

# Vers une évaluation des coûts de la dégradation des sols :

## Éléments de cadrage, outil d'analyse et études de cas

J.-S. Ay<sup>(1\*)</sup>, N. Pousse<sup>(2)</sup>, L. Rigou<sup>(3)</sup> et L. Thannberger<sup>(4)</sup>

- 1) CESAER, AgroSup Dijon, INRAE, Université de Bourgogne Franche-Comté, 26 boulevard du Docteur Petitjean, 21000 Dijon, France
- 2) ONF, Département RDI, Pôle Recherche Développement et Innovation d'Avignon, 1175 chemin du Lavarin, 84000 Avignon, France
- 3) ASUP, Atelier Sols, Urbanisme et Paysages, 12 rue de l'église, 65690 Angos, France
- 4) VALGO, Laboratoire VALGO – PIC, 72 rue Aristide Briand, 76650 Petit-Couronne, France

\* : Auteur correspondant : jean-sauveur.ay@inrae.fr

### RÉSUMÉ

La dégradation d'un sol regroupe l'ensemble des modifications physiques, chimiques et biologiques qui nuisent aux fonctions et services qu'il peut potentiellement fournir. Nous présentons dans cet article des éléments de cadrage sur la définition et la mesure du coût économique de la dégradation des sols, nous proposons un outil permettant de comparer les différentes dégradations de manière unifiée et nous illustrons ces éléments sur des études de cas. Le focus sur les fonctions et services rendus par les sols permet de faire apparaître, dans une analyse multi-dimensionnelle, la grande variété des impacts que les dégradations entraînent. Cette variété implique toutefois que la traduction en coûts économiques n'est pas en l'état opérationnelle pour guider les décisions privées et publiques. Nous proposons des recommandations pour avancer sur ce point en conclusion.

### Mots clés

Évaluation économique, aide à la décision, impact multi-factoriel, perception du sol.

Comment citer cet article :

Ay J.-S., Pousse N., Rigou L. et Thannberger L. - 2020 - Vers une évaluation des coûts de la dégradation des sols : Éléments de cadrage, outil d'analyse et études de cas, *Étude et Gestion des Sols*, 27, 147-161

Comment télécharger cet article :

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

Comment consulter/télécharger

tous les articles de la revue EGS :

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

**SUMMARY****TOWARD AN ASSESSMENT OF THE COSTS OF SOIL DEGRADATION:****Framework, analytical tool, and case studies**

Soil degradation brings together all the physical, chemical and biological modifications that impair the functions and services that soils can potentially provide. We present in this article framing elements on the definition and the measurement of the economic cost of soil degradation, we propose an analytical tool allowing to compare the different degradation in a unified way, and we illustrate these elements on case studies. The focus on the functions and services provided by soils allows us to show in a multi-dimensional analysis the wide variety of impacts. With the current level of knowledge, this variety implies that the assessment of economic costs is not yet operational to guide private and public decisions. We offer recommendations for advancing on this point in conclusion.

**Key-words**

Economic evaluation, decision science, meta-indicators, stakeholders' perceptions.

**RESUMEN****HACIA UNA EVALUACIÓN DE LOS COSTOS DE LA DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS:****Elementos de encuadramiento, herramienta de análisis y estudios de casos**

La degradación de un suelo agrupa el conjunto de las modificaciones físicas, químicas y biológicas que perjudican a las funciones y servicios que él puede potencialmente abastecer. Presentamos en este artículo elementos de encuadramiento sobre la definición y la medición del costo económico de la degradación de los suelos, proponemos una herramienta que permite comparar las diferentes degradaciones de manera unificada e ilustramos estos elementos por estudios de casos. El focus sobre las funciones y servicios prestados por los suelos permite hacer aparecer en un análisis multidimensional la gran diversidad de los impactos que las degradaciones provocan. Sin embargo, esta diversidad implica que la traducción en costos económicos no es en su forma actual operacional para guiar las decisiones privadas y públicas. Proponemos recomendaciones para progresar sobre este punto en conclusión.

**Palabras clave**

Evaluación económica, ayuda a la decisión, conjuntos de indicios, percepciones de actores..

De nombreuses activités humaines impactent les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols, et modifient ainsi leur capacité à remplir des fonctions au sein des écosystèmes et à fournir des services pour la société. La notion de dégradation est habituellement utilisée pour désigner les modifications qui nuisent à la fourniture de ces fonctions et services (FAO et ITPS, 2015). Limiter la dégradation des sols est une préoccupation récurrente dans les politiques nationales et internationales de développement durable, qui peine cependant à se traduire en mesures efficaces.

À l'échelle mondiale, la FAO considère en 2015 que 40 % des surfaces actuellement cultivées sont soumises à des processus de dégradation. Le rapport IPBES (2018) évalue à 10 % du produit intérieur brut mondial le coût de la dégradation des terres. Le rapport IPCC (2019) montre que la dégradation des terres impacte les conditions de vie sur environ un quart de la surface émergée de la terre (hors glaciers). Les données sont néanmoins encore trop insuffisantes pour qualifier finement l'évolution de l'état global des sols en France.<sup>1</sup> En 2016, 1,6 milliard d'euros (près de 3,4 % de la dépense nationale française consacrée à la protection de l'environnement) sont destinés à des actions de protection des sols (MTES, 2019), en termes de dépollution (52,4 %), de prévention des infiltrations polluantes (38,4 %), de mesure et surveillance de l'état des milieux (5,2 %) et de protection des sols contre l'érosion et autres dégradations physiques (4,0 %). Ces dépenses sont en légère baisse par rapport à 2012 (-2,6 %), mais restent globalement stables depuis une dizaine d'années (+0,6 % en moyenne annuelle depuis 2006).

Alors que la nécessité du maintien de la capacité des sols à remplir des fonctions et à fournir des services fait l'objet d'un consensus à de nombreuses échelles décisionnaires, la multiplication des cadres conceptuels différents (quelquefois incompatibles) fait qu'il n'existe pas de consensus sur l'évaluation des coûts de la dégradation des sols (Robinson *et al.*, 2009 ; Dominati *et al.*, 2010).<sup>2</sup> Cette évaluation économique est pourtant un préalable nécessaire pour appréhender le niveau du préjudice, le comparer aux impacts positifs qu'ont eu ces mêmes modifications des sols au cours de l'histoire et envisager des solutions correctives. Elle passe en particulier par la confrontation des indicateurs usuels sur l'état des sols aux fonctions et services rendus (Blanchart *et al.*, 2019). De plus, l'intérêt de disposer de valeurs économiques se situe à deux niveaux qu'il convient de distinguer. D'un côté, elles permettent de juger l'intérêt de limiter ou de renverser les processus de

modifications (les bénéfiques sont-ils supérieurs aux coûts ?) et d'un autre côté elles permettent de prioriser les actions à mettre en œuvre (quelles dégradations ont le plus fort impact négatif et doivent être traitées en priorité ?) Les difficultés associées à l'évaluation de ces coûts sont d'ordre théorique, technique et pratique.

D'un point de vue théorique, une clarification terminologique et conceptuelle se révèle nécessaire pour harmoniser les différentes acceptions de la notion de coût qui, bien qu'utilisée dans le langage courant, revêt des définitions différentes selon les approches (par exemple, le coût comptable diffère du coût économique, tout comme le coût privé du coût social). Il s'agit également de préciser le statut juridico-économique des ressources en sols, en particulier le régime de propriété qui articule les causes et les conséquences des dégradations, en lien avec les relations qui existent entre les fonctions des sols et les services qu'ils rendent aux sociétés humaines. Nous prendrons alors appui sur la littérature économique en lien avec les 9 fonctions du sol reportées dans le rapport du *Joint Research Center* à l'Agence Européenne de l'Environnement (Jones *et al.*, 2012)<sup>3</sup> et les 11 services écosystémiques décrits par le *Millenium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005)<sup>4</sup> qui constituent le dénominateur commun que l'on retrouve dans des approches plus récentes comme l'évaluation française des écosystèmes et services écosystémiques (EFESE, 2017) ou la *common international classification of ecosystem services* (CICES, Haines-Young et Potschin, 2018). L'outil d'analyse que nous proposons permet de combiner, pour chaque service, l'ensemble des fonctions correspondantes et ainsi déterminer des impacts par dégradation (Graves *et al.*, 2015) qui pourront servir de base à l'analyse économique (l'outil est disponible en matériel additionnel, accessible sur :

<https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2020/05/CaMPISol.xlsx>)

D'un point de vue technique, la difficulté majeure provient de la prise en compte de la diversité et des interactions entre les processus qui relient les dégradations des sols aux fonctions que ces derniers remplissent. Il apparaît alors une forte hétérogénéité des connaissances scientifiques disponibles pour mesurer ces impacts. Différents indicateurs pertinents mais partiels existent pour chaque impact identifié. Cette hétérogénéité est complexifiée par la nécessité de comparer les fonctions entre elles, face à une ou des dégradations qui en impactent plusieurs. Nous avons pour cela recours au concept de potentiel estimé pour chacune des fonctions et chacun des services afin

<sup>1</sup> Dans la littérature scientifique sur la dégradation des sols, la France se positionne à la 14<sup>e</sup> position des pays producteurs d'articles entre 1990 et 2019 (Xie *et al.*, 2020).

<sup>2</sup> Pour se faire une idée des différences qui existent entre les cadres conceptuels, voir le commentaire à l'article de Dominati *et al.* (2010) ainsi que la réponse des auteurs dans la revue *Ecological Economics*.

<sup>3</sup> Nous ne considérons pas la désertification pour sa faible menace actuelle en France métropolitaine. Ces fonctions se retrouvent, en plus détaillées, dans le rapport sur l'état des sols mondiaux (FAO et ITPS, 2015).

<sup>4</sup> Pour l'évaluation française des écosystèmes et services écosystémiques, les services écosystémiques (non limités aux sols) sont classés de manière différente, plus cohérente sur certains points pour une évaluation. Dans la précision du cadre conceptuel (EFESE, 2017), les auteurs proposent une table de correspondance avec le MEA. Robinson *et al.* (2017) proposent une revue de la littérature plus extensive.

de pouvoir comparer des sols aux capacités différentes dans un référentiel cohérent. Nous illustrons cela sur un cas d'étude en forêt où des nombreuses mesures scientifiques permettent de construire des indicateurs sur les effets du tassement des sols. Nous démontrons l'utilité de la matrice des impacts pour lister les effets de la dégradation des sols en vue d'une évaluation économique. Elle permet en particulier de présenter de manière exhaustive les impacts et ainsi de limiter les biais dans l'évaluation.

D'un point de pratique, notre outil d'analyse de la dégradation des sols a été confronté aux perceptions des acteurs sur le terrain, dans des territoires agricoles ruraux sur diverses problématiques actuelles (urbanisation, inondation, diversification). Les sols agricoles étant majoritairement sous le régime de la propriété privée, l'applicabilité d'un outil doit correspondre, entre autres, aux attentes et aux perceptions des agriculteurs et gestionnaires comme cela est désormais bien établi (EFESE, 2017). De fortes hétérogénéités existent entre les perceptions des impacts des différentes dégradations sur les différentes fonctions remplies par les sols. L'outil d'analyse développé et les représentations graphiques qu'il permet se révèlent déterminants pour communiquer sur les impacts de la dégradation des sols. La référence à l'exhaustivité des fonctions et services remplis par les sols permet aux acteurs de se questionner sur un large panel d'impacts de leurs pratiques, alors que la traduction en termes économiques pourrait se révéler opérationnelle pour orienter leurs choix.

Notre approche contribue à renforcer les interfaces entre l'utilisateur final (gestionnaire et/ou l'exploitant) et l'expert du sol, entre la recherche et l'opérationnalité, afin d'aider au choix, à la mise en œuvre et à l'interprétation des paramètres pour la réalisation d'un diagnostic qui soit adapté aux contextes et aux objectifs posés. En ce sens, elle complète les travaux récents reportés dans Blanchart *et al.* (2019) [voir Calvaruso *et al.* (soumis)] qui développent une approche similaire pour évaluer les fonctions « stockage et séquestration du carbone », « rétention, circulation et infiltration de l'eau » et « rétention et fourniture des nutriments » dans un contexte similaire (en milieu agricole sur une aire de captage) et dans un contexte différent (en milieu urbain pour intégrer la qualité des sols dans un projet urbain). Le chemin à parcourir pour dresser un inventaire systématique de la dégradation des sols pour orienter les politiques publiques en connaissance de cause est encore long, nous proposons alors quelques perspectives basées sur l'évaluation économique en conclusion.

Nous présentons dans la section 2 suivante des éléments de cadrage théoriques sur l'évaluation que nous proposons. La section 3 contient la présentation de l'outil d'analyse que nous proposons, suivie des deux études de cas présentées dans la section 4, et la dernière section 5 conclue.

## ÉLÉMENTS DE CADRAGE

Nous posons la question de l'évaluation des coûts de la dégradation des sols en termes économiques. Cela permet d'aborder cette question sous l'angle des effets sur la société et de pouvoir comparer ces dégradations avec d'autres aspects de la vie humaine. La démarche que nous proposons ici est néanmoins pluripartite (elle a été développée par un travail joint entre des chercheurs travaillant dans des instituts publics et des praticiens travaillant dans des bureaux d'étude privés) afin de dépasser les limites propres à cette approche disciplinaire, tout en nous attachant à préserver sa cohérence interne. La littérature économique contient de nombreuses contributions sur l'évaluation des coûts de la dégradation des sols, à la fois sous forme d'articles académiques (Greenstone et Gallagher, 2008 ; Linn, 2013 ; Taylor *et al.*, 2016 ; Timmins, 2017) et de rapports (EPA, 2011 ; Nkonya *et al.*, 2016 ; ADEME, 2018). Dans la continuité de cette littérature, les éléments de cadrage ci-dessous visent à clarifier (i) les différentes définitions du coût de la dégradation des sols, (ii) les différents statuts juridico-économiques qui leur sont associés, (iii) les différentes relations entre fonctions des sols et services rendus, (iv) la différence entre dégradation des sols et dégradation des fonctions ou services rendus par les sols, et (v) les différents degrés de réversibilité de ces dégradations.

### (i) Quelle définition pour le coût de la dégradation des sols ?

La notion de coût en économie est différente de la notion de coût en comptabilité, cette dernière correspondant à une dépense associée à une action. Ainsi, le coût comptable de la dégradation d'un sol peut se définir comme le coût de sa réhabilitation, uniquement lorsque cette réhabilitation est techniquement faisable.<sup>5</sup> Cette mesure est d'une grande importance pour décider des choix de gestion et les mettre en œuvre concrètement. En revanche, l'acception économique se focalise sur les opportunités que la dégradation empêche (le manque à gagner, ou coût d'opportunité). Le coût de la dégradation d'un sol se définit alors comme l'ensemble des valeurs associées à la ressource qui n'existent plus suite à la dégradation. Il s'agit d'une mesure brute de ce que la société perd, indépendamment des possibilités de réhabilitation. Le coût économique se base sur la différence entre une valeur potentielle et une valeur réalisée telle que nous le présenterons par la suite dans notre outil d'analyse. Cette définition de la dégradation n'est par ailleurs pas la seule qui découle de l'approche économique. La comparaison entre les coûts de l'action et les coûts de l'inaction peut être également mobilisée (Nkonya *et al.*, 2016) bien que cette définition ne soit pertinente que pour

<sup>5</sup> À notre sens, le terme réhabilitation inclut la restauration dans sa définition, et donc la réparation.

des fonctions des sols qui peuvent être réhabilitées, une limite que notre approche permet de dépasser.<sup>6</sup>

## (ii) Quel statut juridico-économique pour les sols ?

Le coût de la dégradation d'un sol n'a pas les mêmes causes et conséquences selon le statut juridico-économique de la ressource à un moment donné, selon son régime de propriété en particulier. Le propriétaire d'un sol, par les droits d'usage souvent associés, contrôle à des degrés variables les causes de sa dégradation alors qu'il ne subit souvent qu'une partie des conséquences. C'est pour cela qu'il convient de distinguer les coûts privés qui correspondent aux coûts supportés par le propriétaire des coûts sociaux qui correspondent à ce que le reste de la société supporte (aujourd'hui et demain). Typiquement, ces coûts sociaux ne sont pas pris en compte dans les choix individuels et nécessitent une régulation externe de type politique publique pour être pris en considération par les individus. Les méthodes d'évaluation des coûts vont être sensiblement différentes selon leur nature privée ou sociale, nous attacherons une importance particulière à les distinguer dans la mesure des impacts.

La distinction entre les coûts privés et sociaux trouve un certain écho dans le statut de bien commun souvent attribué au sol (Creutzig, 2017 ; Pétel et Potier, 2018), bien qu'elle s'en écarte sensiblement. La notion de bien commun a différentes significations selon les disciplines (et selon les langues), mais le sol n'est pas généralement un bien commun (*common good*) au sens de l'économie.<sup>7</sup> Pour la discipline, un bien commun est un bien dont l'accès est libre, au sens où l'on ne peut pas exclure d'autres usagers. Un parcours collectif de type alpage est un bien commun emblématique où il y a un libre accès. Il y a par ailleurs une rivalité dans l'usage qui est la deuxième condition que doit remplir un bien commun. Cela signifie que son usage par une personne contraint l'usage pour d'autres personnes (la quantité d'herbe disponible à un moment donné pour le pâturage est limitée). Une terre agricole est un bien privé dont l'accès est limité et l'usage rival, même s'il produit des coûts sociaux externes aux intérêts du propriétaire. Un paysage n'est pas non plus un bien commun, c'est un bien

public car l'accès est libre et l'usage est non-rival : regarder un paysage n'empêche pas que d'autres personnes le regardent (ce qui n'empêche pas la présence d'effets de congestion). Cette distinction public/privé/commun est pertinente car les différents statuts amènent des régulations différentes. Nous préférons donc considérer le sol comme un bien privé dont la dégradation présente des coûts sociaux externes aux intérêts des propriétaires, qu'il convient de prendre en compte dans le coût économique de la dégradation. De même, un coût social tel que celui attribué à la perte de biodiversité peut devenir un coût privé si, par exemple, les prix des produits agricoles sont différenciés selon leur impact sur la biodiversité. Notons que notre cadre d'analyse du coût de la dégradation est valable pour un statut juridico-économique donné qui prévaut en France actuellement. L'évaluation des coûts que nous proposons n'implique pas de changement de ce côté (Donadieu *et al.*, 2016).

## (iii) Fonctions des sols ou services rendus par les sols ?

La distinction entre les fonctions des sols et les services qu'ils rendent est en revanche peu effectuée en économie, où la notion de service rendu est privilégiée. La pertinence de la notion de « fonctions remplies par les sols » pour leur gestion est également questionnée dans des publications en sciences de l'environnement (p. 11-15, Baveye *et al.*, 2016) car elle n'est pas centrale pour statuer sur la « bonne » décision (faut-il réhabiliter un sol ? Faut-il contraindre sa dégradation ?). Elle possède néanmoins une certaine opérationnalité (sur quelles fonctions agit la dégradation ?) et l'action de rétablir un service rendu par un sol s'effectue typiquement par le rétablissement d'une ou plusieurs de ses fonctions. La notion de causalité des fonctions des sols sur les services rendus peut être pertinente pour comparer les bénéfices issus des services rendus par les sols aux coûts de réhabilitation de leurs fonctions. Par contre, il y a une certaine asymétrie entre ces deux approches car l'identification des fonctions dégradées est un préalable à l'analyse des services, alors que la réciproque n'est pas vraie. Nous choisissons de retenir le concept de fonction des sols afin de les relier plus facilement à la dégradation physique, chimique et biologique des sols, par contre nous nous limitons aux fonctions qui produisent un service au sens du MEA (2005). De manière similaire au cadre conceptuel retenu pour l'EFESE en 2017, nous considérons que les fonctions sont internes aux écosystèmes, alors que les services se définissent par rapport aux sociétés humaines (*figure 1.1* dans EFESE, 2017). Plus concrètement, nous faisons référence aux fonctions des sols afin de gagner en précision sur les origines des services rendus (voir l'outil dans le matériel additionnel). La distinction entre fonctions et service apparaît surtout au moment de leur mesure, car les unités de compte sont fondamentalement différentes. Ainsi, au niveau de quantification auquel notre travail a abouti, cette distinction n'est pas fondamentale.

6 L'acceptation économique permet d'inclure le coût des actions de prévention sans modification majeure du cadre conceptuel (par le concept du coût d'opportunité). Il s'agit d'évaluer la différence entre une situation avec et une situation sans prévention. Par contre, concrètement, l'outil d'analyse que nous proposons ne se révèle pas approprié pour la prévention : la notion de dégradation fait seulement référence à un état potentiel maximum.

7 Il n'y a pas véritablement de statut « naturel », indépendant du contexte. Selon les législations ou les niveaux technologiques, une même ressource peut être privée, commune, ou publique. En outre, la notion de patrimoine commun est présente dans le code de l'environnement français pour le sol et sa biodiversité mais les valeurs patrimoniales peinent à être reconnues dans les interprétations (Desrousseaux, 2014). Le caractère opérationnel de notre approche nous amène à négliger les valeurs patrimoniales.

#### (iv) Dégradation des sols ou des fonctions des sols ?

Dans le même ordre d'idée, la littérature économique distingue usuellement la valeur d'usage d'une ressource de sa valeur d'existence (ou, similairement, de sa valeur de non-usage). La valeur d'usage renvoie typiquement aux services rendus par la ressource qu'elle soit utilisée directement (production de biomasse, de matériaux bruts pour le cas des sols) ou indirectement (stockage de carbone, habitats pour la biodiversité<sup>8</sup>). La valeur d'existence est la valeur que les individus ou la société attribuent aux sols indépendamment des services qu'ils rendent. C'est cette valeur d'existence qui semble également justifier la différence entre une dégradation des fonctions d'un sol et des services qu'il remplit, certaines fonctions remplies par les sols ne constituant pas des services de manière constante dans le temps.<sup>9</sup> Nous ne retenons pas dans notre approche les fonctions qui ne produisent pas de services actuellement valorisés. Notons également que cette distinction implique des méthodes d'évaluation économique différentes, évaluer la valeur d'existence est moins consensuel dans la littérature mais il existe certaines pistes que nous mentionnerons dans la conclusion.

#### (v) Quelle réversibilité pour les dégradations des sols ?

Les caractéristiques des sols, en tant que ressource naturelle, qui sont mises en avant dans la littérature économique sont l'immobilité et la non-reproductibilité (Duke et Wu, 2014). Le sol est ainsi généralement considéré comme une ressource renouvelable, ce qui n'est pas la même chose que reproductible.<sup>10</sup> Il existe de nombreux usages renouvelables de la ressource, au sens où son usage d'aujourd'hui ne remet pas en cause son usage demain, bien que certaines dégradations soient très peu réversibles (comme la construction d'un bâtiment ou l'érosion).<sup>11</sup> Il apparaît généralement des niveaux différents de réversibilité associés aux différents usages des sols (avec des coûts plus ou moins élevés). La problématique même de la dégradation et de la réhabilitation d'une ressource ne se pose que si la ressource est partiellement renouvelable. On ne parle pas de dégradation ou de réhabilitation du charbon, gaz ou pétrole qui sont des ressources non-renouve-

lables emblématiques. Par contre, considérer le sol comme une ressource renouvelable ne doit pas occulter le temps long souvent nécessaire pour sa réhabilitation (lorsqu'elle est techniquement faisable), une dimension qui sera peu abordée dans notre travail mais dont nous présenterons certains éléments en conclusion (en particulier en lien avec la notion de capital-sol, Dominati et al., 2010).

## PROPOSITIONS POUR UN OUTIL D'ANALYSE

### La pertinence discutable d'une mesure agrégée du coût de la dégradation des sols

Un certain nombre d'ouvrages et de rapports récents proposent des quantifications économiques pour les coûts de la dégradation des sols à l'échelle globale ou pour différentes régions du monde (FAO : Rodríguez et al., 2018 ; IPBES, 2018 ; Banque mondiale : Lange et al., 2018). Même si les contextes locaux sont de mieux en mieux intégrés (Diaz et al., 2018), la pertinence de telles valeurs proposées à des échelles agrégées doit être questionnée. En effet, ce type d'évaluations n'explicite pas les états du monde auxquels elles font référence. En fait, ces mesures agrégées de la dégradation des sols font implicitement référence à un état du monde sans aucune dégradation des sols. Cette situation contre-factuelle n'est ni nécessairement un objectif atteignable, ni nécessairement un objectif souhaitable socialement (l'homme a toujours eu, et aura toujours un impact sur son environnement). À l'inverse, les choix de société quant à la gestion des sols s'effectuent sur des actions plus restreintes, mais plus concrètes, qu'il convient d'évaluer économiquement (par exemple, l'objectif zéro artificialisation nette, les contraintes sur le retournement des prairies permanentes, les mesures de réhabilitation). Face aux difficultés terminologiques et méthodologiques pour prendre en compte l'ensemble des services privés et sociaux rendus par les sols (Small et al., 2017), il est préférable de poser des questions plus concrètes en termes d'actions privées ou publiques en direction de la réhabilitation des sols.

### Vers une méthode globale d'évaluation locale de la dégradation des sols

Mesurer implique de définir une dimension et une échelle pour la quantifier. Chercher à définir « qu'est-ce qu'un bon sol ? » suscite immédiatement une question en guide de réponse « pour quoi faire ? ». Les géotechniciens savent bien quantifier les vertus des sols à accueillir des constructions, les agronomes mesurent la capacité des sols à produire de la biomasse pour l'énergie, l'alimentation, ou des matériaux, les écologues considèrent une zone humide comme porteuse d'une grande richesse floristique et

8 Une évaluation économique des services rendus par la biodiversité des sols, en termes de régulation et de support est disponible dans Pascual et al. (2015). Pour les services écosystémiques rendus par les invertébrés du sol (mais sans évaluation économique), un exemple est disponible dans Lavelle et al. (2006).

9 C'est le cas du service « régulation du climat » dans les sociétés pré-industrielles. Dans un monde sans réchauffement climatique, ce service peut être considéré comme ayant une valeur négligeable.

10 Même si de nombreux travaux attestent de la possibilité de « produire » des sols (Damas et Coulon, 2016 ; Vidal-Beaudet, 2018). Les évaluations économiques de telles pratiques ne sont pas encore disponibles.

11 Voir en particulier Pimentel (2006) sur l'érosion.

**Figure 1 :** Les fonctions et services rendus par les sols (Millenium Ecosystem Assessment 2005, FAO 2015).

**Figure 1:** Functions and services provided by soils (Millenium Ecosystem Assessment, 2005, FAO 2015).



faunistique. De nombreuses connaissances existent sur les fonctions remplies par les sols. Mais, avec des considérations aussi diverses, comment agréger ces dimensions dans une valeur? Comme détaillé plus haut, nous avons rapidement choisi de nous focaliser sur la valeur économique de ces services, sans chercher à la convertir en valeur comptable. Malgré cela, certaines qualités des sols semblent antinomiques: constructibilité et biodiversité par exemple. D'où notre choix de créer une mesure à plusieurs échelles et multidimensionnelle.

Parmi les inventaires de services rendus, nous avons choisi les 11 services écosystémiques détaillés par le MEA (2005), parce qu'ils couvrent les différents piliers du développement durable, économique, social et environnemental, et parce que leur détail fait autant consensus que l'émetteur autorité (figure 1). Cette catégorisation des services écosystémiques, reconnue au niveau international, nous paraît plus simple à utiliser comme base pour opérer une quantification dans la suite de cet exposé, que celles proposées, par exemple par la CICES et l'EFESE, tout en couvrant un champ plus exhaustif. Le classement CICES (*Common International Classification of Ecosystem Services*), avec ses 4

niveaux hiérarchiques, aboutit à un très grand nombre de catégories, qui complique les graphiques de comparaison. L'Évaluation Française des Écosystèmes et des Services Écosystémiques est, quant à elle, plutôt articulée autour de bouquets de services interdépendants au sein d'une typologie d'écosystèmes (EFESE, 2017),<sup>12</sup> que comme une catégorisation thématique des services rendus pas les sols. Nous combinons, pour chacun de ces 11 services, l'ensemble des fonctions correspondantes, comme cela apparaît dans le matériel additionnel.<sup>13</sup> Pour agréger ces approches différentes, nous avons choisi d'utiliser une méthode indiciaire, de 1 à 5, qui peut produire des valeurs décimales lorsqu'elles sont issues d'une moyenne (enquête, travaux

<sup>12</sup> La segmentation de l'analyse selon six écosystèmes représentatifs, chacun faisant l'objet d'une évaluation séparée fait apparaître la dégradation des sols comme un élément transversal présent dans chacune des évaluations (<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/evaluation-francaise-des-ecosystemes-et-des-services-ecosystemiques>).

<sup>13</sup> Comme indiqué dans la Notice d'utilisation située dans l'onglet Lisez-moi, les détails des impacts se font apparaître pour chaque service écosystémique, en cliquant sur le + correspondant dans la marge de gauche.

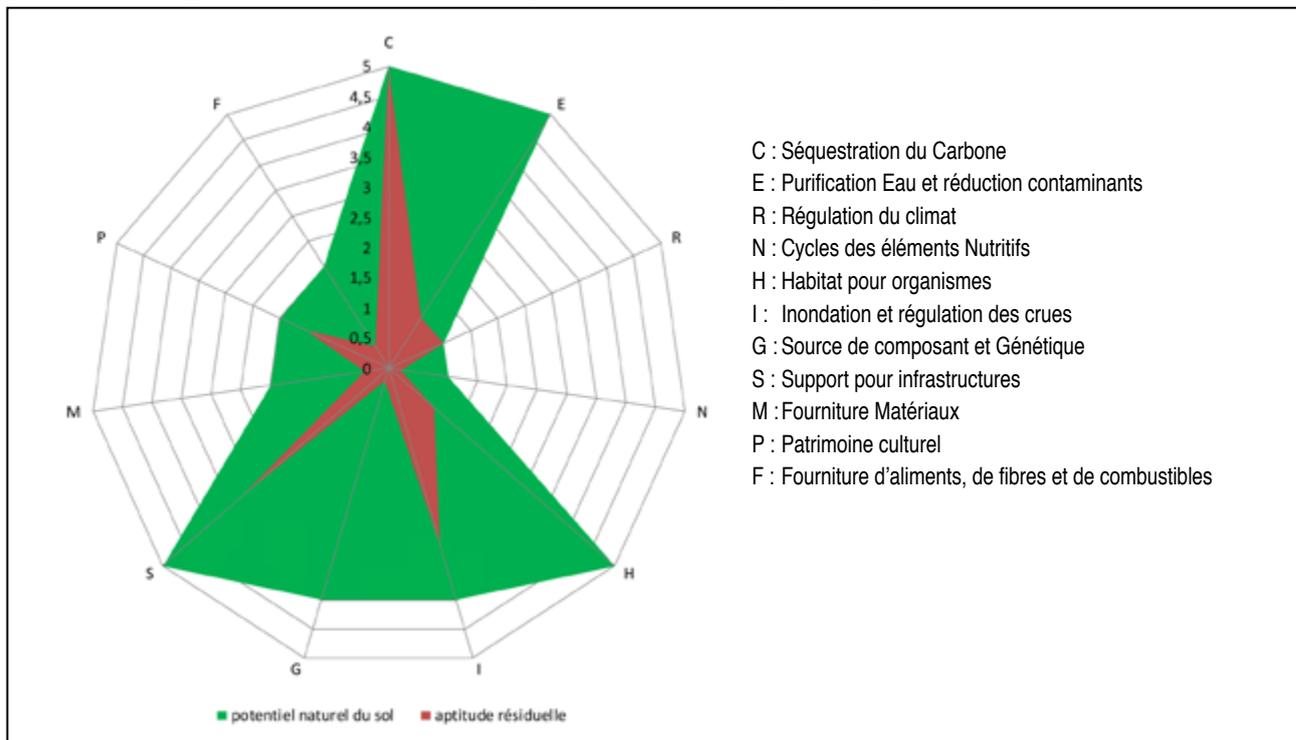
de groupes, par exemple). Les sources de dégradation identifiées sont l'érosion, la perte de matière organique, l'imperméabilisation, la pollution, la salinisation, la compaction, la baisse de la biodiversité, les inondations, les glissements de terrain et la perte ou accumulation d'éléments nutritifs. Dans une recherche d'exhaustivité, la matrice questionne systématiquement les impacts des dégradations des sols sur les fonctions remplies. Cette matrice représente par ailleurs un niveau de connaissance et de hiérarchie au moment de l'écriture de l'article, elle peut être amenée à évoluer à l'usage.

Dans son utilisation, la première étape consiste à définir la valeur potentielle du sol, sur chacun des 11 services. La dimension unitaire dépend de l'unité fonctionnelle de la surface considérée ; elle peut être une parcelle au sens agricole, cadastral, foncier, ou autre. Pour ce faire, il faut envisager la valeur du sol avant toute dégradation, notamment en s'appuyant sur des parcelles voisines et similaires, toutes grandeurs confondues. Ensuite, il convient d'estimer quelles sont les qualités de ce sol qui sont altérées par les dégradations dont on veut évaluer l'impact. Nous proposons d'analyser l'effet des altérations en détaillant les impacts fonctionnels par lesquels elles modifient les propriétés du sol ; pour exemple, un glissement de terrain provoque une perte de matière dans la parcelle de départ et une accumulation en aval.

Cet outil permet donc d'envisager 10 dégradations principales sous 11 angles différents. Il convenait de produire une représentation graphique synthétisant ces points de vue multiples. Un graphe en radar à 11 secteurs permet de visualiser d'un coup les 11 services rendus par un sol. Ce graphe est d'un usage commun dans les milieux scientifique et économique ; pour des communications grand public, nous proposons une version qui reprend la « roue » des 11 services écosystémiques, dans laquelle chaque secteur de couleur verte représente un niveau potentiel de service et la partie rouge représente le niveau résiduel suite à la dégradation (figure 2, où des valeurs arbitraires ont été données à titre d'illustration). L'avantage de cette approche globale et multifonctionnelle est qu'elle ne nécessite pas forcément de hiérarchiser entre les différentes fonctions : on peut à la fois regarder l'ensemble des paramètres et chacun d'entre eux individuellement (ou des combinaisons particulières de certains d'entre eux selon l'objectif et le point de vue adopté).

**Figure 2 :** Représentation graphique simulée de la dégradation des sols.

**Figure 2:** Simulated graphical representation of soil degradation [C: carbon sequestration ; E: water purification and contaminants reduction ; R: climate regulation ; N: nutrient cycle ; H: habitat for organisms; I: flooding and flood control ; G: genetic material ; S: infrastructure support ; M: materials ; P: cultural heritage ; F: food, fiber, and fuel production].



## ÉTUDES DE CAS

### Cas n° 1 : Mesures de la dégradation des sols forestiers liée à la compaction

Nous présentons ici une première étude de cas sur l'utilisation de l'outil pour deux sites expérimentaux de suivi à long terme des effets du tassement en forêt mis en place par l'INRAE et l'ONF, qui ont fait l'objet d'un suivi intensif et multicritère depuis 2007 (Goutal *et al.*, 2012, 2013a, 2013b ; Bottinelli *et al.*, 2014a ; 2014b ; Epron *et al.*, 2016 ; Goutal-Pousse *et al.*, 2016 ; Bonnaud *et al.*, 2019). Ils permettent de tester la quantification, par fonction et service, des pourcentages de dégradation causée par l'aller-retour du même porteur forestier de 25 t en charge. Les deux sites sont établis sur des sols similaires : une texture à dominance limoneuse de 0 à 50 cm de profondeur et présence d'un engorgement temporaire limité à la base de la couche limoneuse dû à la présence d'un substrat beaucoup plus argileux et imperméable à partir de 50 cm de profondeur.

Le pourcentage de dégradation établi pour une fonction et un service donnés varie en fonction du site et de l'indicateur choisi pour le quantifier. Par exemple, si on regarde le taux de survie des chênes sessiles plantés après tassement par rapport au témoin (zone non tassée), l'impact est très variable en fonction des sites (2 à 4 fois plus de mortalité dans le traitement tassé que dans le traitement témoin) et est différent de l'impact sur la croissance en hauteur (-10 % dans le tassé par rapport au témoin). Il est ainsi très difficile de quantifier les pourcentages de dégradation pour chaque fonction et service, même dans le cadre d'une dégradation de même nature sur des sols similaires. Il est également difficile de noter le potentiel intrinsèque des sols avant compaction. Par exemple, les deux sites sont situés sur des sols pauvres avec toutefois de fortes productivités liées à un intense recyclage des éléments nutritifs d'origine biologique (Bedel *et al.*, 2016). On peut donc les noter comme ayant un bon potentiel en termes de cycles des éléments nutritifs alors qu'il faudrait les amender lourdement si on voulait produire d'autres matières végétales que du bois.

Cependant, l'ensemble des données collectées sur les sites expérimentaux peut aider à noter qualitativement le potentiel et le pourcentage de dégradation par fonction afin de visualiser les impacts environnementaux et socio-économiques de la compaction de sols forestiers (*tableau 1* et *figure 3*). Nous aborderons les perspectives en termes de quantification économique dans la conclusion.

Cette étude permet de synthétiser des données pluri-disciplinaires de manière certes imparfaite car l'expertise des données est toujours nécessaire pour agréger, par fonction, les impacts mesurés par différents indicateurs : il reste ainsi une part de subjectivité. Cependant, l'outil permet une prise de conscience globale de l'impact d'une pratique sur les fonctions des sols. Cette étude montre qu'il est essentiel de développer un cadre métho-

dologique commun à tout type de sol et d'usage concernant l'agrégation des impacts mesurés par différents indicateurs pour chacune des fonctions. L'exhaustivité des impacts envisagés à travers de la matrice est pertinente pour orienter les recherches futures en identifiant les lacunes dans les connaissances. Visuellement, la *figure 3* permet de faire apparaître d'un coup d'œil l'état global de dégradation des sols étudiés.

### Cas n° 2 : Perceptions de la dégradation des sols agricoles au sein de territoires ruraux

En complément de l'utilisation scientifique basée sur des indicateurs, nous avons confronté notre outil d'analyse de la dégradation des sols à trois reprises à l'occasion d'enquêtes et d'ateliers destinés à produire des diagnostics agricoles sur des territoires très divers. Dans un premier cas, il s'agissait d'un territoire de 29 communes aveyronnaises où l'agriculture est principalement de type polyculture-élevage, avec des enjeux forts de pérennisation de l'activité dans un contexte d'urbanisation des terres. Le deuxième cas se focalisait sur la question de l'amélioration de la qualité de l'eau brute, dans un contexte de maïsiculture irriguée sur une aire d'alimentation de captage dans la plaine de l'Adour. Le troisième cas concernait une problématique de diversification et de mutation agricole dans des communes du carmausin. Ces études ont permis de mobiliser des agriculteurs, tous volontaires pour venir débattre de multiples questions liées au fonctionnement de leur activité (par exemple environ 300 exploitants dans le cas de l'étude aveyronnaise, de statuts, expériences et aux productions très variées, mais représentatifs du contexte local agricole) en tant qu'experts de leurs territoires et de confronter leurs perceptions à celles d'élus, de techniciens de syndicats, de personnels de l'état, de scientifiques. Il s'agit de territoires situés hors des sphères urbaines des métropoles, que l'on pourrait donc qualifier de « ruraux » au sens de l'interface étroite entre paysage agricole et habitat.

Ces diverses expériences montrent qu'il n'est pas possible d'aborder frontalement la question des sols et, en corollaire, celle de la dégradation des sols, pour plusieurs raisons : (i) le vocabulaire n'est pas partagé par tous, (ii) l'échelle d'appréhension des phénomènes diffère selon les préoccupations des uns et des autres, (iii), les représentations scientifiques du sol sont complexes pour les non-pédologues, (iv) les sols sont perçus avant tout au travers d'un type de fonctionnement agricole et non pas pour leurs caractéristiques fonctionnelles propres.

Il nous semble plus efficace d'aborder ces questions en adoptant une méthode « prudente » qui conduit les intervenants à s'approprier très progressivement les différentes notions liées aux sols : un premier temps est destiné à élaborer le champ lexical qui sera adopté par tous autour des sols ; un deuxième temps permet de formaliser une ou plusieurs répartitions des sols préalablement définis sur le territoire en abordant les notions d'échelle ; un troisième temps est destiné à expliciter la notion de services écosys-

**Tableau 1** : Évaluation du potentiel intrinsèque et de l'aptitude résiduelle après dégradation sur deux sites expérimentaux de suivi à long terme des effets du tassement en forêt.

**Table 1:** Assessment of intrinsic potential and residual suitability after degradation at two experimental sites for long-term monitoring of the effects of settlement in the forest.

Service écosystémique impacté		Potentiel naturel du sol	Aptitude résiduelle	Source de données
C	Séquestration du carbone	5	4,8	Pas de différences significatives de teneur en carbone organique 3 ans après tassement (baisse des flux de CO <sub>2</sub> mais productivité végétale moindre => compensation?, effets à plus long terme?), modifications de la teneur en carbone dissous dans l'eau du sol
E	Purification de l'eau et réduction des contaminants du sol	5	2,5	Goutal <i>et al.</i> , 2013 et Bonnaud <i>et al.</i> , 2019 : conditions anaérobiques => mobilité Fe, Zn et Mn, changement composition de l'eau du sol
R	Régulation du climat	5	4,0	Epron <i>et al.</i> , 2016 : diminution de la capacité du sol forestier à absorber le méthane. Goutal <i>et al.</i> , 2013: taux de survie et productivité moindre du peuplement forestier (stockage moindre de carbone, évapotranspiration réduite, modification de l'albédo)
N	Cycles des éléments nutritifs	4	0,8	Bottinelli <i>et al.</i> , 2014b : modification de la structure du sol => modification de la dynamique et de la composition chimique de l'eau du sol (Bonnaud <i>et al.</i> , 2019) + modification de l'aération du sol ( Goutal <i>et al.</i> , 2013) => modification de l'enracinement et la circulation des éléments nutritifs dans l'écosystème
H	Habitats pour une multitude d'organismes	4	0,8	Bottinelli <i>et al.</i> , 2014a et b, Goutal <i>et al.</i> , 2012 : perte de 90% des vers de terre et diminution de la respiration du sol
I	Régulation des crues	4	2,0	Bonnaud <i>et al.</i> , 2019 : dans le témoin, la nappe temporaire est entre 40 et 50cm de profondeur, dans le tassé la nappe perchée temporaire est en surface, plus fréquente et dure plus longtemps (imperméabilisation du sol via la compaction et l'ornièrage)
G	source de composants pharmaceutiques et de matériel génétique	non déterminé	0	Pas de données
S	Fondement pour les infrastructures humaines	3	1,2	Goutal-Pousse <i>et al.</i> , 2016 : effet de la compaction sur le gonflement-retrait, prise en masse de sol limoneux après tassement (site de Clermont-en-Argonne)
M	Fourniture de matériaux de construction	5	2,5	Diminution du taux de survie après plantation et diminution de la croissance en hauteur (Goutal <i>et al.</i> , 2013)
P	Patrimoine culturel	non déterminé	0	Pas de données
F	Fourniture d'aliments, de fibre et de combustibles	5	2,5	Diminution du taux de survie après plantation et diminution de la croissance en hauteur (Goutal <i>et al.</i> , 2013)

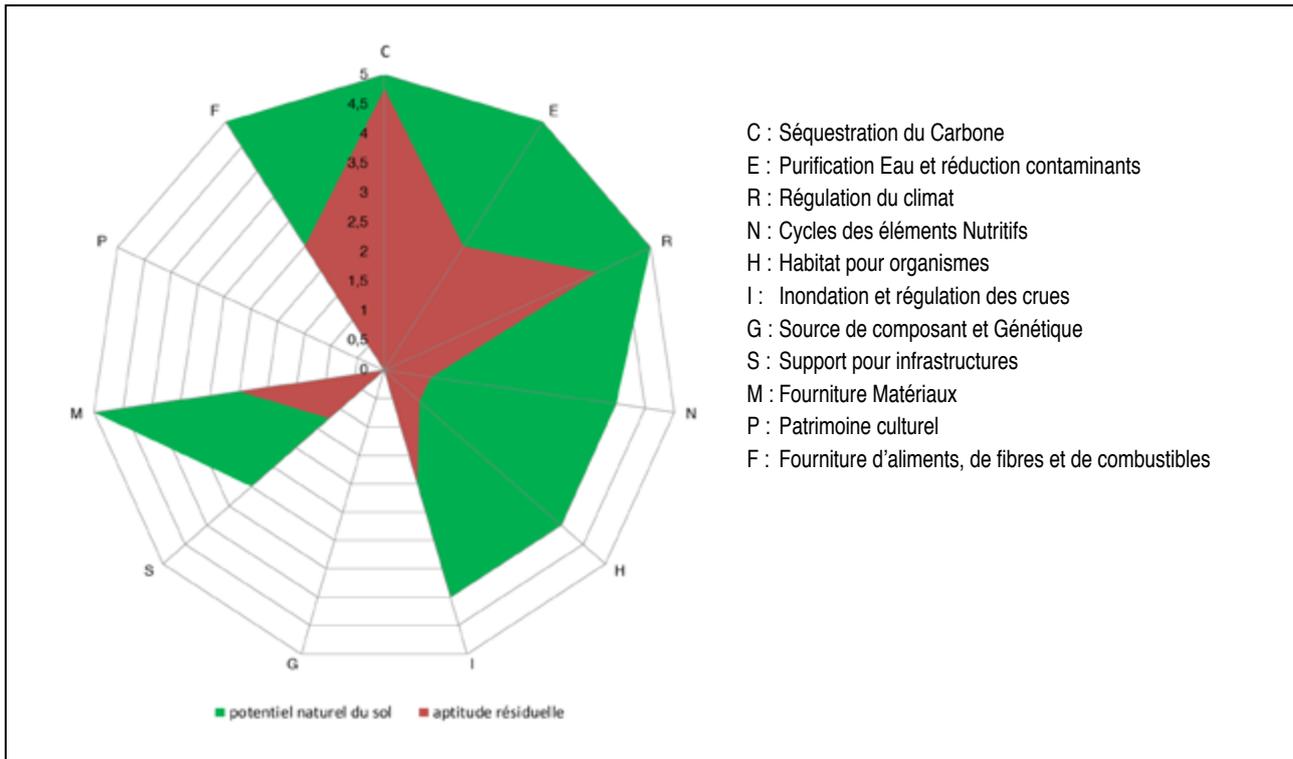
témiques grâce à la représentation du MEA ; un quatrième temps positionne enfin ces services sur le territoire en faisant la liaison entre sols identifiés et services. C'est seulement alors que la notion de dégradation peut être abordée, d'abord par les aspects typologiques puis comme une des conséquences de processus naturels ou liés à l'activité humaine, donc par l'aspect des facteurs.

Le *tableau 2* et la *figure 4* donnent un exemple de travail en atelier sur la notation spontanée des fonctions impactées d'un même type de sol de la plaine de l'Adour, par des inondations, sous deux occupations différentes (prairie naturelle et culture annuelle).

Le processus de dégradation des sols identifié spontanément par tous les acteurs de ces ateliers est celui de l'érosion. Les exploi-

**Figure 3 :** Représentation graphique de la dégradation des sols forestiers par tassement.

**Figure 3:** Graphical representation of degradation of forest soils by settlement [C: carbon sequestration; E: water purification and contaminants reduction; R: climate regulation; N: nutrient cycle; H: habitat for organisms; I: flooding and flood control; G: genetic material; S: infrastructure support; M: materials; P: cultural heritage; F: food, fiber, and fuel production].



tants y assignent une valeur économique liée à la perte de terre et de travail accompli, les élus émettent des coûts de travaux et de réhabilitation, les techniciens de rivière identifient les coûts liés à l'entretien de la qualité piscicole des rivières. C'est en outre un processus que les agriculteurs spatialisent très bien ; les cartes des sols qui résultent des travaux en atelier mentionnent souvent les secteurs sensibles vis-à-vis de l'érosion. Les facteurs de dégradation sont abordés également assez spontanément, mais plutôt sous l'angle positif de la remédiation : on voit bien ici l'ancrage récent dans les mentalités des programmes de réhabilitation des haies comme facteur de remédiation aux processus d'érosion, notamment.

L'autre processus qui apparaît assez nettement au cours des discussions est lié à la dégradation des teneurs en matières organiques dans les sols. Les agriculteurs sont les seuls intervenants à mentionner ce processus, car on sait désormais mieux quantifier son impact sur les coûts de production. Il est également très bien situé dans un discours ambiant lié aux changements de pratiques et à une transition agro-écologique, ce qui signifie que les relations entre dégradations et facteurs sont de mieux en mieux maîtrisées, quels que soient les types de production agricole. Là

encore, l'aspect positif de la remédiation permet de discuter sereinement des processus de dégradation.

Dans les deux processus évoqués, c'est donc le service de production alimentaire du sol qui est touché. Mais c'est aussi le service que les intervenants agricoles assignent en priorité aux sols. Cette portion de la représentation du MAE semble en effet la mieux comprise et interprétée. En revanche, les autres processus de dégradation ne sont quasiment jamais mentionnés spontanément. En particulier, personne ne perçoit réellement les processus d'imperméabilisation ou d'artificialisation des sols, que ce soit les élus ou les agriculteurs. Le sol est en effet considéré « par défaut » comme un potentiel support de construction, y compris s'il est agricole. Par conséquent, les impacts de la construction sur les sols sont niés, de même que les facteurs. D'autres processus de dégradation tels que la baisse de la biodiversité, l'acidification, la pollution ou le tassement ne sont pas évoqués, sauf par certaines catégories d'agriculteurs, déjà engagés dans des changements radicaux de pratiques ; dès lors, ces processus peuvent devenir une préoccupation majeure qui rentre même dans un processus décisionnel économique (notamment sur les aspects de tassement des sols). Ainsi, les notions de dégradation des sols

**Tableau 2** : Évaluation des perceptions de dégradation de sols pour deux usages agricoles.**Table 2:** Assessment of perceptions of soil degradation for two agricultural uses.

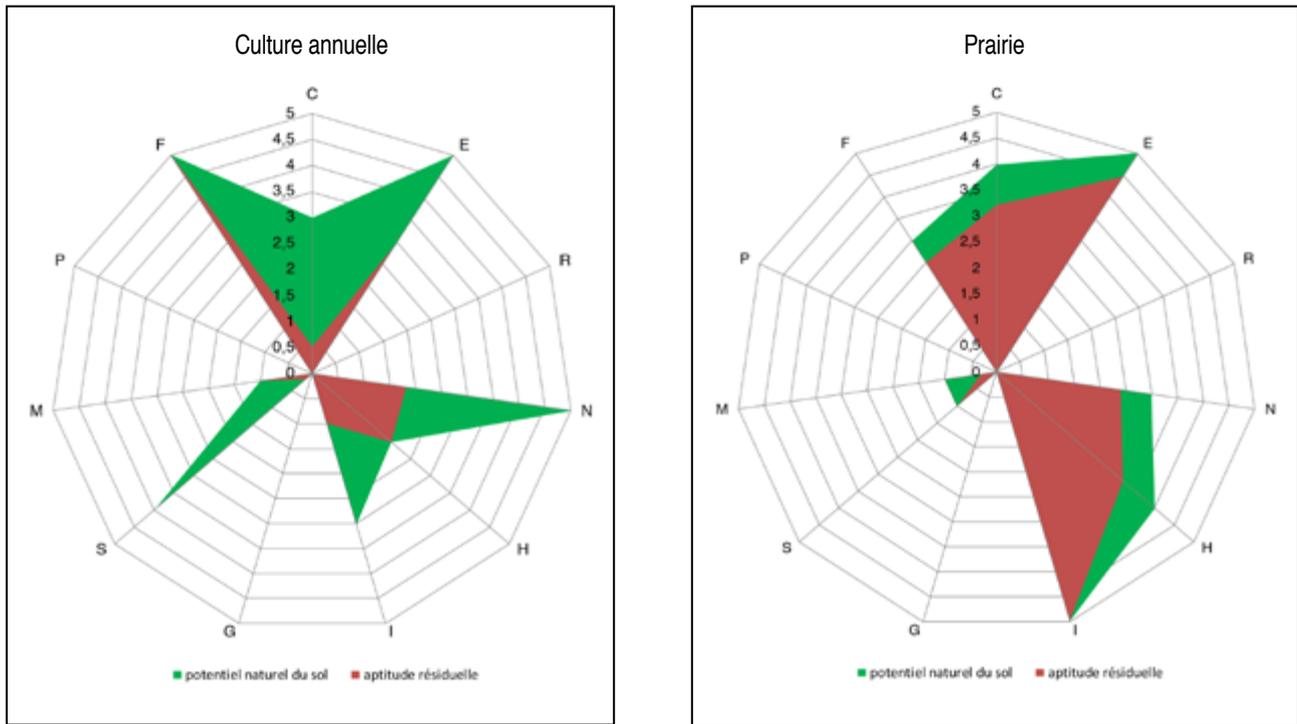
Service écosystémique impacté		Culture annuelle (maïs)		Prairie		Explications données par les agriculteurs en atelier de travail
		potentiel naturel du sol	dégradation	potentiel naturel du sol	dégradation	
C	Séquestration du carbone	3	70%	4	10%	L'inondation provoque une érosion importante de l'horizon de surface dans les parcelles sans couverture permanente : il y a une perte de matière organique
E	Purification de l'eau et réduction des contaminants du sol	5	50%	5	10%	La dégradation des propriétés filtrantes des parcelles cultivées annuellement est plus durable après une inondation. Les prairies résistent mieux.
R	Régulation du climat	non déterminé				
N	Cycles des éléments nutritifs	5	40%	3	10%	Les sols sous prairie sont moins sensibles au lessivage lié à l'inondation, mais ils sont aussi moins fournisseurs d'éléments fertilisants
H	Habitats pour une multitude d'organismes	2	0%	4	20%	Pas à peu de diminution des populations de vers de terre après passage d'une lame d'eau ; mais ces populations sont initialement moins importantes sous cultures annuelles
I	Régulation des crues	3	60%	5	0%	Après une inondation, le flacage résiduel est plus important et la saturation des sols est plus longue en parcelle de cultures annuelles
G	source de composants pharmaceutiques et de matériel génétique	non déterminé				
S	Fondement pour les infrastructures humaines	4	90%	1		Les parcelles en cultures annuelles sont plus impactées après des inondations, car elles sont moins stables, mais ce sont néanmoins les plus aptes à la construction (position dans le paysage, topographie...)
M	Fourniture de matériaux de construction	1	0%	1	0%	Ces parcelles ont globalement peu de potentiel pour la fourniture en matériaux de construction
P	Patrimoine culturel	non déterminé				
F	Fourniture d'aliments, de fibre et de combustibles	5	0%	3	10%	Dans le cas des productions annuelles, les pratiques culturales utilisées permettent de revenir rapidement à un bon niveau de rendement après une phase d'inondation

deviennent des moteurs d'innovation en matière de remédiation. Les représentations en radar, avec des systèmes de notation relative, ont été testées une seule fois dans le contexte de la plaine de l'Adour. Ce système est très bien perçu dès lors qu'il permet de comparer deux parcelles, des consensus se font même assez

facilement autour de l'attribution de notes, qui sont pourtant très subjectives. Même en présence de certaines « données manquantes » ou imprécises, l'outil permet d'illustrer les points sur lesquels il y a encore du travail à faire. Cette facilité d'appropriation est sans doute due au fait que le procédé est déjà largement

**Figure 4 :** Représentation graphique de la dégradation perçue des sols agricoles (à gauche pour une culture annuelle ; à droite pour une prairie) [C : Séquestration du Carbone ; E : purification Eau et réduction contaminants ; R : Régulation du climat ; N: cycle pour les éléments Nutritifs ; H : Habitat pour organismes ; I : Inondation et régulation des crues ; G : source de composant Génétique ; S : Support pour infrastructures ; M : fourniture Matériaux ; P : Patrimoine culturel ; F : Fourniture d'aliments, de fibres et de combustibles".]

**Figure 4:** Graphical representation of the perception of agricultural soil degradation (left panel for annual crops; right panel for pastures) [C: carbon sequestration; E: water purification and contaminants reduction; R: climate regulation; N: nutrient cycle; H: habitat for organisms; I: flooding and flood control; G: genetic material; S: infrastructure support; M: materials; P: cultural heritage; F: food, fiber, and fuel production].



utilisé pour la prise de décisions foncières (échanges, remembrements, restructurations). Il faut aussi voir dans ces exemples de perception des dégradations des sols une hiérarchisation des représentations du sol et de ses services qui est sans doute fonction du type de territoire. Il serait ainsi intéressant de tester les méthodes évoquées dans d'autres types de territoires, plus urbains par exemple.

## CONCLUSION

Nous avons présenté des éléments théoriques, techniques et pratiques pour avancer sur une évaluation économique des coûts de la dégradation des sols. Nous avons en particulier proposé un outil d'analyse exhaustif, en l'état actuel des connaissances, des effets de la dégradation des sols sur les fonctions et services qu'ils remplissent, que nous avons ensuite confronté à des indicateurs scientifiques et des perceptions d'acteurs. Ce travail

constitue une étape en vue d'une évaluation économique de la dégradation pour de meilleures décisions sur l'usage des sols et une meilleure prise en compte dans les politiques publiques.

Plutôt qu'une valeur agrégée des coûts de la dégradation, nous avons présenté une approche multi-dimensionnelle qui permet d'analyser conjointement les différents impacts des dégradations sur les fonctions et services rendus par les sols. Cette synthèse est un préalable nécessaire à toute analyse économique plus extensive, il nous semble en effet important de pouvoir disposer d'un état du système afin de circonscrire et d'évaluer la complexité des processus. Ce préalable doit désormais être pratiqué et enrichi d'informations locales sur la distribution des coûts, leurs variances et corrélations dans l'espace en particulier. Les cas d'étude que nous avons proposés s'intéressent à différentes échelles géographiques qu'il conviendrait d'articuler dans des travaux futurs, en lien avec l'information disponible aux décideurs

et la manière de prioriser localement l'action (Ay, 2015).<sup>14</sup> Les valeurs de non-usage n'ont pas été abordées car elles entrent en contradiction avec la notion de services rendus par les sols, des méthodes quantitatives (par des expériences de choix ou des enquêtes auprès de la population) existent pour évaluer ces valeurs. Par contre, l'horizon temporel de la dégradation et de la restauration est un élément de première importance que nous avons négligé ici. Pour une dégradation donnée, il convient d'évaluer sa persistance temporelle, qui peut être abordée sous l'angle de la résilience des sols à partir des dynamiques naturelles. La traduction en coûts économiques (d'opportunité) doit prendre en compte cette dimension temporelle de la dégradation. De nombreuses connaissances sur les dynamiques internes aux sols pourraient être incorporées à l'analyse afin de faire apparaître la réhabilitation des sols comme un investissement (voir Issanchou *et al.*, 2019, pour le cas des sols agricoles). Les dynamiques associées à la dégradation des sols pourraient également être étudiées par le prisme de la notion de capital naturel (Palm *et al.*, 2017, Lange *et al.*, 2018).

Dans le cadre de notre approche pluripartite, les concepts économiques ont été confrontés à des questions techniques et des études de cas. Nous avons présenté la méthode, deux cas d'étude, ce qui nous amène à un outil avec pour avantages d'avoir une vision globale et partagée entre acteurs avec encore des inconvénients associés à la part d'expertise et donc de subjectivité. Nous pensons néanmoins que renseigner la matrice des impacts requiert de mettre autour de la table différents spécialistes et acteurs pour qualifier les impacts pour toutes les fonctions et dégradations sur tous les territoires, et éventuellement d'étudier avec différentes méthodes d'évaluation les dégradations et les fonctions qui se révéleraient moins documentées. Se posera alors la question de la capitalisation et de la mise à disposition de bases de données pour la notation des potentiels intrinsèques, afin de limiter le côté subjectif de la notation.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions les participants au groupe de travail « coût de la dégradation des sols » dans le conseil scientifique et technique du réseau RNEST. Nous remercions plus particulièrement Patrick Charbonnier et Yves Le Bissonnais pour la relecture d'une version précédente de notre article, ainsi que Claire Chenu, Thomas Eglin, Isabelle Feix, Vincent Martinet et Flavien Poinçot pour leur aide et leurs encouragements.

<sup>14</sup> Notre premier cas d'étude est à l'échelle de la parcelle forestière, surtout utile aux gestionnaires (ici gestionnaire forestier, mais cela aurait pu être un aménageur, un agriculteur, ou autre). Le cas 2 est à une échelle plus large, plus pertinente quand il s'agit de questions touchant l'eau (qualité des ressources en eau, inondations) et qui intéresse plusieurs groupes d'acteurs (les gestionnaires de chaque parcelle, plus les bénéficiaires des services ou les « victimes » des dits-services).

## BIBLIOGRAPHIE

- ADEME, 2018 - La reconversion des friches polluées au service du renouvellement urbain : Enseignements technico-économiques. Rapport d'analyse, 125 p.
- Ay J.-S., 2015 - Information sur l'hétérogénéité de la terre et délégation de la régulation foncière. *Revue d'Économie Politique*, 125(3) : 453-474.
- Baveye P. C., Baveye J., Gowdy J., 2016 - Soil "Ecosystem" Services and Natural Capital: Critical Appraisal of Research on Uncertain Ground. *Frontiers in Environmental Science*, 4(41) : 49 p.
- Bedel L., Poszwa A., van der Heijden G., Legout A., Aquilina L., Ranger J., 2016 - Unexpected calcium sources in deep soil layers in low-fertility forest soils identified by strontium isotopes (Lorraine plateau, eastern France). *Geoderma*, 264 : 103-116.
- Blanchart A., Calvaruso C., Eglin T., Pierart A., Grand C., 2019 - Méthodologies d'évaluation des fonctions et des services écosystémiques rendus par les sols, Synthèse séminaire du 12 juin 2019, INRA Orléans. 31 p.
- Bonnaud P., Santenoise P., Tisserant D., Nourrisson G., Ranger J., 2019 - Impact of compaction on two sensitive forest soils in Lorraine (France) assessed by the changes occurring in the perched water table. *Forest Ecology and Management*, 437, 380-395.
- Bottinelli N., Capowiez Y., Ranger J., 2014a - Slow recovery of earthworm populations after heavy traffic in two forest soils in northern France. *Applied Soil Ecology*, 73, 130-133.
- Bottinelli N., Hallaire V., Goutal N., Bonnaud P., Ranger J., 2014b - Impact of heavy traffic on soil macroporosity of two silty forest soils: Initial effect and short-term recovery. *Geoderma*, 217-218, 10-17.
- Calvaruso C., Blanchart A., Bertin S., Grand C., Pierart A., Eglin T., Soumis - Quels paramètres pour l'évaluation des fonctions et des services rendus par les sols ? *Revue de la littérature et ateliers de co-construction. Etude et Gestion des Sols*.
- Creutzig F., 2017 - Govern land as a global commons. *Nature*. p. 28- 29, v. 546, i. 7656.
- Damas O., Coulon A., 2016 - Créer des sols fertiles : du déchet à la végétalisation urbaine. Paris, Editions Le Moniteur, 335 p.
- Desrousseaux M., 2014 - La patrimonialisation des sols affectés à la production de denrées alimentaires. INIDA. *Penser une démocratie alimentaire volume II*, pp.169-175.
- Dominati E., Patterson M., Mackay A., 2010 - A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological economics*, 69(9), 1858-1868.
- Donadieu P., Rémy É., Girard M.-C., 2016 - Les sols peuvent-ils devenir des biens communs ? *Natures Sciences Sociétés*, 24, 261-269.
- Duke J. M., Wu J. (Eds.), 2014 - *The Oxford Handbook of Land Economics*. Oxford University Press.
- EFSE, 2017 - Le cadre conceptuel. Rapport d'analyse THEMA du service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable, 88 p.
- EPA, 2011 - Environmental Protection Agency : Handbook on the Benefits, Costs and Impacts of Land Cleanup and Reuse. Office of Policy and Office of Solid Waste and Emergency Response. 127 p.
- Epron D., Plain C., Lerch T., Ranger J., 2016 - Les sols forestiers, puits de méthane : un service écosystémique méconnu. *Revue Forestière Française*, LXVIII, 313-322.
- FAO et ITPS, 2015 - Status of the World's Soil Resources (SWSR)-Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy.
- Goutal N., Bottinelli N., Gelhaye D., Bonnaud P., Nourrisson G., Demaison J., Bréthes A., Capowiez Y., Lamy F., Johannes A., Boivin P., Ranger J., 2013a - Le suivi de la restauration du fonctionnement de deux sols fores-

- tiers après tassement dans le Nord Est de la France. *Étude et Gestion des Sols*, 20, 163-177.
- Goutal N., Parent F., Bonnaud P., Demaison J., Nourrisson G., Epron D., Ranger J., 2012 - Soil CO<sub>2</sub> concentration and efflux as affected by heavy traffic in forest in northeast France. *European Journal of Soil Science*, 63, 261-271.
- Goutal N., Renault P., Ranger J., 2013b - Forwarder traffic impacted over at least four years soil air composition of two forest soils in northeast France. *Geoderma*, 193-194, 29-40.
- Goutal-Pousse N., Lamy F., Ranger J., Boivin P., 2016 - Structural damage and recovery determined by the colloidal constituents in two forest soils compacted by heavy traffic. *European Journal of Soil Science*, 67, 160-172.
- Graves A.R., Morris J., Deeks L.K., Rickson R.J., Kibblewhite M.G., Harris J.A., Farewell T.A., Truckle I., 2015 - The total costs of soil degradation in England and Wales. *Ecological Economics*, 119, 399-413.
- Greenstone M., Gallagher J., 2008 - Does hazardous waste matter? Evidence from the housing market and the superfund program. *The Quarterly Journal of Economics*, 123(3), 951-1003.
- Haines-Young R., Potschin M.B., 2018 - Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure.
- IPBES, 2018 - The IPBES assessment report on land degradation and restoration. Montanarella, L., Scholes, R., and Brainich, A. (eds.). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany. 744 p.
- IPCC, 2019 - Climate Change and Land. An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. 1542 p.
- Issanchou A., Daniel K., Dupraz P., Ropars-Collet C., 2019 - Intertemporal soil management: revisiting the shape of the crop production function, *Journal of Environmental Planning and Management*, 62:11, 1845-1863.
- Jones A., Panagos P., Barcelo S., Bouraoui F., Bosco C., Dewitte O., Gardi C., Erhard M., Hervás J., Hiederer R., Jeffery S., Lükewille A., Marmo L., Montanarella L., Olazábal C., Petersen J.-E., Penizek V., Strassburger T., Tóth G., Van Den Eeckhaut M., Van Liedekerke M., Verheijen F., Viestova E., Yigini Y., 2012 - The state of soil in Europe. A Contribution of the JRC to the European Environment Agency's Environment State and Outlook Report. (European Commission: Luxembourg).
- Lange G. M., Wodon Q., Carey K. (Eds.), 2018 - The changing wealth of nations 2018: Building a sustainable future. The World Bank.
- Lavelle P., Decaëns T., Aubert M., Barot S., Blouin M., Bureau F., Margerie P., Mora P., Rossi J.-P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, vol. 42, p. S3-S15.
- Linn J., 2013 - The effect of voluntary brownfields programs on nearby property values: Evidence from Illinois. *Journal of Urban Economics*, 78, 1-18.
- MEA (2005). Millenium Ecosystem Assessment: Ecosystems and human well-being. Island Press, Washington, DC, USA, 164 p.
- MTEs, 2019 - L'environnement en France. Rapport de Synthèse. La Documentation Française. 220 p.
- Nkonya E., Mirzabaev A., Von Braun J. (Eds.), 2016 - Economics of land degradation and improvement: a global assessment for sustainable development (p. 686). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- OECD, 2020 - Towards Sustainable Land Use: Aligning Biodiversity, Climate and Food Policies, OECD Publishing, Paris.
- Palm C., Sanchez P., Ahamed S., Awiti A., 2007 - Soils: A contemporary perspective. *Annual Review of Environmental Resources*, 32, 99-129.
- Pascual U., Termansen M., Hedlund K., Brussaard L., Faber J.H., Foudi S., Lemanceau P., Jorgensen S.L., 2015 - On the value of soil biodiversity and ecosystem services. *Ecosystem Services*, 15, 11-18.
- Pimentel D. (2006). Soil erosion: a food and environmental threat. *Environment, development and sustainability*, 8(1), 119-137.
- Robinson D. A., Lebron I., Vereecken H., 2009 - On the definition of the natural capital of soils: A framework for description, evaluation, and monitoring. *Soil Science Society of America Journal*, 73(6), 1904-1911.
- Robinson David A., Seaton F., Sharps K., Amy T., Parry R.F., van der Ploeg M., Jones L., Stolte J., de la Bellacasa M.P., Harrison P., 2017 - Soil resources, the delivery of ecosystem services and value. *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*.
- Small N., Munday M., Durance I., 2017 - The challenge of valuing ecosystem services that have no material benefits. *Global Environmental Change*, 44, 57-67.
- Taylor L. O., Phaneuf D. J., Liu X., 2016 - Disentangling property value impacts of environmental contamination from locally undesirable land uses: Implications for measuring post-cleanup stigma. *Journal of Urban Economics*, 93, 85-98.
- Timmins C., 2017 - Measuring the Value of Cleanup at Federal Facility National Priorities List Sites. Working paper, 72 p.
- Vidal-Beaudet L., 2018 - Du déchet au Technosol fertile: l'approche circulaire du programme français de recherche SITERRE. *Vertigo-la revue électronique en sciences de l'environnement*, (Hors-série 31).
- Xie H., Zhang Y., Wu Z., Lv T., 2020 - A Bibliometric Analysis on Land Degradation: Current Status, Development, and Future Directions. *Land*, 9(1), 28.

