifier le service. On peut distinguer plusieurs démarches selon qu'un ou plusieurs indicateurs – plus ou moins intégratifs – sont choisis, selon la méthode utilisée pour les sélectionner et selon la méthode de quantification *stricto sensu* : utilisation directe de la valeur de l'indicateur, comparaison à une référence ou attribution de scores.

Lorsqu'il existe une variable très proche représentative et intégrative du service évalué, celui-ci peut être directement quantifié par mesure ou par modélisation. L'un des cas le plus simple est celui du service de régulation du climat via la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), à travers le stockage de carbone dans le sol. Le service peut être directement mesuré ou prédit par modélisation et exprimé par une quantité de C stockée dans le sol par unité d'espace et de temps (*Tableau 2*). De même, l'atténuation des émissions de N₂O peut être mesurée ou prédite par modélisation et exprimée en équivalent (eq) CO₂ atténué par hectare et par an. D'autres travaux se focalisent sur

16. La production primaire correspond à la synthèse de composés organiques par les organismes vivants, principalement par photosynthèse et, en partie, par chimiosynthèse. Elle concerne donc l'ensemble de la biomasse produite par les écosystèmes et non uniquement celle directement utilisée par l'homme, considérée comme un service d'approvisionnement.

17. Dans le schéma conceptuel de Dominati et al., 2010, les services d'auto-entretien ne sont pas positionnés directement en liaison avec les besoins humains, mais influencent le sol considéré comme un capital naturel (*Graphique 2*).

15. Genèse 3: 17-19.

Le génie pédologique au service de la restauration des services écosystémiques de sols dégradés

Les sols des écosystèmes urbains sont souvent qualifiés de *technosols* ou d'*anthroposols* et, depuis 1998, la proposition a été faite de les appeler SUITMAs (*Soils in Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military areas*).

La plupart de ces sols sont fortement modifiés par les activités humaines qui induisent des changements de composition et de fonctionnement. Les fonctions réalisées par ces sols et leur résultante en termes de services écosystémiques sont alors menacées. En plus de permettre l'accès à des zones de loisir et de jouer un rôle dans la régulation de la pollution de l'air et des îlots de chaleur, les sols urbains (quoique très anthropisés) assurent aussi des services d'approvisionnement en eau et en aliments *. Parmi tous les services écosystémiques rendus par les milieux urbains, une grande majorité est en lien avec la présence de végétation. Les murs et les toits végétalisés, les fermes urbaines et, bien évidemment, les jardins potagers urbains peuvent assurer des services d'approvisionnement grâce à la production d'aliments. La végétation urbaine développée sur des sols urbains contribue également à la régulation du climat et de la qualité de l'air par des effets de réduction de l'effet d'îlot de chaleur, la réduction des teneurs en gaz à effet de serre ou encore des teneurs en particules dans l'air. S'ils ne sont pas imperméabilisés, les sols urbains permettent aussi aux eaux atmosphériques de s'infiltrer, réduisant ainsi les risques d'inondations. Ce phénomène est amplifié en présence d'un couvert végétal, qui contribue à limiter les nuisances sonores au sein des villes. En complément de ces services de régulation, les espaces végétalisés urbains sont aussi le support d'espèces végétales spécifiques, parfois rares et patrimoniales, rendant ainsi un service de maintien de la biodiversité.

L'accent peut être mis sur le cas particulier des *technosols* construits, issus de procédés du génie pédologique **. Ces sols sont délibérément construits pour assurer des fonctions choisies. Le procédé de

construction de sol a pour objectif d'assurer la réhabilitation de sites dégradés (friche industrielle, zone de démolition, lagune, décharge, carrière) en rendant au substrat ses propriétés agronomiques, afin de permettre une implantation pérenne d'un couvert végétal. Il est issu des connaissances du génie pédologique. Ce procédé consiste en l'utilisation de matières premières secondaires, c'est-à-dire de déchets et de sous-produits (composts, sous-produits industriels, terres industrielles traitées) en lieu et place de terre végétale pour construire un sol fertile sur des substrats dégradés présentant des déficits de fertilité. L'originalité du procédé est d'associer des matériaux pour constituer différentes couches de sol permettant ensuite une implantation optimale de la végétation. Une fois mis en place, le sol construit permet la requalification du site en assurant une intégration paysagère simple de la zone, voire en permettant son exploitation pour produire de la biomasse à vocation non-alimentaire.

Cette écotechnologie innovante combine quatre éléments : une technique efficace et pérenne de réhabilitation de sites dégradés ; une économie de ressources naturelles (terre végétale) ; le développement d'une filière alternative pour la valorisation de déchets et sous-produits ; des coûts de mise en œuvre significativement plus faibles que les techniques traditionnelles de réhabilitation de sites. À ce titre, elle constitue un procédé économiquement avantageux qui se situe clairement dans une optique de développement durable. Les sols construits rendent en effet différents services écosystémiques : services d'approvisionnement (par exemple, biomasse non-alimentaire pour l'énergie, les fibres voire de la biomasse alimentaire) ; services de régulation (par exemple, régulation de la qualité et de l'infiltration de l'eau, maintien de la biodiversité, stabilisation des polluants, contrôle du climat, stockage du carbone).

* Morel et al., 2014 – ** Séré et al., 2008.

FIGURE 1
Le génie pédologique pour une refonctionnalisation écologique de sites dégradés
(d'après Séré et al., 2008)

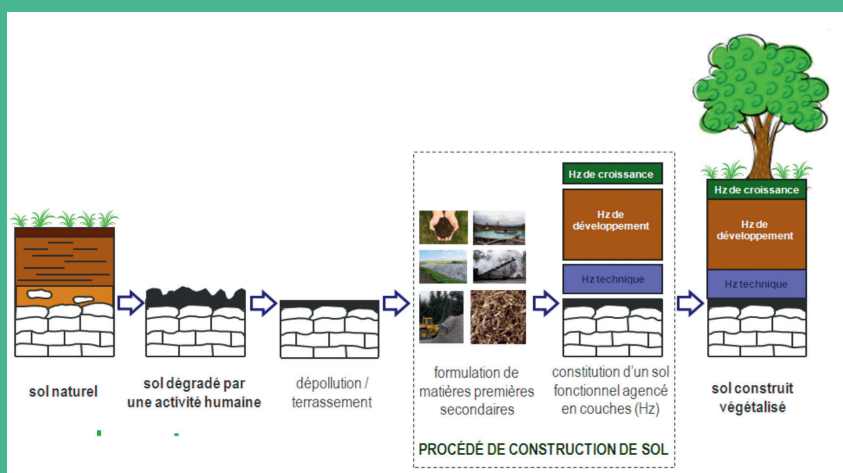


TABLEAU 2
**Relations entre les services fournis par les sols,
 les fonctions associées et les indicateurs de ces services ou fonctions**
 (Le tableau n'est pas exhaustif, mais focalisé sur certains services de régulation)

Service	Fonction	Mesure, indicateur
Régulation du cycle de l'eau	Infiltration, ruissellement, rétention de l'eau, transfert de l'eau dans le sol, évaporation, absorption par les plantes	Vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol, différence entre précipitations et ruissellement, quantité d'eau drainée par le sol
Régulation de l'érosion	Infiltration, ruissellement, agrégation – désagrégation, transports solides	Quantité de terre érodée (t terre/ha/an)
Régulation du climat global via la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES)	Production / transformation de GES, stockage de C, biodégradation minéralisation des matières organiques, dénitrification, nitrification	Variation du stock de C du sol (t C/ha/an), émission de GES (t eq CO ₂ /ha/an)
Régulation de la qualité de l'environnement, atténuation de contaminants	Filtration, adsorption, biodégradation, assimilation, précipitation, transfert	Capacité d'échange cationique (CEC), teneur en C, minéralisation potentielle de C ou N, biomasse microbienne, activité microbienne hétérotrophe...

le service de régulation de l'érosion en se basant sur une prédiction de la quantité de terre érodée par hectare et par an, en utilisant les modèles actuellement disponibles¹⁸ (Tableau 2). Souhaitant quantifier la fourniture d'eau par le sol utilisable par l'homme, des chercheurs¹⁹ ont estimé par modélisation la quantité d'eau drainée, quotidiennement, à la base du profil. D'autres ont calculé la différence entre les précipitations reçues par le sol et la quantité d'eau ruisselée afin d'évaluer le service de régulation des inondations²⁰.

Une fois les indicateurs sélectionnés, l'évaluation de la fonction ou du service fourni par le sol est réalisée de différentes manières. Des travaux attribuent, à dire d'expert, un score à la valeur estimée des indicateurs :

- Ainsi, par exemple, des chercheurs²¹ utilisent trois indicateurs (la réserve utile, la perméabilité à l'eau et la présence de traces d'hydromorphie) pour le service de régulation du cycle de l'eau, rendant compte de la rétention et de la circulation de l'eau. Ils leur attribuent des scores allant de 1 (bonne qualité) à 5 (mauvaise qualité) en s'appuyant sur des seuils issus de

la littérature scientifique. Puis, ils évaluent l'adéquation des scores de ces indicateurs à l'usage du sol (agricole, support d'infrastructures, etc.) et déterminent *in fine* si le service est satisfait ou non.

- D'autres travaux construisent un indice en comparant la valeur mesurée ou prédite des indicateurs choisis à celle d'une situation de référence. Des chercheurs²² ont ainsi construit un indice complexe pour rendre compte du service d'atténuation de contaminants par le sol. Cet indice est composé de six indicateurs choisis par démarche participative²³ et reliés à l'activité microbienne des sols (teneur en C, pH, minéralisation potentielle de C, minéralisation potentielle d'azote, teneur en phosphore biodisponible et activité microbienne hétérotrophe mesurée avec la méthode Biolog). Les valeurs mesurées de ces indicateurs sont divisées par celles acquises sur des parcelles de référence, puis sommées afin de construire un indice général d'« atténuation naturelle de contaminants »²⁴. Les parcelles de référence sont des parcelles de sol de même type, sous le même usage (ici, des sols cultivés) pour lesquelles, à dire d'expert, les systèmes de

culture mis en œuvre représentent un optimum. Le choix de la situation de référence constitue clairement un point critique de la démarche. Néanmoins, celle-ci permet de proposer un indice mesurant l'écart de services entre une parcelle évaluée et une situation jugée optimale.

Il devient ainsi important de quantifier et, à terme, de spatialiser les services rendus par les sols, pour que ceux-ci puissent être utilisés comme critères de décision. Être incapable d'exprimer un service revient généralement à ne pas le considérer : d'où la nécessité de sélectionner, de tester et, si possible, d'homogénéiser des approches d'évaluation biophysique des différents services. Le comité international de normalisation de la qualité des sols veut établir une norme-guide présentant les services et proposant les indicateurs possibles pour leur évaluation. Cet enjeu est particulièrement important si les services doivent ensuite être valorisés, protégés ou restaurés.

3.2. Les approches de monétarisation

Si le concept de services écosystémiques a été initialement conçu pour communiquer sur l'importance des écosystèmes et, donc, de la biodiversité pour le bien être de l'humanité, la volonté d'évaluer ces services et de

18. Dymond et al., 2012 ; Trabucchi et al., 2012.

19. Dymond et al., 2012.

20. Dominati et al., 2014.

21. Robert et al., 2013.

22. Vijnen et al., 2012.

23. Rutgers et al., 2012.

24. Vijnen et al., 2012.

TABEAU 3
Schéma récapitulatif des méthodes d'évaluation des actifs non-marchands

	Préférences révélées	Préférences déclarées
Méthodes directes	Monétarisation au prix de marchés Coûts de restauration, de remplacement Coûts évités, effets de productivité	Évaluations contingentes
Méthodes indirectes	Dépenses de protection et comportements de prévention Coûts de remplacement Prix hédonistes	Analyse conjointe Classement contingent Comparaison par paires

les monétariser est apparue très vite : notamment pour pouvoir les intégrer dans des analyses coûts / bénéfices et, ainsi, mettre en balance différentes options de gestion, d'aménagement, etc. Mais comment donner une valeur ²⁵ et un prix à des services dont certains sont immatériels et d'autres relèvent du bien public ?

Selon les services écosystémiques à évaluer et les données disponibles, plusieurs approches sont possibles (Tableau 3). Elles se différencient par le fait qu'il soit possible d'obtenir directement l'information (par exemple, coûts des productions agricoles, de traitement de l'eau) ou qu'il faille la déduire, indirectement, d'autres informations (par exemple, différence de prix de l'immobilier entre un bien proche d'un site naturel et un autre plus éloigné). Parallèlement, ces méthodes peuvent se fonder soit sur des déclarations d'individus interrogés lors d'enquêtes (par exemple, « *combien seriez-vous prêt à payer pour ... ?* »), soit sur l'observation de comportements d'agents censés révéler la valeur qu'ils attachent à la biodiversité ou à un service (par exemple, coût du transport et d'entrée dans un parc naturel) ²⁶.

De nombreuses évaluations ont été conduites concernant les services écosystémiques liés à

la biodiversité en général ²⁷ ou, plus spécifiquement, certains milieux et territoires (par exemple, la prairie, la forêt, les zones humides) ²⁸. Par contre, pour les sols, les travaux sont assez récents et peu nombreux. Les services d'approvisionnement liés aux sols sont certainement parmi les plus simples à évaluer et à monétariser car des marchés existent (Tableau 1 sur la contribution des sols dans la fourniture de produits alimentaires, la fourniture de fibres, de matériaux et d'énergie). Les services de régulation de l'eau ou du climat peuvent être estimés de la même manière, l'eau comme le carbone étant des biens marchands, intégrés dans des marchés nationaux ou internationaux. Les coûts de traitement des eaux liés à la pollution des sols ou la réserve en eau des sols pour nourrir les plantes peuvent ainsi être chiffrés relativement aisément : des contrats locaux existent d'ailleurs pour protéger la ressource en eau, en lien avec la gestion (ou la non-gestion) des sols et, plus largement, les pratiques agricoles ²⁹.

Concernant la régulation du climat, le sol est impliqué dans les flux des trois principaux gaz à effet de serre (CO₂, N₂O et CH₄) et une unité commune existe (eq CO₂). En fonction de sa gestion et du territoire concerné, les sols vont ainsi stocker du carbone ou l'émettre sous forme de CO₂ ou de méthane (CH₄), mais aussi émettre du N₂O (lié essentiellement à la fertilisation azotée). L'importance des stocks de carbone dans les sols (Encadré 1), ainsi que les surfaces poten-

tiellement concernées ont conduit à vouloir promouvoir ce service. Il s'agit par exemple d'établir des contrats avec des agriculteurs ou, plus probablement, avec des intermédiaires négociant ensuite avec un ensemble d'agriculteurs ³⁰ pour adopter des pratiques dites « *stockantes* » (en général, le passage au non-labour). L'idée n'est donc pas de comptabiliser et de financer les stocks existants (autrement dit, le capital stocké), mais les flux de séquestration (c'est-à-dire le carbone additionnel lié au changement de pratique). Mais, compte tenu des particularités du stockage de carbone dans les sols (durée, réversibilité, hétérogénéité) et contrairement aux autres secteurs ³¹, les contrats sont proposés sur le long terme (au moins cinq ans), avec des systèmes d'assurance pour se prémunir des changements de pratiques et, donc, de la ré-émission de carbone stocké. Une autre difficulté réside dans le contrôle effectif du stockage et donc son coût : un grand nombre de prélèvements et de mesures sont nécessaires pour détecter une faible variation du stock. Compte tenu de ces contraintes, ajoutées au faible prix du carbone, très peu de projets ont, pour l'heure, abouti.

Le service d'habitat (réservoir de biodiversité) est plus difficile à évaluer. En 2004, lors

30. Feng et al., 2002.

31. Lorsque des subventions sont proposées, par exemple pour changer une chaudière, le gain est immédiat, vérifiable et durable (pas de retour à l'état initial). Pour les sols, stockage et déstockage n'ont pas les mêmes cinétiques et, selon les années climatiques, la nature des sols, les cultures et les pratiques, les cinétiques peuvent être très différentes. Il est donc plus difficile et contraignant de contractualiser et d'être certain que le stockage sera effectif à long terme. Cela explique le faible soutien des pouvoirs publics.

25. Valeur et prix ne sont pas équivalents. La valeur repose sur le concept d'utilité, de préférence, de bien-être, alors que le prix correspond à un équivalent monétaire sur un marché. Les services écosystémiques peuvent donc avoir une valeur sans pour autant avoir un prix.

26. Le rapport sur l'approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes détaille ces méthodes, leurs avantages et leurs inconvénients (Chevassus et al., 2009).

27. Pimentel et al., 1997.

28. Chevassus et al., 2009.

29. <http://www7.inra.fr/vittel/>

TABLEAU 4

Valeur économique moyenne de treize services écosystémiques rendus par les sols sur une exploitation laitière néo-zélandaise sur une période de trente-cinq ans

Services	Méthodes économiques	Coûts utilisés	Résultats moyens	
			dollars / ha / an	%
Quantité d'herbe	Prix de marché	Prix du lait	4 757	29,0
Qualité herbe (teneur en oligo-éléments)	Coûts de remplacement	Additifs alimentaires (oligo-éléments)	38	0,2
Support pour les infrastructures	Coûts de remplacement	Réalisation de terrassements	17	0,1
Portance pour les animaux	Coûts évités	Construction et maintenance de stabulations	112	0,7
Atténuation des inondations	Coûts évités	Construction d'un réservoir	1 196	7,3
Filtration N	Coûts de prévention	Coût d'atténuation du transfert de N et P (construction et maintenance d'une stabulation et pour N alimentation faible en azote et inhibiteurs de nitrification)	554	3,4
Filtration P			2 924	17,8
Filtration des contaminants	Coûts évités	Création et entretien d'un lagunage	6 513	39,7
Recyclage des déchets	Coûts évités	Stockage et traitement des déchets, fert-irrigation	78	0,5
Flux de carbone	Prix de marché	Prix du carbone	0	0
Émissions de N ₂ O		(eq CO ₂)	7,3	0
Oxydation du méthane			0,23	0
Régulation des zoopathogènes	Coûts évités	Coût d'utilisation de médicaments	210	1,3
Total			16 390	100 %

Sources : adapté de Dominati et al., 2014)

du colloque international de zoologie du sol à Rouen, une session a été consacrée à l'évaluation des services écosystémiques rendus par la faune du sol. Elle a donné lieu à deux articles ³² proposant différentes pistes de travail :

- Dans certains pays, des organismes du sol (par exemple, fourmis, vers de terre, termites) ou vivant dans les sols (par exemple, larves d'insectes) sont consommés par les populations locales comme sources de

protéines : il serait donc possible de leur attribuer une valeur alimentaire et de leur donner un prix, même s'ils ne « s'achètent » pas tous sur des marchés.

- Certains organismes comme les carabes ou les papillons (phase larvaire dans les sols) sont très recherchés par les collectionneurs pour leurs formes ou leurs couleurs : ils ont donc directement un prix de marché.
- Les organismes du sol sont également à la base des chaînes trophiques participant à la présence et à l'abondance d'espèces terrestres dans certains milieux. En France, les

vers de terre contribuent aux régimes alimentaires de 175 espèces de mammifères, oiseaux, reptiles et amphibiens ³³ : il est donc possible d'évaluer leur valeur et leur prix (au regard, par exemple, des déplacements du public sur des sites d'observation des oiseaux) ou les coûts liés au maintien d'espèces protégées.

- Autre rôle indirect de la faune du sol, elle contribue fortement à la production agricole via le recyclage des éléments (par

32. Huguenin et al., 2006 ; Decaens et al., 2006.

33. Decaens et al., 2006.

exemple, rendement) ou les flux d'eau (par exemple, porosité du sol). Des chercheurs ont ainsi estimé que ces rôles pouvaient être estimés à 1 milliard d'euros par an pour l'Irlande ³⁴.

Les services culturels et d'auto-entretien sont, eux, encore plus difficiles à évaluer et les estimations manquent. Concernant les sols, beaucoup d'auteurs sont donc tentés de n'évaluer que les services « marchands », notamment ceux d'approvisionnement et de régulation ³⁵. Mais l'exemple du stockage de carbone montre les limites d'une approche mono-service. Selon le prix du carbone, ce service – s'il était financé – pourrait s'avérer très valorisant ou, au contraire, très peu rémunérateur et, de ce fait, conduire à des changements de pratiques oblitérant les investissements initialement réalisés (par exemple, abandon du non-labour). Par ailleurs, la seule considération du service rendu et non du capital pose également question : toujours sur l'exemple de la séquestration du carbone, un agriculteur aurait intérêt à perdre du carbone avant d'entrer dans un système de financement de stockage de carbone car son potentiel de stockage serait alors plus important. Il s'agit donc bien de considérer à la fois le capital naturel que représente le sol et l'ensemble des services qu'il rend ³⁶.

Des chercheurs ³⁷ ont récemment appliqué cette approche pour évaluer un ensemble de treize services écosystémiques rendus par des sols volcaniques sous prairie en Nouvelle-Zélande (Tableau 4). Pour réaliser ces calculs, ils ont utilisé un modèle dynamique de sol (SPASMO ³⁸) qui représente les caractéristiques des sols (par exemple, concentration en N et P, teneur en matière organique, respiration des sols, émissions de N₂O, capacité en eau, etc.) en fonction du climat et des modes de gestion. Ces paramètres sont ensuite utilisés et combinés avec des données invariantes du sol (par exemple, profondeur, texture, nature des argiles) pour estimer les services rendus. Ainsi, la portance des sols est-elle estimée à travers la texture, la

densité et l'humidité du sol qui, combinés dans le modèle, proposent un nombre de jours durant lesquels la prairie est à même de supporter des animaux. De même, le modèle calcule annuellement les bilans d'azote, de phosphore et de carbone du système afin d'en déduire les flux. Les services étant estimés tous les ans durant trente-cinq ans, le calcul de la valeur de chaque service est fondé sur différentes méthodes économiques conduisant à un coût total moyen de 16 390 dollars par hectare et par an (Tableau 4).

Plus que le prix global en lui-même, il est intéressant de constater que les services ont des estimations, donc des contributions, très différentes au total. Logiquement, la fourniture d'herbe en quantité représente près du tiers du service, mais il ne s'agit finalement pas du service le plus important. En effet, les services de régulation – prévention des inondations, filtration / rétention de l'azote, du phosphore et de contaminants (pesticides, perturbateurs endocriniens, éléments traces) – contribuent pour plus de 65 % au coût total, alors même qu'ils n'ont actuellement aucune valeur marchande. Cela montre à quel point il est difficile, donc coûteux, de les remplacer contrairement, par exemple, à l'achat d'oligo-éléments pour compléter les rations si le sol n'en contient pas assez. Les flux de gaz à effet de serre jouent finalement très peu dans les estimations car le prix de la tonne d'équivalent CO₂ est trop faible pour avoir une influence sur le prix final.

Les auteurs en conviennent : plus que les valeurs absolues, c'est la démarche et les ordres de grandeurs qu'il faut garder à l'esprit. Cette méthode, qui combine le capital naturel du sol et les services rendus, démontre que les services aisés à évaluer, telle la fourniture de biomasse, ne sont pas nécessairement les plus importants. Les chercheurs signalent cependant que la prévalence des services de régulation sur les services d'approvisionnement peut être liée à un biais méthodologique, puisque la monétarisation sans prix de marché est plus délicate et repose sur des choix. Ainsi, d'autres technologies de traitement de l'azote, du phosphore ou des contaminants conduiraient à des coûts différents. Le service de recyclage des déchets est ainsi peu valorisé (78 dollars par hectare et

par an) car de nombreux procédés de remplacement existent et sont relativement bon marché. Finalement, cet exemple – parmi les plus complets à ce jour – démontre, une fois de plus, qu'il ne faut pas focaliser sur un seul service, mais considérer et protéger l'ensemble des services portés par les sols (d'ailleurs tous ne sont pas évalués : il manque notamment les services culturels).

3.3. La protection juridique des services écosystémiques du sol

Considérer les services écosystémiques du sol sous l'angle de la protection juridique a une conséquence évidente : cela implique que ces services mériteraient une attention particulière, justifiant une intervention du droit. En d'autres termes, cela signifie qu'un consensus aura émergé sur le besoin de les considérer juridiquement, se traduisant par un devoir de protection contre tout risque d'atteinte à leur encounter. Mais, pour le moment, la question des services écosystémiques reste largement un ovni dans le droit de l'environnement. À l'inverse des Américains ³⁹ qui s'en préoccupent depuis une dizaine d'années, les juristes français et européens s'en sont emparé depuis peu : la notion a récemment fait une entrée timide dans le droit.

Les mesures juridiques à prendre pour répondre à ce devoir de protection partagent la logique de celles destinées à toute protection juridique de l'environnement :

39. L'intérêt des juristes américains pour la notion de service écosystémique s'explique en grande partie par sa place au sein du droit américain de l'environnement. En 2008, des réglementations importantes, comme celle sur la conservation des zones humides, l'ont intégrée. Par ailleurs, des travaux plus anciens de chercheurs américains ont contribué à souligner les obstacles à la reconnaissance et à la protection juridique des services écosystémiques. Ils montrent également leur regard favorable à cette notion et l'intérêt de mieux la considérer juridiquement (J.B. Ruhl & R.J. Gregg, "Integrating Ecosystem Services into Environmental Law: A Case Study of Wetlands Mitigation Banking" (2001) 20 Stan. Envtl. L.J. 365; J.B. Ruhl, "Equitable Apportionment of Ecosystem Services: New Water Law for a New Water Age" (2003) 19 J. Land Use & Envtl. L. 47; J.B. Ruhl, "Ecosystem Services and the Common Law of the Fragile Land System" (2005) 20 Nat. Resources & Envtl. 3; J.B. Ruhl, "Toward a Common Law of Ecosystem Services" (2005) 18 St. Thomas L. Rev. 1, J.B. Ruhl, Steven E. Kraft, and Christopher L. Lant, *The Law and Policy of Ecosystem Services*, Washington, DC: Island Press, 2007).

34. Bullock et al., 2008.

35. Porter et al., 2009.

36. Robinson et al., 2013.

37. Dominati et al., 2014.

38. <http://tools.envirolink.govt.nz/dsss/soil-plant-atmosphere-system-model/>

- En premier lieu, protéger les services écosystémiques du sol ne renvoie pas uniquement à des mesures de prévention des atteintes : cela implique également des mesures de réparation. Traditionnellement, les premières ont été privilégiées au regard de l'irréversibilité des atteintes à l'environnement. Mais l'essor de la compensation pourrait modifier la donne.
- En deuxième lieu, une protection juridique de l'environnement ne présuppose pas un modèle prédéfini : la frontière entre protection et gestion reste mal définie. Il est en effet envisageable de protéger sans gérer, de même que la protection peut constituer l'une des composantes de la gestion de l'environnement. Plus simplement, ces questionnements impliquent une réflexion élargie sur le degré d'intervention humaine.
- Enfin, les mesures de protection juridique ne renvoient pas à des outils de protection spécifiques. Ceux-ci peuvent être des instruments économiques comme réglementaires, c'est-à-dire des outils juridiques traditionnels (dits de « *command and control* »). Le fait de privilégier le levier financier plutôt que la règle de droit traditionnelle relève d'une culture de protection de l'environnement différente.

De manière générale, le discours actuel souffle en faveur d'un plus grand libéralisme économique et l'un des temps forts dans le domaine de l'environnement est le Livre vert de la Commission européenne datant de 2007 sur les marchés de l'environnement⁴⁰. Il affirme clairement l'option de la Communauté en faveur d'une régulation de l'environnement par le marché. Concernant les services écosystémiques, l'option de les protéger par des mesures financières est privilégiée, répondant à une logique en marche. En réalité, la controverse porte davantage sur le fait d'accorder une valeur économique aux services écosystémiques, laquelle serait exacerbée par une protection via leur rémunération dans la mesure où leur rémunération repose, par définition, sur une évaluation monétaire.

Ce constat mérite d'être analysé plus en détail. D'une part, recourir à une rémunéra-

tion ou à un paiement des services écosystémiques pour les protéger implique, a priori, d'en connaître la valeur économique. Cette recherche est aujourd'hui prônée par de nombreux économistes. Elle est initiée pour médiatiser des menaces planétaires et mettre l'accent sur des valeurs non-marchandes. Elle n'est pas, en soi, dénuée d'intérêt puisqu'elle révèle, à sa manière, une richesse inconnue. Mais cette forme de valorisation quantifiée en unités monétaires reflète sans aucun doute un impérialisme économique : en cela, elle suscite les foudres des tenants d'une vision du monde qui ne serait pas dominée par l'argent. L'approche juridique n'a pas échappé à cette hégémonie économique en usant de référentiels monétaires. Comme l'indiquent les auteurs du rapport français sur l'approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes⁴¹, accorder une valeur à la biodiversité et aux services écosystémiques n'a rien de choquant en soi. En effet, la réparation des dommages causés à l'environnement est largement fondée sur une évaluation monétaire. Néanmoins, la finalité d'une évaluation économique pourrait se révéler plus problématique dans la mesure où elle constituerait une étape vers une marchandisation de la nature. Dans cette hypothèse, le droit est à même de saisir la nuance importante entre évaluation monétaire et marchandisation, en émettant des réserves sur la possibilité pour ces biens actuellement non-marchands de faire l'objet d'échanges marchands.

D'autre part, le focus mis sur la rémunération des services écosystémiques peut conduire à négliger des actions financières en faveur de la biodiversité en général et, ainsi, à ne s'intéresser qu'à ce qui est utile à l'homme. Cette critique récurrente de l'anthropocentrisme des services écosysté-

miques⁴² est justifiée au regard de la conception réductrice des services et du pouvoir attractif, voire absorbant, de la notion.

Enfin, les critiques à l'origine de l'idée même d'un paiement pour services écosystémiques peuvent être partiellement infondées car elles reposent sur un postulat sémantique qui n'est pas évident. Même si les terminologies entre « *services écosystémiques* » et « *services environnementaux* » sont proches, elles ne renvoient pas à la même logique. Les premiers répondent à la définition du MEA comme étant les bénéfices que les humains tirent des écosystèmes, alors que les seconds expriment les efforts humains réalisés en faveur de la nature⁴³. À ce titre, ces derniers participent sans aucun doute à la protection des services écosystémiques, mais ils évoluent selon une logique initialement autonome. Dès lors, ils pourraient s'avérer en partie déconnectés, non pas nécessairement de l'évaluation monétaire des services écosystémiques, mais d'une marchandisation en tant que telle de ces derniers. En effet, l'évaluation monétaire des services écosystémiques pourrait se présenter comme un indice pour orienter les efforts humains – autrement dit, les services environnementaux – à fournir, mais l'accent resterait mis sur le travail réalisé. Le lien entre services environnementaux et écosystémiques pourrait donc être dissocié sous peine de tomber dans une impasse. Le paramètre temporel pour l'amélioration, le retour ou le maintien d'un service écosystémique s'annonce difficilement mesurable à l'échelle de pratiques humaines. De plus, en raison des interactions complexes au sein des écosystèmes, associer la rémunération d'un

42. N. Hervé-Fournereau et A. Langlais, « Ecosystem services: promoting new synergies between European strategies on climate and biodiversity ? » in F. Maes, A. Cliquet, W. du Plessis et H. MacLeod-Kilmurray (sous la dir.), *Biodiversity and climate change, Linkages at International, National and local level*, Edward Elgar Editor, 2013, pp. 65-93. I. Doussan, « La représentation juridique de l'environnement et la Nomenclature des préjudices environnementaux », in *La nomenclature des dommages environnementaux*, éd. LGDJ, 2012, p. 107. V. Maris, *Nature à vendre, Les limites des services écosystémiques*, éd. Quae, 2014.

43. Rapport de la FAO, « Payer les agriculteurs pour les services environnementaux », 2007 et Barnaud et al., « Vers une mise en débat des incertitudes associées à la notion de service écosystémique », revue *vertigo*, vol. 11, mai 2001 ; A. Langlais (sous la dir.), *L'agriculture et les paiements pour services environnementaux : quels questionnements juridiques ?*, Presses universitaires de Rennes, 2014, à paraître.

40. COM (2007) 140 final du 28 mars 2007.

41. Rapport sur l'approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes, sous la responsabilité de B. Chevassus-au-Louis, centre d'analyse stratégique (CAS).

service environnemental à un service écosystémique n'a pas de sens : un bouquet de services serait déjà plus approprié.

Pour autant, si l'on considère que la valorisation des services écosystémiques passe par la valorisation des pratiques à finalité environnementale, une question se pose : la protection juridique des services écosystémiques nécessite-t-elle une protection juridique particulière, supplémentaire, différente de celle existante ? Une réponse positive à cette question soulève à l'heure actuelle un problème de taille. À supposer que l'on veuille protéger de façon particulière les services écosystémiques, une incertitude demeure sur l'objet à protéger, en raison d'une définition non stabilisée de ces derniers. En outre, une protection spécifique de ces services, donc une protection plus ciblée de l'environnement, exigerait des résultats, même intermédiaires, loin d'être évidents à fixer ⁴⁴.

Sur la première question, relative à l'absence de définition stabilisée des services écosystémiques, c'est une source de difficultés pour le droit dans la mesure où les règles applicables, soit le régime juridique, sont généralement attachées à l'existence d'une catégorie juridique. Actuellement, il existe une définition juridique du service par la directive 2004 / 35 du Parlement européen et du Conseil du 21 avril 2004 sur la responsabilité environnementale concernant la prévention et la réparation des dommages environnementaux, mais elle ne sert que les objectifs de cette directive : à savoir, établir un cadre de responsabilité environnementale fondée sur le principe pollueur – payeur en vue de prévenir et réparer les dommages environnementaux ⁴⁵, c'est-à-dire des dommages existants indépendamment d'une quelconque atteinte à des intérêts humains. Cela explique la définition extensive des services ici, selon laquelle il s'agit des « *fonctions assurées par une ressource naturelle au bénéfice d'une autre ressource naturelle ou du*

public » ⁴⁶. La notion de service se propage également dans d'autres législations sans, pour le moment, faire l'objet de définitions. Outre le risque de définitions multiples de nature à complexifier l'appréhension juridique des services écosystémiques, la confusion entre service et fonction renforce ce sentiment de complexité. Elle est présente dans l'actuelle définition des services et elle est sous-entendue, par exemple, dans le projet de directive sur les sols de 2006 qui n'utilise pas de cette notion de « *service* », mais de celle de « *fonction* » qui semble néanmoins évoquer celle de service. Selon plusieurs auteurs ⁴⁷, une fonction représente le potentiel d'un écosystème à délivrer un service qui dépend lui-même de processus et de structures écologiques ⁴⁸. Toutefois, le découpage des services opéré par le *Millennium ecosystem assessment* (MEA) commandité par les Nations unies semble troubler cette distinction s'agissant des services de support ⁴⁹.

En réalité, cette confusion renvoie directement à la seconde interrogation : à savoir, la capacité d'identifier les services écosystémiques et de les distinguer de la fonction de l'écosystème dont ils sont issus afin de les évaluer et de mesurer les efforts à fournir à leur encontre. À supposer que cet exercice soit envisageable et permette d'exiger un niveau de protection et de contrôle associé, les services seront-ils tous traités selon la même priorité ? Là encore, il existe une autonomie juridique. Le droit n'a pas nécessairement vocation à tout protéger, c'est-à-dire à protéger l'ensemble des services écosystémiques. Une cohérence dans la mise en place d'un régime de protection s'annonce, en tout état de cause, une priorité.

CONCLUSION

46. Article 2-13 de la directive. S'agissant de la version française transposée : selon l'article L. 161-1- 4° du Code de l'environnement, il est fait mention des « services écologiques » : « affectent les fonctions écologiques, c'est-à-dire les fonctions assurées par les sols, les eaux et les espèces et habitats mentionnés au 3° au bénéfice d'une de ces ressources naturelles ou au bénéfice du public à l'exclusion des services rendus par des aménagements réalisés par l'exploitant ou le propriétaire ».

47. En particulier R.S De Groot.

48. R.S De Groot ; « Functions of nature: evaluation of nature in environmental planning », *Management and decision making*, 1992. Le Tableau 2 donne des exemples de distinction entre fonctions et services.

49. Cf. partie 2.4. de cet article.

Le concept de service écosystémique a fait évoluer la prise en compte des sols en mettant l'accent sur leur rôle positif au bénéfice de l'homme et sur leur multifonctionnalité. Il a également ouvert la prise en compte de la question du « *sol* » par des disciplines nouvelles, notamment issues des sciences sociales. On peut ainsi considérer que ce concept peut être utile pour faire reconnaître l'importance des sols, notamment par les décideurs et le grand public.

La recherche doit progresser pour proposer une ou des démarches permettant de mesurer, exprimer et, si possible, spatialiser les différents services rendus par les sols afin qu'ils puissent être intégrés dans la décision publique. Obtenir des données quantitatives sur les services devient un enjeu d'autant plus important qu'il est désormais question de rémunérer ces services, de les protéger ou de les restaurer.

Parallèlement, un dialogue interdisciplinaire doit s'effectuer pour développer l'évaluation économique des services, ainsi que sa traduction monétaire afin de renforcer la prise en compte des sols lors des projets de développement agricole ou d'aménagement du territoire. Ces travaux sont nécessaires car certains services sont difficiles à évaluer, alors qu'ils bénéficient pourtant à l'ensemble de la population. Ainsi, par exemple, établir que les services de régulation, peu ou non marchands, portés par les sols peuvent représenter, en valeur, davantage que les services d'approvisionnement marchands, constitue un résultat qui pourrait peser dans les décisions publiques.

Cependant, la vision anthropocentrée sous-jacente est également critiquable puisque les fonctions jouées par les sols au sein des écosystèmes ne peuvent être restreintes aux seules fonctions utiles ou jugées utiles par l'homme. En ce sens, l'intégration de la notion de « *capital naturel* » constitue une avancée car elle permet de considérer le sol non seulement comme générateur de services, mais aussi comme un bien à préserver. L'élargissement du concept au-delà de la sphère économique sous-jacente doit donc continuer à être entreprise en envisageant notamment des voies complémentaires de valorisation et de protection des services rendus.

44. A. Langlais, « L'appréhension juridique de la qualité des sols agricoles par le prisme des services écosystémiques », *Revue de droit rural*, à paraître.

45. JOUE n° L 143 du 30 avril 2004

Bibliographie

- Blum, W.E.H. 2006. Functions of soil for society and the environment. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 4:75–79.
- Bouma, J. 2001. The new role of soil science in a network society. *Soil Sci.* 166:874–879.
- Bullock, C., Kretch, C. & Candon, E. 2008. The Economic and Social Aspects of Biodiversity Benefits and Costs of Biodiversity in Ireland. www.npws.ie/en/media/NPWS/Publications/Biodiversity/Media,6432,en.pdf
- Chevassus-au-Louis, B., Salles, J. M., & Pujol, J. L. 2009. Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes. Contribution à la décision publique. Paris, La documentation française.
- Cluzeau D., Blanchart E., Peres G., Piron D., Cuendet G., Fayolle L., Lavelle P. 2011. Faune du sol et lombriciens dans les sols tempérés agricoles Sols et Environnement. 2e édition. in M.C. Girard, C. Walter, J.C. Remy, J. Berthelin & J.L. Morel eds. Dunod, Paris., 85-107
- Constanza R., Daly H.E. 1987. Towards an ecological economics, *Ecological modelling*, 38,162,1-7.
- Costanza, R., D'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253–60.
- Decaëns, T., Jiménez, J. J., Gioia, C., Measey, G. J., & Lavelle, P. 2006. The values of soil animals for conservation biology. *European Journal of Soil Biology*, 42, S23-S38.
- Dominati, E., M. Paterson, and A. Mackay. 2010a. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecol. Econ.* 69:1858–1868.
- Dominati, E., Mackay, A., Green, S., Patterson, M., 2014. A soil change-based methodology for the quantification and valuation of ecosystem services from agro-ecosystems: A case study of pastoral agriculture in New Zealand. *Ecological Economics* 100, 119-129.
- Dörfliger N., Gascuel-Oudoux C. 2014. Connaître et gérer les sols pour préserver l'eau. *Géosciences*, N° 18
- Doran, J.W., and T.B. Parkin. 1996. Quantitative indicators of soil quality: A minimum data set. p. 25–37. In J.W. Doran and A.J. Jones ed. *Methods for assessing soil quality*. SSSA Spec. Publ. 49. SSSA, Madison, WI
- Dymond, J.R., Ausseil, A.G.E., Ekanayake, J.C., Kirschbaum, M.U.F., 2012. Tradeoffs between soil, water, and carbon - a national scale analysis from New Zealand. *Journal of Environmental Management* 951, 124-131.
- Feng, H., Zhao, J., & Kling, C. L. 2002. The time path and implementation of carbon sequestration. *American Journal of Agricultural Economics*, 134-149.
- Hedde, M., Pérès, G., Villenave, C., Gattin, I., Le Guédard, M., Harris-Hellal, J., Dequiedt, S., De Vaufléury, A., Taibi, S., Grand, C., Bispo, A. 2014. Comment calculer les services écosystémiques rendus par les sols: un essai sur la base des résultats des données du programme Bio2 (Bioindicateurs de qualité des sols). Actes des 12emes Journées d'Etude des Sols, Le Sol en Héritage, Le Bourget du Lac (<http://jes2014.univ-savoie.fr/index.php/fr/actes>)
- Huguenin, M. T., Leggett, C. G., & Paterson, R. W. 2006. Economic valuation of soil fauna. *European journal of soil biology*, 42, S16-S22.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC
- Morel JL, Chenu C, Lorenz K 2014 Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas SUITMAs, *Journal of Soils and Sediments*, DOI 10.1007/s11368-014-0926-0
- Pimentel, D., Wilson, C., McCullum, C., Huang, R., Dwen, P., Flack, J. & Cliff, B. 1997. Economic and environmental benefits of biodiversity. *BioScience*, 747-757.
- Porter, J., Costanza, R., Sandhu, H., Sigsgaard, L., & Wratten, S. 2009. The value of producing food, energy, and ecosystem services within an agro-ecosystem. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 384, 186-193.
- Robert, S. et al. 2013. Préconisation d'utilisation des sols et qualité des sols en zone urbaine et péri-urbaine - application du bassin minier de Provence, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie.
- Robinson, D. A., Hockley, N., Cooper, D. M., Emmett, B. A., Keith, A. M., Lebron, I., Robinson, J. S. 2013. Natural capital and ecosystem services, developing an appropriate soils framework as a basis for valuation. *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 1023-1033.
- Rutgers, M., Wijnen, H.J.v., Schouten, A.J., Mulder, C., Kuiten, A.M.P., Brussaard, L., Breure, A.M., 2012. A method to assess ecosystem services developed from soil attributes with stakeholders and data of four arable farms. *Science of the Total Environment* 415, 39-48.
- Senthilkumar K., A. Mollier, M. Delmas, S. Pellerin, T.s Nesme, Phosphorus recovery and recycling from waste: An appraisal based on a French case study, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 87, June 2014, Pages 97-108,
- Séré G, Schwartz C, Ouvrard S, Sauvage C, Renat JC, Morel JL 2008 Soil construction: A step for ecological reclamation of derelict lands. *J Soils Sediments* 8:130-136
- Soussana JF 2014. Le rôle des sols dans le cycle du carbone. *Géosciences*, N°18.
- Thiebaut L. 2011 Sol, environnement, société : fonctions, patrimoine, politiques. In : Girard M.C., Walter C., Rémy J.C., Berthelin J., Morel J.L. Dirs. *Sols et environnement. 2*. Dunod, Paris FRA ; Sciences Sup. pp : 774-797
- Trabucchi, M., Puente, C., Comin, F.A., Olague, G., Smith, S.V., 2012. Mapping erosion risk at the basin scale in a Mediterranean environment with open-cast coal mines to target restoration actions. *Regional Environmental Change* 12, 675–687.
- Westman, W.E. 1977. How much are nature's services worth? *Science* 197:960–964
- Wijnen, H.J.v., Rutgers, M., Schouten, A.J., Mulder, C., Zwart, D.d., Breure, A.M., 2012. How to calculate the spatial distribution of ecosystem services - natural attenuation as example from The Netherlands. *Science of the Total Environment* 415, 49-55.