



HAL
open science

Mieux intégrer les sols dans la séquence "Éviter–Réduire–Compenser"

Jérôme Cortet, Sarah Paquet, Philippe Billet, Nolwenn Bougon, Coralie Calvet, Jean-Francois Charmet, Claire Chenu, Chantal Gascuel-Odoux, Olivier Damas, Maylis Desrousseaux, et al.

► To cite this version:

Jérôme Cortet, Sarah Paquet, Philippe Billet, Nolwenn Bougon, Coralie Calvet, et al.. Mieux intégrer les sols dans la séquence "Éviter–Réduire–Compenser". *Étude et Gestion des Sols*, 2023, 30, pp.347-363. hal-04327803

HAL Id: hal-04327803

<https://hal.inrae.fr/hal-04327803>

Submitted on 3 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mieux intégrer les sols dans la séquence «Éviter – Réduire – Compenser»

J. Cortet^(1*), S. Paquet⁽²⁾, P. Billet⁽³⁾, N. Bougon⁽⁴⁾, C. Calvet⁽⁵⁾, F. Charnet⁽⁶⁾, C. Chenu⁽⁷⁾,
C. Gascuel-Odoux⁽⁸⁾, O. Damas⁽⁹⁾, M. Desrousseaux⁽¹⁰⁾, K. Monod⁽⁴⁾, F. Poinçot⁽¹¹⁾,
S. Raous⁽¹²⁾, L. Rigou⁽¹³⁾, F. Sarrazin⁽¹⁴⁾ et C. Schwartz⁽¹⁵⁾

- 1) CEFÉ, Univ. Paul Valéry Montpellier 3, Univ. Montpellier, EPHE, CNRS, IRD, F34000, Montpellier, France
- 2) IRD, UMR SENS, Université de Montpellier Paul-Valéry 3, 34000 Montpellier, France
- 3) Institut de droit de l'environnement - U. Lyon 3 (CNRS - UMR 5600 - EVS-IDE), 18 Rue Chevreul, 69007 Lyon, France
- 4) OFB/DRAS et DASB, 94300 Vincennes, France
- 5) AgroParisTech, 75005, Paris, France & Montpellier Research in Management (MRM), Univ Montpellier, Univ Paul Valéry Montpellier 3, Univ Perpignan Via Domitia, Montpellier, France
- 6) Institut pour le Développement Forestier, CNPF, 5 rue de la Bourie Rouge - CS 52349, 45023 Orléans Cedex 1
- 7) Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR ECOSYS, Thiverval-Grignon, France
- 8) INRAE, Institut Agro, UMR SAS, 35000 Rennes, France
- 9) Bureau d'études FLEUR DE SOL, 33130 Bègles, France
- 10) CNAM-ESGT, Laboratoire Géomatique et Foncier / Conservatoire National des Arts et Métiers, 1 boulevard Pythagore, 72000, Le Mans, France
- 11) ACTA, 149 rue de Bercy, 75595 Paris Cedex 12, France
- 12) Association Française pour l'Etude du Sol, AFES c/o Inrae, CS 40001 Ardon, F-45075 Orléans cedex 2, France
- 13) SARL Ateliers Sols, Urbanisme et Paysages (ASUP), 65690, Angos, France
- 14) OFB/DPPC, 94300 Vincennes, France
- 15) Université de Lorraine, INRAE, LSE, F-54000 Nancy, France

* Auteur correspondant : jerome.cortet@univ-montp3.fr

RÉSUMÉ

Alors que les enjeux de la préservation des sols gagnent en visibilité au sein de la société, la loi française du 22 août 2021, dite loi Climat et Résilience, inscrit dans la législation française un objectif de « zéro artificialisation nette » (ZAN) et introduit la notion de compensation de l'artificialisation des sols, établissant un lien logique avec la séquence « éviter, réduire, compenser » (dite séquence ERC).

Introduite en droit français par la loi sur la protection de la nature du 10 juillet 1976 et consolidée par la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages du 8 août 2016, la séquence ERC constitue un dispositif largement partagé à l'échelle internationale ayant pour but de limiter l'impact écologique des projets de travaux, ouvrages aménagements et des documents de planification (plans, schémas, programmes). Cette séquence est mise en œuvre au travers d'actions visant à éviter, réduire puis si nécessaire à compenser les pertes en apportant des gains écologiques équivalents aux pertes, voire à les surcompenser (additionnalité écologique).

Comment citer cet article :

Cortet J., Paquet S., Billet P., Bougon N., Calvet C., Charnet F., Chenu C., Gascuel-Odoux C., Damas O., Desrousseaux M., Monod K., Poinçot F., Raous S., Rigou L., Sarrazin F. et Schwartz C., 2023 - Mieux intégrer les sols dans la séquence «Éviter - Réduire - Compenser» *Étude et Gestion des Sols*, 30, 347-363

Comment télécharger cet article :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-30/>

Comment consulter/télécharger

tous les articles de la revue EGS :
<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/>

Dans ce contexte, nous nous sommes interrogés sur la façon dont, à l'heure actuelle, les sols et leur multifonctionnalité sont pris en compte dans l'application de la séquence ERC sur le territoire hexagonal français.

Pour cela, un travail d'enquête a été réalisé auprès de quatorze acteurs territoriaux, exerçant dans des services instructeurs ou participant à des missions régionales d'autorité environnementale, et de six experts de la compensation et de son dimensionnement. Les acteurs ont été interrogés sur leur vision de l'intégration des sols dans l'application de la séquence ERC, en particulier lors du diagnostic de l'état initial et pour le dimensionnement de la compensation, sur les connaissances et ressources disponibles pour prendre en compte les sols lors de l'application de cette séquence et sur les leviers d'actions envisageables.

Ce travail d'enquête a été complété par une analyse des documents issus d'études d'impact de projets d'aménagements, à partir d'une lecture des dossiers par mots-clés définis selon une approche fonctionnelle des sols. Sept dossiers ont été sélectionnés (postérieurs à 2016, date à laquelle la réglementation ERC s'est vue renforcée), permettant d'étudier un panel de projets de différentes natures, dans différentes régions et relevant de diverses procédures réglementaires. À ces dossiers étudiés s'ajoutent quatre avis de l'autorité environnementale portant sur des projets d'aménagement et trois guides relatifs aux méthodes de dimensionnement de la compensation, et l'évaluation des fonctions des zones humides.

Les experts interrogés font le constat unanime que les sols sont très peu pris en compte actuellement dans l'application de la séquence ERC, estimant que la réglementation actuelle sur les sols n'est pas suffisamment contraignante pour que les sols soient intégrés systématiquement dans les études d'impact. De fait, l'analyse des documents indique que les sols sont très peu étudiés dans les études d'impacts, avec une absence de prise en compte de leur multifonctionnalité dès le diagnostic de l'état initial de la zone à aménager.

Ce travail a permis d'identifier 4 axes sur lesquels agir pour améliorer la prise en compte effective des sols dans la séquence ERC : le cadre juridique, l'adéquation entre exigences réglementaires et capacités techniques de réponses, la formation et l'information des acteurs des territoires et, enfin, l'échelle spatiale à considérer dans la mise en œuvre de la séquence ERC.

Mots-clés

Artificialisation, séquence ERC, Zéro Artificialisation Nette, réglementation, multifonctionnalité, biodiversité, étude d'impact, planification territoriale.

SUMMARY

BETTER INTEGRATION OF SOILS IN THE AVOID - REDUCE - COMPENSATE SEQUENCE

As the challenges of soil preservation gain visibility within society, the French law of 22 August 2021, known as the Climate and Resilience Law, incorporates into in French legislation a goal of "zero net artificialization" (ZAN) and introduces the notion of compensation for soil artificialization, thus establishing a logical link with the "avoid, reduce, compensate" sequence (known as the ERC sequence).

Introduced into French law by the Nature Protection Act of 10 July 1976 and consolidated by the law for the reconquest of biodiversity, nature and landscapes of 8 August 2016, the ERC sequence is a mechanism widely used internationally to limit the ecological impact of works, projects, schemes, and planning documents (plans, schemes, programmes). This sequence is implemented through actions aimed at avoiding, reducing and then, if necessary, compensating for losses by providing ecological gains equivalent to, or even exceeding the losses (ecological additionality).

In this context, we examined the way in which soils and their multifunctionality are currently taken into account in the application of the ERC sequence in France.

To this end, a survey was carried out among fourteen regional players, working in the instruction departments or participating in regional environmental authority missions, and six experts in compensation and its dimensioning. The stakeholders were asked about their vision of the integration of soils in the application of the ERC sequence, in particular during the diagnosis of the initial state and for the dimensioning of compensation, about the knowledge and resources available to take soils into account during the application of this sequence and about the possible levers of action.

This survey work was complemented by an analysis of documents from impact studies of development projects, based on a reading of the files by keywords defined according to a functional approach to soil. Seven files were selected (after 2016, the date on which the mitigation hierarchy regulation was strengthened), which made it possible to study a range of projects of different types, in different regions and under different regulatory procedures. In addition to these files studied, four opinions issued by the environmental authority on development projects and three guidelines on methods for sizing compensation and assessing the functions of wetlands were also studied.

The experts interviewed were unanimous in stating that very little account is currently taken of soil in the application of the mitigation hierarchy, believing that current regulations on soil are not sufficiently restrictive to ensure that soil is systematically included in impact studies. In fact, an analysis of the documents shows that very little attention is paid to soil in impact assessments, and that the multifunctional nature of soil is not taken into account right from the initial diagnosis of the area to be developed.

This work has made it possible to identify four areas in which action can be taken to improve the effective consideration of soils in the mitigation hierarchy: the legal framework, the match between regulatory requirements and technical response capacities, training and information for territorial stakeholders, and finally the spatial scale to be considered in the implementation of the mitigation hierarchy.

Key-words

Artificialization, mitigation hierarchy, soil degradation, Environmental policies soil multifunctionality, biodiversity offsets, environmental impact assessment, territorial planning.

RESUMEN**INTEGRAR MEJOR LOS SUELOS EN LA SECUENCIA "EVITAR - REDUCIR - COMPENSAR"**

Mientras que los retos de la preservación de los suelos ganan en visibilidad en el seno de la sociedad, la ley francesa de 22 de agosto de 2021, llamada Ley Clima y Resiliencia, inscribe en la legislación francesa un objetivo de «cero artificialización neta» (ZAN) e introduce el concepto de compensación de la artificialización de los suelos, estableciendo un vínculo lógico con la secuencia «evitar, reducir, compensar» (llamada secuencia ERC).

Introducida en la legislación francesa por la Ley de protección de la naturaleza del 10 de julio de 1976 y consolidada por la Ley para la reconquista de la biodiversidad, de la naturaleza y de los paisajes del 8 de agosto de 2016, la secuencia ERC es un dispositivo ampliamente compartido a escala internacional que tiene por objeto limitar el impacto ecológico de los proyectos de obras, ordenación y documentos de planificación (planos, esquemas, programas). Esta secuencia se lleva a cabo mediante acciones destinadas a evitar, reducir y, en caso necesario, compensar las pérdidas aportando beneficios ecológicos equivalentes a las pérdidas, o incluso a sobrecompensarlas (adicionalidad ecológica).

En este contexto, nos preguntamos cómo se tienen en cuenta actualmente los suelos y su multifuncionalidad en la aplicación de la secuencia ERC en el territorio hexagonal francés.

Para ello, se realizó un trabajo de encuesta entre catorce actores territoriales, que ejercen en servicios instructores o participan en misiones regionales de autoridad medioambiental, y seis expertos en compensación y dimensionamiento. Se preguntó a los actores sobre su visión de la integración de los suelos en la aplicación de la secuencia ERC, en particular durante el diagnóstico del estado inicial y para el dimensionamiento de la compensación, sobre los conocimientos y recursos disponibles para tener en cuenta los suelos al momento de aplicar esta secuencia y sobre las palancas de posibles acciones.

Se completó este trabajo de investigación con un análisis de los documentos resultantes de estudios de impacto de proyectos de ordenación, a partir de una lectura de los expedientes por palabras clave definidas según un enfoque funcional de los suelos. Se seleccionaron siete expedientes (posteriores a 2016, fecha en que se reforzó la normativa ERC), lo que permitió estudiar una serie de proyectos de diversa naturaleza, en diferentes regiones y sujetos a diversos procedimientos reglamentarios. A estos expedientes estudiados se añaden cuatro dictámenes de la autoridad medioambiental relativos a proyectos de ordenación y tres guías relativas a los métodos de dimensionamiento de la compensación, así como la evaluación de las funciones de las zonas húmedas.

Los expertos entrevistados constatan unánimemente que se tiene muy poco en cuenta actualmente los suelos en la aplicación de la secuencia ERC, considerando que la normativa actual sobre los suelos no es lo suficientemente vinculante para que los suelos se integren sistemáticamente en los estudios de impacto. De hecho, el análisis de los documentos indica que los suelos son muy poco estudiados en los estudios de impacto, con una falta de consideración de su multifuncionalidad desde el diagnóstico del estado inicial de la zona a planificar.

Este trabajo permitió identificar 4 ejes en los que actuar para mejorar la toma en cuenta efectiva de los suelos en la secuencia ERC: el marco jurídico, la adecuación entre requisitos reglamentarios y capacidades técnicas de respuesta, la formación y la información de los actores de los territorios y, por último, la escala espacial que debe considerarse en la aplicación de la secuencia ERC.

Palabras clave

Artificialización, secuencia ERC, Cero artificialización neta, reglamentación, multifuncionalidad, biodiversidad, estudios de impacto, planificación territorial.

1. INTRODUCTION : UNE NÉCESSAIRE PROTECTION DES SOLS

Les atteintes aux sols sont aujourd'hui multiples. Les processus d'artificialisation des sols participent souvent à leur altération en les polluant, les modifiant, les imperméabilisant, ou les transformant et, ainsi, conduisent à des pertes de services rendus, du fait de l'atteinte portée à certaines fonctions, voire, dans certains cas, à la disparition complète du sol. Un sol peut ainsi être détruit en quelques minutes, alors qu'il a pu mettre des milliers d'années à se constituer. En France, en 2015, 9,4 % du territoire était considéré comme artificialisé (Naturefrance, 2023)¹, même si ce constat regroupe des situations très variables, et s'il peut évoluer en fonction des méthodes de mesure (Béchet *et al.*, 2017). Tout comme pour le pétrole, le gaz ou le charbon, le sol est présent en quantité limitée sur terre, et n'est pas un écosystème renouvelable à l'échelle humaine du temps (CESE, 2023).

Les sols sont en effet des écosystèmes complexes constitués d'une matrice organo-minérale en interaction avec le vivant, qui évoluent en permanence dans le temps et dans l'espace, aussi bien en surface qu'en profondeur. Ces milieux dynamiques et vivants², fortement influencés par le climat et les formations géologiques, présentent une très grande diversité de faciès, pour lesquelles des classifications aujourd'hui communément reconnues ont été proposées (Baize et Girard, 2008; IUSS Working group, 2022). Les sols sont le siège d'un grand nombre de processus (transfert, agrégation...), qui permettent d'assurer de multiples fonctions telles que le recyclage de la matière organique et des éléments nutritifs. Ces fonctions rendent de nombreux services à l'humanité; l'un des plus évidents est celui de la nutrition des plantes et de la production de biomasse végétale (FAO, 2022).

Les processus de restauration des sols, s'ils peuvent permettre de réhabiliter certaines fonctions altérées, sont complexes et nécessitent une ingénierie dans la majorité des cas coûteuse. Jusqu'à présent, aucune expérience connue en recherche n'a pu démontrer qu'un sol puisse être restauré dans son entièreté, incluant toutes les composantes de sa diversité et de sa fonctionnalité. Ainsi, dans un contexte post-industriel en Lorraine, la mise en place de Technosols construits permet de restaurer certaines fonctionnalités, comme la production d'un couvert végétal herbacé, mais, après 4 ans, les communautés du sol sont toujours très différentes des systèmes de référence

¹ Les données utilisées sont issues des enquêtes Teruti-Lucas ; des informations complémentaires sont disponibles sur le site de l'observatoire de l'<https://naturefrance.fr/node/101476>.

² Les sols abritent plus du quart de la biodiversité de la planète (FAO, 2020), biodiversité indispensable à leur fonctionnement et à la fourniture de services écosystémiques.

(Santorufó *et al.*, 2021). En contexte post-agricole, des expériences de réhabilitation des sols réalisées dans la plaine de la Crau en France, dans le cadre de l'expérimentation du premier Site Naturel de Compensation de Cossure, montrent des résultats encourageants, mais restent mitigés sur les capacités à retrouver la composition et la dynamique du sol d'origine (Jaunatre *et al.*, 2023). Il reste donc urgent de prendre conscience de la nécessité de préserver les sols, d'éviter toute dégradation nouvelle.

Dans ce contexte, les aménageurs, qui, par leurs projets d'aménagement, interviennent sur les sols, et peuvent modifier ou altérer leurs propriétés, fonctions ou services rendus, doivent inscrire leurs actions dans le respect de la séquence ERC (Éviter, Réduire, Compenser). La séquence ERC est l'objet de vives controverses et la littérature sur le sujet est très abondante. De nombreux auteurs s'interrogent à la fois sur ses fondements conceptuels, les biais dans sa mise en œuvre, et sa finalité (Moreno-Mateos *et al.*, 2015; Mechin et Pioch, 2019). Toutefois, la question de l'intégration des sols dans la séquence est rarement abordée dans ces travaux, ce que nous proposons de traiter dans cet article. Après avoir rappelé les principes de la séquence ERC, nous exposons ensuite les résultats issus d'une enquête menée auprès des acteurs en charge de l'application de la séquence ERC, notamment les services instructeurs, complétée par une analyse empirique des dossiers d'études d'impact afin d'évaluer la prise en compte réelle des sols dans l'application de la séquence ERC. La discussion de ces résultats nous permet de proposer quelques pistes d'action pour améliorer la prise en compte des sols dans l'évaluation environnementale.

2. LA SÉQUENCE « ÉVITER - RÉDUIRE - COMPENSER » : UN DISPOSITIF MIS EN PLACE POUR ATTÉNUER LES IMPACTS DES ACTIVITÉS HUMAINES SUR LA BIODIVERSITÉ

2.1. Définition, réglementation et principes

La séquence « Éviter - Réduire - Compenser » (ERC) est un dispositif qui vise à limiter les impacts des activités humaines sur les écosystèmes, et est mobilisée dans une centaine de pays à travers le monde de façon volontaire ou dans le cadre des législations nationales (GIBOP, 2019). En France, il a été introduit dans le droit avec la loi du 10 juillet 1976 relative à la protection de la nature³. La place de cette séquence a été renforcée par les

³ LOI n° 76-629 du 10 juillet 1976 relative à la protection de la nature, et son décret d'application n° 77-1141 du 12 octobre 1977

réformes successives du droit de l'environnement. Les principales évolutions sont : la Charte de l'environnement de 2005⁴, qui constitutionnalise les principes d'action préventive (art. 3) et de contribution à la réparation des atteintes à l'environnement (art. 4) ; les lois Grenelle de 2009 et 2010⁵, qui posent un certain nombre d'objectifs, comme le fait que la procédure du débat public doit être renouvelée afin de mieux prendre en compte l'impact des projets sur l'environnement, et réforment le régime de l'étude d'impact ; plus récemment, la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages de 2016⁶. Cette dernière affine les différentes étapes de la séquence ERC, institue de nouvelles modalités pour mettre en œuvre la compensation (via l'institution de l'opérateur de compensation ou la possibilité d'acquérir des unités de compensation dans le cadre d'un site naturel de compensation par exemple), fixe l'objectif d'absence de perte nette de biodiversité, voire de gain de biodiversité, et garantit des résultats écologiques et leur suivi sur le long terme.

En dépit de difficultés de mise en œuvre, la séquence ERC est devenue un des principaux leviers des politiques de conservation de la biodiversité (Levrel *et al.*, 2018). La mobilisation de cette séquence constitue un élément de la réponse politique aux enjeux nationaux et internationaux d'érosion de la biodiversité dans la poursuite de l'objectif d'absence de perte nette de biodiversité (APN) (Levrel *et al.*, 2018). La séquence a pour objectif de limiter l'impact écologique d'un aménagement en visant la préservation ou le rétablissement d'une biodiversité équivalente à celle impactée au travers de la conduite d'actions qui permettent d'apporter des gains écologiques équivalents aux pertes, voire des gains nets.

Dans sa logique la plus simple, la séquence ERC implique une succession hiérarchique de 6 principales étapes (Figure 1) : (1) établir l'état initial de la biodiversité de la zone à aménager qui consiste à identifier et décrire l'ensemble de la biodiversité présente ou potentiellement présente sur la zone d'étude (en particulier les espèces, habitats et fonctions écologiques car explicitement mentionnés dans la loi). (2) évaluer les impacts prévisibles et significatifs qui seront causés par le projet, plan ou programme d'aménagement sur cette biodiversité, nommés « impacts bruts ». L'objectif est ensuite d'éviter au maximum ces impacts en proposant des mesures d'évitement (3), comme par exemple une modification du tracé ou de l'emplacement du projet dans une zone à moindre impact écologique. Les impacts restants

doivent, autant que possible, être réduits par des mesures de réduction (4), comme par exemple, le décalage des périodes de travaux afin d'éviter l'impact sur la reproduction de l'avifaune. Les impacts subsistant aux mesures d'évitement et de réduction sont nommés « impacts résiduels » et ils doivent faire l'objet de mesures de compensation (5), qui respectent les exigences rattachées au cadre juridique de l'application de la séquence ERC. Afin d'atteindre l'objectif d'APN, le dimensionnement de la compensation permettra de vérifier que les gains et les pertes de biodiversité sont équivalents (équivalence écologique). Enfin, des mesures de suivi (6) seront réalisées en phases chantier et exploitation afin de vérifier le respect effectif des exigences réglementaires lors des travaux d'aménagement et des actions de compensation écologique.

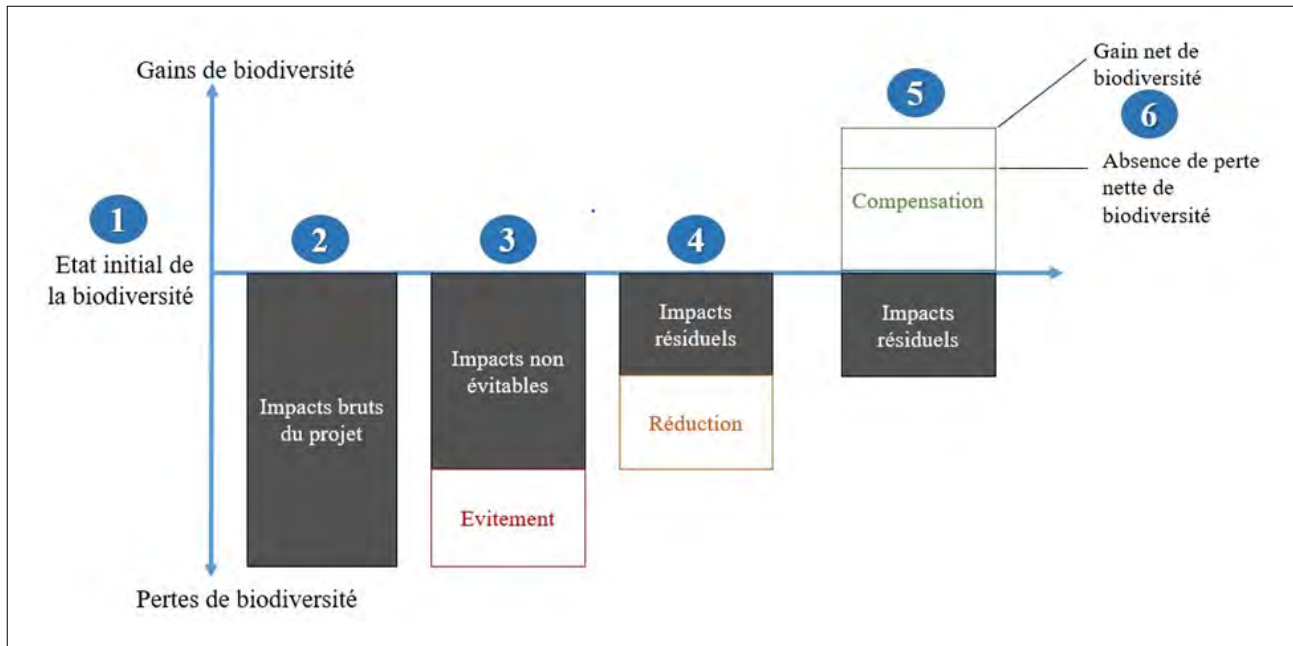
Dans les méthodes d'évaluation de l'équivalence écologique recommandées par les services instructeurs, la compensation est dimensionnée et mise en œuvre en miroir à un impact afin de générer un gain écologique qui puisse contrebalancer la perte générée par cet impact. Différents principes sont associés à l'application de cette ultime étape de la séquence en France :

- Équivalence écologique (L. 163-1 du code de l'environnement) : les gains écologiques doivent être équivalents aux pertes. Les gains générés par les mesures compensatoires doivent être de même nature qualitativement (mêmes espèces, mêmes habitats, même fonctionnement) et quantitativement que les pertes nettes engendrées par le projet (Bezombes *et al.*, 2017) ;
- Additionnalité écologique : les gains générés par la compensation doivent venir s'ajouter aux actions publiques existantes ou prévues en matière de protection de l'environnement (MEDDE, 2013). La compensation est additionnelle si elle permet de générer des gains qui n'auraient pas pu être atteints strictement en son absence ;
- Proximité fonctionnelle (L. 163-1 du c.env.) : les mesures de compensation doivent être mises en œuvre en priorité sur le site endommagé ou à proximité de celui-ci, afin de garantir sa fonctionnalité de manière pérenne. Le principe de proximité fonctionnelle impose de tenir compte du fonctionnement des milieux naturels affectés (Andreidakis *et al.*, 2021) ;
- Pérennité (L. 163-1 du c.env.) : bien que nécessairement limitées dans le temps, alors que la plupart des ouvrages n'ont pas vocation à être démontés, les mesures compensatoires doivent être effectives pendant toute la durée des impacts. La sécurisation foncière et financière doit en principe être prévue dès leur conception par le maître d'ouvrage ;
- Efficacité (L.163-1 du c.env.) : les mesures compensatoires sont soumises à une obligation de résultat. Elles doivent permettre d'atteindre le niveau de gain écologique prévu à leur conception ;
- Effectivité (L.163-4 du c.env.). Le maître d'ouvrage doit mettre en œuvre les mesures de compensation dans les conditions prévues et peut être tenu de constituer à cette fin des garanties financières. A défaut de satisfaire ses obligations,

4 LOI constitutionnelle n° 2005-205 du 1^{er} mars 2005 relative à la Charte de l'environnement.

5 LOI n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle dite « Grenelle 1 », / LOI n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement dite « Grenelle 2 »

6 LOI n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages

Figure 1. Différentes étapes de la séquence ERC.**Figure 1:** Mitigation hierarchy sequencing.

l'autorité administrative peut le mettre en demeure de régulariser sa situation au besoin en lui imposant des sanctions administratives. Elle peut également prescrire des mesures complémentaires, si elle constate que les mesures de compensation sont inopérantes pour assurer l'équivalence écologique ;

- Responsabilité personnelle (L. 163-1 du c.env.). Le maître d'ouvrage reste seul responsable vis-à-vis de l'autorité administrative de la bonne exécution des mesures de compensation, même s'il a confié celles-ci à un tiers.

2.2. Acteurs impliqués

L'application de la séquence ERC implique un système d'acteurs diversifiés qui peuvent se répartir selon les principales catégories suivantes (Figure 2). Les services « régulateurs » interviennent à différents niveaux d'organisation territoriale (centralisée et décentralisée). Ils sont composés :

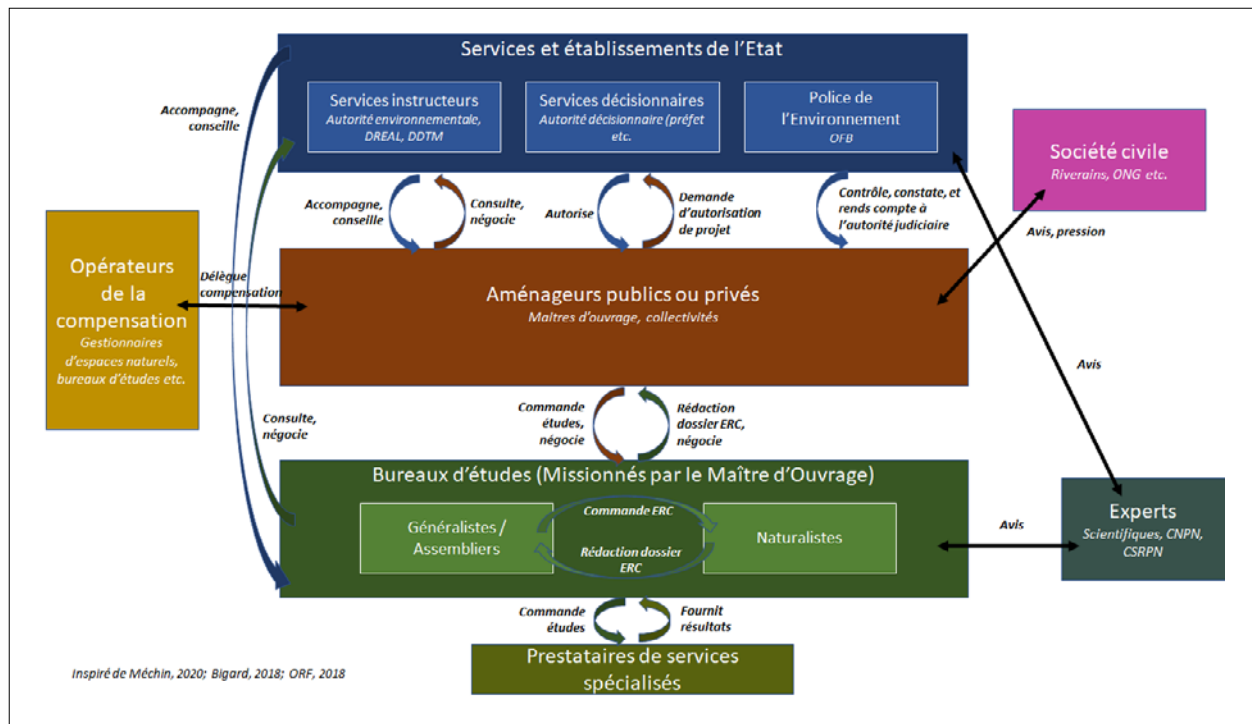
- des services instructeurs, décisionnaires et de contrôle ;
- des aménageurs (maîtres d'ouvrage publics ou privés), responsables des projets, plans ou programmes d'aménagement qui ont la responsabilité juridique d'application de la séquence ERC, afin d'atteindre l'objectif d'APN ;
- des bureaux d'études naturalistes, qui ont en charge la réalisation de l'étude d'impact environnemental pour le compte du maître d'ouvrage. Leur mission peut aller de l'évaluation environnementale au suivi des mesures ERC mises en œuvre.

- éventuellement d'autres catégories d'acteurs qui sont susceptibles d'intervenir dans l'application de la séquence ERC, comme les opérateurs de compensation (par exemple les sociétés fiduciaires de compensation, la CDC Biodiversité...), les experts qui émettent des avis sur les différentes étapes de validation de la séquence, des prestataires de services externes qui peuvent venir appuyer l'évaluation environnementale par exemple, et la société civile qui peut jouer le rôle de contre-pouvoir.

2.3. Séquence ERC et Zéro Artificialisation Nette (ZAN) : la nécessaire question du sol

Dans le contexte précédemment décrit, la loi du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et le renforcement de la résilience face à ses effets⁷, a introduit dans le chapitre III (articles 191 à 226), un nouvel engagement, celui de « zéro artificialisation nette » (ZAN) à atteindre en 2050. Pour la première fois, la notion d'artificialisation se trouve définie par le droit. L'art. L. 101-2-1 du Code de l'urbanisme dispose en effet qu'il s'agit de « l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage ». Et la renaturation d'un sol, ou désartificialisation, « consiste en

⁷ LOI n°2021-1104 du 22 août 2021

Figure 2 : Système d'acteurs impliqués dans la Séquence ERC.**Figure 2:** Stakeholders involved in the mitigation hierarchy.

des actions ou des opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol, ayant pour effet de transformer un sol artificialisé en un sol non artificialisé ». L'artificialisation nette des sols est définie comme « le solde de l'artificialisation et de la renaturation des sols constatés sur un périmètre et sur une période donnés ». Le décret relatif à la nomenclature de l'artificialisation des sols pour la fixation et le suivi des objectifs dans les documents de planification et d'urbanisme⁸, vient préciser les catégories de surfaces artificialisées ou non. Ce texte s'écarte de la définition législative de l'artificialisation des sols, dans la mesure où il n'est plus question des fonctions des sols mais uniquement des surfaces combinées avec leur usage.

De fait, même si le ZAN, entre circulaires et débats parlementaires sur son périmètre et ses délais d'application, est encore débattu et loin d'être stabilisé, la question des sols doit rester centrale dans la séquence ERC, puisque le solde entre artificialisation et renaturation induit des logiques d'évitement, de réduction et de compensation. Le décret relatif aux modalités d'octroi de l'autorisation d'exploitation commerciale pour les projets qui engendrent une artificialisation des sols⁹ précise

ainsi les modalités de compensation prises en compte dans l'examen des dérogations prévues au même article. En résumé, le droit de l'urbanisme comporte désormais son propre régime de compensation, dont les modalités de mise en œuvre restent à définir. Pour l'heure, la convergence entre le régime des art. L. 163-1 et suivants et le ZAN réside uniquement dans la possibilité pour les schémas de cohérence territoriale (SCoT) et les orientations d'aménagement et de programmation (OAP) de définir, s'ils le souhaitent, des zones de renaturation préférentielles.

3. INTÉGRATION DES SOLS, DE LEUR MULTIFONCTIONNALITÉ DANS LA SÉQUENCE ERC : ENQUÊTE AUPRÈS DES ACTEURS CONCERNÉS ET ANALYSE DE DOCUMENTS

Au regard de la législation et de son évolution récente, décrite dans la partie précédente, il convient de faire l'état des lieux de la prise en compte actuelle des sols, de leur multifonctionnalité, liée notamment à leur biodiversité, dans la séquence ERC. La question posée ici porte explicitement sur la façon dont les sols sont ou ne sont pas pris actuellement en compte dans les

⁸ Décret n°2022-763 du 29 avril 2022, en cours d'évolution (mise à la consultation du public en date du 6 juin 2023 relative au projet de décret relatif à l'évaluation et au suivi de l'artificialisation des sols).

⁹ Décret n°2022-1312 du 13 octobre 2022.

Figure 3 : Mots-clés utilisés lors de la lecture des dossiers d'études d'impacts.**Figure 3:** Keywords used to analyse impact assessments.

Services écosystémiques	Fonctions du sol	Mots clés
Services de support		
Support pour la végétation	Support principal pour la végétation terrestre	profondeur, racine
Cycle d'éléments nutritifs	Stockage et cycle de N et P	minéralisation, teneur, décomposition, matière organique, azote, phosphore, minéraux, carbone
Services d'approvisionnement		
Stockage d'eau	Rétention d'eau	réserve utile (en eau), infiltration, porosité
Habitat	Fournit un habitat pour de nombreux organismes	biomasse, faune du sol
Ressource génétique	Source de matériel biologique (intérêt pharmaceutique)	NA
Fourniture d'aliments, fibres et combustibles	Croissance des plantes assurées par le sol (intérêt indirect pour les animaux)	Capacité d'Échange Cationique (CEC), pH
Fourniture de matériau de construction	Fournit des éléments nécessaires aux matériaux de construction	excavation, terre crue
Services de régulation		
Régulation du climat	Séquestration du C, régulation de la température et de la précipitation	stock(age) de carbone, GES
Limitation de l'érosion	Rétention du sol	érosion
Régulation des crues	Régulation des flux hydriques	inondation, imperméabilisation, ruissellement, compaction, tassement
Purification de l'eau et limitation des contaminants	Filtration de l'eau et rétention de polluants	pollution, pesticides, contamination, polluants, amendements organiques, digestats, résidus organiques, hydrocarbures, éléments traces métalliques
Services culturels		
Patrimoine culturel	Contient des archives archéologiques, fournit un élément du paysage	artefact, paysage
Loisirs	Lieu pour des activités humaines	artificialisation, consommation d'espaces, densité urbaine
Mots clés supplémentaires		
pédologie, pédologique, terre(s), sol(s) agroécologie, remise en état		

procédures et par le système d'acteurs (Figure 2), en s'attachant plus particulièrement aux études d'impact. La présente partie tente d'y répondre à travers une analyse bibliographique, la lecture et l'analyse d'études d'impacts, et une enquête auprès d'experts.

3. 1. Matériel et Méthodes

3.1.1. Enquête auprès d'experts

L'enquête a été réalisée entre octobre et décembre 2021, dans le cadre d'une auto-saisine du Comité Scientifique, Technique et d'Innovation du RNEST, en liaison avec l'OFB.

Les experts interrogés sont des agents des services instructeurs, c'est-à-dire des DREAL, des DDT(M) et des membres de trois Missions Régionales d'Autorité environnementale (MRAe). Le choix a été fait de se focaliser sur certaines régions, dans lesquelles nous avons déjà de solides contacts pour une meilleure efficacité de l'enquête dans les temps impartis. Quatorze personnes ont été interviewées, se répartissant entre quatre régions (Occitanie (8), Hauts-de-France (2), Bretagne (3), Normandie (1)) et trois types d'acteurs (DREAL (9), DDT(M) (2) et MRAe (3)). Ce panel a été complété par six experts spécialistes du dimensionnement de la compensation, tous membres d'un

groupe de travail sur l'objectif ZAN et de l'Association Française d'Etude du Sol (AFES).

Les experts ont été interrogés au travers d'échanges de mails, avec une proposition d'y répondre par le même canal ou par un échange téléphonique, et de partager des documents si cela leur semblait pertinent. Sept entretiens, d'une vingtaine de minutes à une heure, ont été réalisés sous forme d'entretiens semi-directifs, retranscrits puis analysés. Le guide d'entretien a été ajusté en fonction de l'expert et portait sur la présentation de l'étude et l'expression de leur point de vue sur :

- l'intégration des sols, dans l'application de la séquence ERC (incluant dans ce cas l'état initial et le dimensionnement a priori de la compensation) ;
- l'intégration des sols dans l'état initial (prise en compte ou non des sols ; par quels indicateurs, données) ;
- l'intégration des sols dans le dimensionnement de la compensation à partir de leur expérience ou de dossiers qu'ils ont eus en main ;
- les connaissances de documents et de personnes ressources travaillant sur la prise en compte des sols dans la séquence ERC ;
- les leviers d'actions permettant une meilleure intégration des sols dans cette séquence.

3.1.2. Analyse bibliographique : lecture de documents - études d'impact

L'étude des dossiers d'évaluation environnementale s'est concentrée sur les projets d'aménagement, pour lesquels la question des sols semblait être davantage traitée que dans ceux des plans et programmes. Une sélection de sept dossiers a été réalisée afin d'étudier un panel de projets de différentes natures, dans différentes régions et relevant de diverses procédures réglementaires. Les dossiers étudiés ont été déposés entre juin 2018 et mai 2021, et sont donc postérieurs à 2016, date à laquelle la réglementation de la séquence ERC s'est vue renforcée.

À ces dossiers étudiés s'ajoutent quatre avis de l'autorité environnementale portant sur des projets d'aménagement qui ont été transmis par la MRAe Normandie et trois guides relatifs aux méthodes de dimensionnement de la compensation, et l'évaluation des fonctions des zones humides (Andreadakis *et al.*, 2021 ; Gayet *et al.*, 2016 ; Truchon *et al.*, 2020).

Les dossiers d'études d'impacts ont été analysés à partir d'une lecture par mots-clés, en se basant sur une approche fonctionnelle des sols (Figure 3). L'établissement des différentes fonctions rendues par les sols est issu de recherches bibliographiques (FAO, 2015 ; Ruellan, 2016 ; Walter *et al.*, 2015).

3. 2. Résultats

3.2.1. Enquête auprès des experts

Les experts interrogés font le constat unanime que les sols sont très peu pris en compte actuellement dans l'application de la séquence ERC, à quelques exceptions près : i) les zones humides, où l'étude des sols reste cependant partielle (critère d'hydromorphie seul), ii) les terres à vocation agricole ou lorsque le projet intègre un plan d'épandage ; iii) l'érosion des sols traitée lors des demandes d'autorisation de défrichement ; iv) la gestion des eaux pluviales et souterraines, qui peut indirectement prendre en compte le sol. La biodiversité des sols n'est jamais prise en compte. **Par ailleurs, les sols ne sont quasiment pas intégrés au diagnostic de l'état initial, et a fortiori aux étapes suivantes, dont celle de la caractérisation et du dimensionnement de la compensation.**

Ces experts indiquent que, de leur point de vue, la réglementation actuelle sur les sols n'est pas suffisamment contraignante pour que les sols soient intégrés systématiquement dans les études d'impact. Dès lors ce compartiment est souvent omis par les maîtres d'ouvrage enclins à rechercher les moindres coûts. Des guides nationaux récents décrivent les différentes méthodes existantes de dimensionnement de la compensation, mais ne font que très peu mention d'indicateurs sur lesquels elles peuvent être basées, et ne font pas mention d'indicateurs relatifs aux sols. Une seule méthode, la méthode ECOVAL, inclut des critères relatifs aux sols. Cette méthode

mesure l'équivalence écologique fournie par les mesures de compensation et retient, pour le sol, des indicateurs sur la faune du sol, l'état de dégradation du sol et le nombre de couches organiques (Bezombes *et al.*, 2018). Dans la pratique, aucune mesure sur les sols n'apparaît sur le site internet qui présente et propose de mettre en œuvre la méthode (<https://ecoval.pam-retd.fr/>, dernier accès en décembre 2021) et le seul indicateur relatif aux sols est celui de la surface artificialisée.

Il convient de noter que les méthodes d'évaluation de l'équivalence écologique présentent une forte hétérogénéité à l'échelle internationale dans les composantes écologiques qui sont étudiées, et leurs dimensions spatio-temporelles (Boileau *et al.*, 2022). Cela a pour conséquence une forte hétérogénéité dans les pratiques des bureaux d'étude qui peuvent prendre en compte de façon très partielle la complexité écologique des zones d'impact étudiées.

Différents leviers d'action ont été mentionnés durant les entretiens : celui de la réglementation afin de promouvoir, voire d'exiger l'intégration des sols dans l'application de la séquence ERC ; celui de mieux former et informer à l'étude des sols les acteurs impliqués dans l'application de la séquence ERC ; enfin, celui de diffuser les résultats de projets intégrant l'étude des sols.

L'absence de définition des sols dans la réglementation est perçue comme un des freins majeurs à leur intégration dans l'application de la séquence ERC. Une telle définition obligerait les acteurs à les considérer véritablement, en allant au-delà d'une simple approche surfacique, en dépassant une approche sectorielle (sites et sols pollués, stockage de carbone, potentiel agricole des sols, zones humides etc.), pour prendre en compte leur multifonctionnalité. La rédaction d'un guide national est aussi suggérée, lequel décrirait les bonnes pratiques d'une prise en compte des sols. Ce guide pourrait contenir la définition des sols illustrée d'exemples, la définition des fonctions et services écosystémiques rendus par les sols, les différents indicateurs permettant leur mesure, les valeurs seuil au-delà desquelles les impacts seraient considérés significatifs. Un expert a proposé 3 groupes d'indicateurs, ceux liés à l'activité biologique (capacité de minéralisation de la matière organique...), à la structure du sol (agrégation, réserve en eau...) et à la biocénose (qualité des habitats...). Cet expert a indiqué que les indicateurs du sol devraient être pensés par rapport à ce qu'on cherche à évaluer, et aux caractéristiques de la zone étudiée. Une étude est actuellement conduite par la Délégation à l'expertise à la prospective et aux études (DEPE) d'INRAE pour établir un état des lieux des connaissances scientifiques sur la question des indicateurs de qualité des sols (Renault *et al.*, 2023). Elle s'attache notamment à établir l'opérationnalité et l'établissement d'un cadre spatio-temporel approprié en vue de faire converger différentes politiques publiques ayant un impact sur les sols.

3.2.2. Analyse de documents

L'analyse des documents indique que les sols sont très peu étudiés dans les études d'impacts, avec une absence de prise en compte de leur multifonctionnalité dès le diagnostic de l'état initial de la zone à aménager. De nombreuses fonctions et services sont indirectement mentionnés au travers notamment de la gestion des eaux ou du stockage de carbone. Les sols sont mentionnés dans la partie relative à la description du milieu physique de la zone d'étude. Ils sont abordés essentiellement au travers d'une étude géologique rapide de la zone, généralement complétée par un extrait de la carte géologique en indiquant la localisation du site d'étude. L'étude des sols dans les études d'impact se limite généralement à ces éléments très succincts. Dans certains cas, des études pédologiques sont réalisées sur la zone à aménager : en cas de projets agricoles, ou lorsque les milieux impactés sont des terres agricoles et/ou des zones humides.

L'artificialisation des sols est le plus souvent jugée impactante lorsque les espèces ou habitats sont à enjeux écologiques forts. Le sol en tant que tel n'est ainsi pas considéré comme impacté en cas d'artificialisation. Notons que dans un des cas étudiés, l'imperméabilisation est même vue comme un moyen d'éviter toute forme de pollution accidentelle du sol. Parfois la notion d'artificialisation n'est pas assumée, par exemple dans le cas de centrales photovoltaïques au sol qui permettent le développement d'un couvert végétal. Ainsi, l'artificialisation est jugée comme n'ayant pas d'impact sur les sols dans les quelques études examinées.

Fonctions et services pris en compte

Les fonctions du sol le plus souvent prises en compte dans les dossiers examinés sont celles relatives au support fourni pour les espèces végétales et animales, ainsi qu'à la régulation des eaux pluviales et souterraines. La faune du sol n'est jamais mentionnée dans les dossiers étudiés ; les bactéries et champignons non plus. L'intérêt agricole des sols est parfois mentionné, et la terminologie « terres agricoles » est alors employée, faisant ainsi référence à la fonction de support de culture pour les végétaux. Cependant, aucune mesure sur la capacité nutritive des sols n'est réalisée dans les études analysées. La mention de sols comme « banque de graines » est apparue dans deux dossiers, et des mesures peuvent être prises dans le cas d'espèces végétales protégées pour essayer de conserver au mieux cette banque de graines. La notion de sol comme un composant de l'habitat est ainsi reconnue, directement ou indirectement, mais les sols ne sont jamais considérés comme un habitat à part entière. Cela s'observe notamment par le fait que l'étude pédologique est un des critères pour définir une zone humide : le sol a donc des fonctions hydrologique, biogéochimique et d'habitat. Par ailleurs, des mesures sont mises en œuvre pour conserver ou compenser un habitat lorsque celui-ci ou des espèces protégées y vivent

sont considérés comme impactés significativement. Un dossier présente une mesure de compensation visant à restaurer une friche en terre agricole. Les sols étant considérés comme une composante de ces habitats dans ce projet, la mesure de compensation fait mention de travaux spécifiques aux sols, se justifiant par le fait que les sols doivent être modifiés pour que l'ensemble de l'écosystème puisse l'être à son tour. Notons que, malgré cela, aucune analyse du sol dans la zone à aménager n'a été réalisée dans ce dossier afin de garantir une équivalence de l'aménagement en matière de fonctionnalité écologique.

La régulation des eaux apparaît quant à elle dans la question des eaux et sols pollués, et dans la gestion du ruissellement des eaux pluviales et de la contamination des eaux souterraines. Les sols sont décrits par la présence ou non d'eaux souterraines, et leur intérêt dans l'évacuation des eaux, mais aucune mesure de perméabilité ou de capacité de réserve en eau n'est réalisée.

Fonctions et services pris en compte de manière indirecte dans les dossiers

Le service de régulation du climat est indirectement mentionné par le fait que les sols sont considérés comme une composante des habitats. Un dossier fait mention de la forte capacité de stockage de carbone des forêts, mais sans indiquer qu'une partie importante de ce stockage a lieu dans les sols. Cette fonction de stockage est donc sous-estimée, et n'est jamais évaluée spécifiquement pour les sols.

La filtration de l'eau et la rétention des polluants liées aux sols sont indirectement traitées dans l'étude des eaux pluviales et souterraines. Néanmoins, les impacts causés par le projet du fait d'une modification de l'infiltration des eaux pluviales risquant de polluer les sols sont étudiés sans que les capacités physico-chimiques intrinsèques du sol à retenir, voire à fixer les polluants, ni les risques pour sa biodiversité, ne soient évalués. Selon un schéma similaire, l'érosion des sols est traitée comme un impact causé par le projet d'aménagement sur les sols. Néanmoins, la stabilité structurale, dont dépend la sensibilité à l'érosion d'un sol, n'est pas caractérisée à l'état initial dans les dossiers étudiés.

Fonctions et services non pris en compte dans les dossiers

La capacité des sols à stocker et à fournir des minéraux ou nutriments aux organismes vivants n'est pas traitée dans les dossiers. La notion de qualité des sols est parfois abordée sans jamais être définie, et cela se résume généralement à l'étude du niveau de pollution des sols *via* la consultation de la base de données des anciens sites industriels et activités de services intitulée « BASIAS » et celle des sites et sols pollués (ou potentiellement pollués) par les activités industrielles appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif « BASOL ».

Les fonctions liées aux services culturels sont aussi très peu étudiées dans les études analysées. Une étude mentionne la présence potentielle d'artefacts archéologiques, mais aucune étude ne mentionne les sols dans la description du paysage.

DISCUSSION

Le constat d'un déclin global de la biodiversité depuis plusieurs décennies et l'identification de ses causes sont désormais bien documentés par les sciences de la conservation (Godet et Devictor, 2018; IPBES, 2019). Les publications et les rapports scientifiques s'accumulent pour souligner l'urgence de la situation : ils montrent que nous approchons de seuils d'irréversibilité pour de nombreuses espèces et habitats, dont les conséquences socio-économiques seront considérables (Díaz *et al.*, 2019; IPBES, 2019).

Pour autant, la littérature scientifique qui porte sur l'étude de l'application de la séquence ERC amène à deux constats : l'application des différentes étapes de la séquence ERC reste souvent partielle, les étapes de réduction et de compensation étant les plus mobilisées (Bigard *et al.*, 2017), et les connaissances écologiques n'étant pas intégrées dans la pratique (Calvet, 2022). Lorsque la séquence est appliquée, l'étude des pratiques des acteurs révèle des défauts dans la prise en compte des différentes composantes qui constituent « l'environnement » dans sa globalité. De manière plus précise, des travaux ont permis de souligner les principales défaillances qui surviennent aux différentes étapes de l'application des outils des politiques publiques, comme par exemple une mauvaise identification des espèces présentes, l'absence de prise en compte des dynamiques écologiques dans l'espace et dans le temps, et le manque de définitions de seuils écologiques qui permettent d'identifier des états de référence pour évaluer la biodiversité (Calvet *et al.*, 2015; Devictor, 2018).

Les travaux menés spécifiquement sur la prise en compte des sols dans l'application de la séquence ERC sont encore balbutiants et exploratoires. L'analyse présentée ici est basée sur une dizaine d'échanges avec des acteurs de l'application de la séquence ERC et moins d'une dizaine de dossiers d'études d'impacts, ne concernant que quatre régions de France. Les résultats sont donc à prendre avec prudence. Il faudrait compléter l'analyse d'autres textes afin de valider nos observations et de déterminer les raisons du niveau d'intégration des sols aux études (région, nature du projet, type de procédure réglementaire, bureau d'études et aménageurs chargés de l'étude, type de milieux, d'habitats ou d'espèces etc.). Par exemple, la dimension du projet peut parfois justifier de ne pas considérer le compartiment sol, la réglementation étant soumise au principe de proportionnalité. Il conviendrait aussi d'étendre l'étude aux régions d'Outre-Mer. Davantage d'acteurs, notamment de bureaux d'études, mais aussi d'aménageurs, pourraient être entretenus. Par ailleurs, un complément d'analyse portant sur les plans et les programmes pourrait être réalisé. De

plus, l'évitement et la réduction n'apparaissent pas forcément dans les documents car ils peuvent être réfléchis en amont des projets. Enfin, les projets étant souvent inscrits dans le temps long (5 à 10 ans), on peut imaginer que les termes de l'application de la loi de 2016 évoluent dans les prochaines années.

Néanmoins, les résultats convergent vers une quasi-absence de prise en compte des sols dans l'application de la séquence ERC, dans toutes les situations analysées, quels que soient la région, la nature du projet d'aménagement, les milieux impactés ou bien les procédures réglementaires concernées. Ils rejoignent d'ailleurs les travaux menés dans le cadre de la synthèse 2022 de la Conférence des autorités environnementales qui appelle à apprécier l'impact sur la qualité des sols à l'aune de sa multifonctionnalité. Les autorités environnementales incitent les collectivités et porteurs de projets à investir ces champs, encore émergents pour certains d'entre eux (Autorité Environnementale, 2023).

Ainsi, le constat d'une faible application de la séquence ERC est malheureusement encore bien pire lorsque nous considérons les sols. Nous en analysons ci-dessous les raisons et proposons quelques pistes d'actions.

4.1. Faire évoluer un contexte juridique jusqu'ici peu favorable à la préservation des sols

D'abord présents dans les dispositions réglementaires relatives à l'état initial de l'environnement, puis intégrés à l'art. L. 122-1 du Code de l'environnement, les terres et le sol (ces deux éléments sont bien distincts) font bien partie des facteurs à prendre en compte et mesurer dans les études d'impact des projets. Si, avec près de cinquante ans d'existence et de mise en œuvre, l'étude d'impact est un outil éprouvé, nonobstant les ajustements dont il a fait l'objet, cet outil n'a que peu de considération pour le sol et ce constat est partagé dans la plupart des Etats membres de l'Union européenne (Schatz *et al.*, 2021). Le sol fait l'objet d'un traitement très superficiel en dépit des alertes répétées de l'autorité environnementale nationale (Autorité Environnementale, 2020, 2021, 2023).

Les dispositifs actuels liés à la séquence ERC devraient être améliorés et mobilisés pour freiner le processus d'artificialisation des sols et notamment selon trois axes : (i) la problématique des petits projets qui échappent aux procédures administratives auxquelles est couplée la séquence ERC, et qui sont responsables d'une grande part de l'artificialisation ; (ii) la localisation des mesures compensatoires dans des espaces déjà naturels (Weissgerber *et al.*, 2019) ; (iii) la quasi-absence de contrôle sur les alternatives étudiées et les mesures d'évitement, due bien souvent à une faible capacité de l'autorité environnementale à juger de la recevabilité des dossiers pour tout ce qui touche au sol, donnant lieu à des interprétations variables des textes législatifs et réglementaires (Barral et Guillet, 2022).

Il est donc essentiel que la séquence ERC puisse être correctement mobilisée pour contribuer à l'objectif ZAN fixé

par la loi Climat et Résilience. Cela pourrait supposer, d'une part, de construire un cadre méthodologique pour encadrer la compensation de l'artificialisation des sols, et d'autre part, plus largement, de mieux intégrer les enjeux liés à la multifonctionnalité des sols dans la mise en œuvre de la séquence ERC à l'échelle de la planification, dans le choix des zones à préserver ou des zones de renaturation préférentielle dans les SCoT ou dans les secteurs à renaturer des OAP prévues par les PLU(i). Malheureusement les textes récents et propositions de lois concernant les conditions d'application du ZAN (voir partie 1.3), s'ils permettent de préciser les liens avec la séquence ERC, et d'explicitier les critères dérogatoires liés à l'artificialisation en introduisant la notion d'équivalence fonctionnelle, ont aussi exclu de son champ d'application des secteurs d'activité importants aboutissant à une destruction des sols (cas des carrières, considérées comme des surfaces non artificialisées)¹⁰. Par ailleurs, la proposition de loi « visant à faciliter la mise en œuvre des objectifs de « zéro artificialisation nette » au cœur des territoires » adoptée par le Sénat¹¹, actuellement en discussion à l'Assemblée Nationale, permettrait d'exclure ou de comptabiliser de façon spécifique de nombreux projets, notamment ceux « résultant de projets de construction, d'aménagement, d'infrastructures ou d'équipements d'ampleur nationale ou européenne et qui présentent un intérêt général majeur » (Billet, 2023). Notons que, pour cette initiative, aucun spécialiste des sols n'a été consulté. Cette situation révèle entre autres choses que la notion d'artificialisation est trop étroite pour assumer à elle seule la protection des sols de manière générale et que le droit de l'urbanisme n'est pas, par essence, un droit de protection, mais bien un droit en charge de l'affectation et de l'occupation des sols au regard d'une multitude d'enjeux.

La question de la place des sols dans la séquence ERC est finalement assez illustrative de la façon dont les sols sont aujourd'hui traités dans le droit français : les instruments régissant les usages et la gestion des sols restent pour l'instant fragmentés (Billet et Desrousseaux, 2021), car le sujet des sols embrasse non seulement une diversité d'enjeux et de communautés d'acteurs mais aussi une diversité de réglementations : droit civil (droit de propriété, servitudes), droit rural (exploitation agricole, protection contre l'érosion, accès au foncier), droit de l'urbanisme (planification, artificialisation des sols...), droit de la santé (support de mesures de protection des captages d'eau potable), droit de l'environnement (sols pollués), sans compter les politiques climatiques (stratégie nationale bas carbone, plan national d'adaptation au changement climatique, initiative « 4 pour 1 000 »). L'élaboration d'une stratégie nationale sur les sols envisagée dans le premier volet de la Stratégie nationale pour la

biodiversité 2030 (mesure 1-3) pourrait permettre une meilleure intégration de ces différents instruments.

4.2. Réduire les décalages entre des exigences réglementaires et des capacités techniques de réponse

« L'évaluation environnementale permet de décrire et d'apprécier de manière appropriée, en fonction de chaque cas particulier, les incidences notables directes et indirectes d'un projet sur les composantes suivantes : la biodiversité..., les terres, le sol, l'eau, l'air et le climat... »¹². La séquence ERC doit s'appliquer sur l'ensemble de ces éléments. Le premier décalage porte en particulier sur la faiblesse de la caractérisation de l'état initial de la zone à aménager, qui se focalise sur les espèces et les habitats, avec des inventaires très compartimentés dont le sol est absent. Cette carence s'explique aussi par la place marginale que tient le sol dans la définition de beaucoup d'habitats, où les critères floristiques sont prédominants.

Dès lors, il est difficile d'évaluer les impacts de scénarios d'aménagement, par comparaison à un état initial peu informé, et donc de définir ce que pourraient être des mesures d'évitement, réduction et compensation.

Des capacités techniques de réponse existent mais demandent des progrès pour leur opérationnalisation, en s'appuyant sur des compétences sur les sols, mais aussi des compétences sur les accès à l'information disponible dans les portails d'information dédiés aux sols (portail du GIS Sol, ou Géoportail de l'IGN, ou encore portails d'information en région (Froger et al., 2023)), voire des compétences sur les modes d'estimation de propriétés du sol (cartographie numérique) et sur l'estimation des fonctions écologiques des sols à partir des caractéristiques des sols. Le sol apparaît comme une composante complexe des écosystèmes pour laquelle il existe un manque de formations, de compétences dans les bureaux d'études ayant en charge les études d'impact. Les capacités techniques de réponse demandent également des cadrages, voire des cahiers des charges susceptibles de mieux définir les informations sur les sols à fournir, dans le contexte cadre d'une démarche opérationnelle (coûts, temps, compétences...). Elles doivent enfin concerner l'ensemble de la chaîne d'expertise et de décision, depuis les opérateurs de terrain jusqu'aux maîtres d'ouvrage.

Si l'on peut s'accorder aujourd'hui sur de plus grandes facilités dans l'accès à des données sur les sols, il subsiste la difficulté de les avoir à une échelle locale pertinente pour pouvoir être intégrées dans les diagnostics environnementaux de planification et de projets d'aménagement. Les informations disponibles sont le plus souvent à l'échelle territoriale, et non

¹⁰ Décret 2022-763 du 29 avril 2022

¹¹ Proposition de loi n° 205 du 14 décembre 2022

¹² Extrait de l'article L122-1 du Code de l'Environnement

à celle de l'aménagement foncier concerné ; les informations à l'échelle de la parcelle doivent donc être acquises par des mesures de terrain. En effet, seules les cartes du Référentiel Régional Pédologique¹³ à l'échelle du 1/250 000 sont consultables par tous. On constate aussi une méconnaissance des ressources actuelles en cartes des sols (outil Refersols du GIS Sol ; <https://webapps.gissol.fr/georefersols/>), et leur rare utilisation par les intervenants techniques.

Les informations sur la biologie des sols sont encore très partielles, bien développées sur le compartiment microbien ou les vers de terre, mais en plein développement sur les autres compartiments. Le faible nombre et la raréfaction des spécialistes pour certains groupes taxonomiques de la pédofaune constituent un obstacle dont il faut tenir compte. Différents programmes sont aujourd'hui en cours afin de proposer des outils analytiques sur la biologie du sol et les fonctions écologiques associées (Imbert *et al.*, 2021 ; Joimel *et al.*, 2017).

Il s'agit donc d'établir des guides ou référentiels techniques d'aide à la prise en compte des sols dans des documents relatifs à la séquence ERC, et notamment dans les études d'impact à court terme, en incluant le sol dans les logigrammes de projet. Ces cahiers des charges seraient utiles, à concevoir de manière à la fois adaptée aux types de documents d'aménagement (plans et programmes, échelles associées) et évolutive pour tenir compte de l'évolution de la connaissance et des données sur les sols, en particulier dans le domaine de la biologie des sols.

Ces guides techniques devront prendre en compte les contextes particuliers des sols et surtout les fonctions à préserver qui sont visées, qui peuvent être très différentes selon le contexte. Ainsi, pour les sols agricoles, il sera plus opportun de réfléchir à des indicateurs favorables aux fonctions de production de biomasse, alors que, pour d'autres types de sols, des indicateurs de biodiversité ou relatifs aux stocks de carbone pourraient être préférés.

4.3. Mieux former et informer les acteurs des territoires, et diffuser plus largement les outils existants

Au-delà de l'acquisition d'une information sur les caractéristiques des sols, la construction d'indicateurs des fonctions et services écosystémiques des sols qui font sens pour l'action, ici leur intégration dans les logiques ERC, nécessite une co-construction et une appropriation par les acteurs concernés.

Les freins principaux à l'intégration des sols dans l'application de la séquence ERC sont le manque d'information et de formation sur les sols et les outils permettant leur analyse. Ainsi, l'étude des dossiers a permis de constater que le terme de

« qualité des sols », bien que rarement mentionné, est employé sous une forme très restrictive de sa définition généralement admise en sciences du sol (voir glossaire).

La formation doit toucher l'ensemble des acteurs de l'application de la séquence ERC, incluant également les maîtres d'ouvrages, élus et aménageurs privés ; en définissant ce que sont les sols, justifiant de leur rôle fondamental dans les écosystèmes, en tant que support pour la biodiversité mais aussi et surtout par la multifonctionnalité de ces derniers. Toutes les fonctions assurées par les sols doivent être décrites et illustrées, ainsi que des exemples de mesures ou d'indicateurs visant à les décrire. Ces formations doivent pouvoir s'appuyer sur des documents et guides méthodologiques de référence qu'il reste à construire, qui doivent être opérationnels tant pour les phases d'élaboration que d'évaluation des études. Il est en effet nécessaire de combler le décalage croissant entre une connaissance de plus en plus fine des sols par les experts en sciences du sol et la piètre appropriation de ces connaissances par les milieux professionnels ou institutionnels. En France de nombreux projets ont été mis en œuvre sur les sols. Ces projets visent :

- le développement d'indicateurs permettant de mesurer la qualité des sols voire de la cartographier,
- le développement d'outils d'aide à la décision concernant les pratiques à adopter, mais aussi l'évaluation de la perception des acteurs de l'aménagement sur les sols,
- à fournir des recommandations permettant une meilleure intégration des sols. Certains de ces projets sont focalisés sur les sites pollués, agricoles ou urbains, mais les résultats peuvent être réemployés pour l'aménagement du territoire. D'autres sont spécifiques à l'aménagement, comme par exemple le projet MUSE qui permet de cibler les zones susceptibles de nécessiter des mesures ERC, de décrire et de quantifier les impacts sur les sols, et de fournir des indicateurs de suivi (Branchu *et al.*, 2022). Certains projets sont directement dédiés à la prise en compte des sols dans les stratégies d'aménagement des villes (par exemple, projet SUPRA (Schwartz *et al.*, 2022) et projet DESTISOL (Blanchart *et al.*, 2018)). Néanmoins, malgré la diversité de projets sur les sols, et la pluralité de documents méthodologiques relatifs à l'analyse des sols, dont ceux issus de l'ADEME sur la qualité des sols agricoles et forestiers ou encore l'évaluation des fonctions et services rendus par les sols (Calvaruso *et al.*, 2021), les outils existants semblent peu, voire pas du tout connus, par les acteurs de l'aménagement.

L'absence quasi-complète d'étude des sols dans l'application de la séquence ERC ne provient donc pas d'une absence d'outils disponibles. Elle est en fait favorisée par une diffusion limitée de ces outils à destination des acteurs de la séquence et par la difficulté à s'approprier des notions qui sont souvent complexes. Il s'agit donc ici non pas de combler des lacunes scientifiques, mais de développer une réelle ingénierie territoriale.

¹³ https://www.gissol.fr/fiches_pdf/Fiches_RRP_2014.pdf

L'Autorité environnementale a mis en place en juin 2022 un groupe de travail sur « la consommation d'espace », qui rassemble des membres permanents et associés des missions régionales d'autorité environnementale afin de réfléchir à la prise en compte des sols dans les avis sur les projets d'aménagement et outils de planification. Ce groupe de travail pourrait contribuer à essaimer des bonnes pratiques de prise en compte des sols dans la séquence ERC, notamment auprès des pôles environnementaux des DREAL (voir glossaire).

Les processus d'amélioration proposés ci-dessus pourraient plus encore bénéficier à d'autres domaines connexes, où une expertise pédologique est indispensable. Il s'agit par exemple des démarches d'inventaires et de délimitation des zones humides, très largement concernées par la séquence ERC, mais fréquemment découplées de toute notion de fonctionnement hydro-pédologique du paysage; ou encore, des démarches locales d'appréciation des processus de dégradation des sols (érosion, compaction etc.) dans les territoires. Par ailleurs, il est parfois noté des erreurs dans certains inventaires d'habitats - notamment forestiers - qui sont la conséquence d'une insuffisante prise en compte de l'histoire et de la dynamique des formations végétales, et de l'importance excessive accordée à la simple présence des espèces caractéristiques. La prise en compte du sol, qui intègre à la fois l'histoire locale du site, mais aussi son fonctionnement actuel et passé, permettrait souvent d'éviter ces confusions.

4.4. La question de l'échelle territoriale : passer de l'échelle des projets à la planification

Une des principales raisons qui explique le manque de pertinence écologique de certaines pratiques en lien avec l'application de la séquence ERC porte sur l'échelle spatiale considérée, en particulier pour le volet de la compensation. La séquence ERC est un dispositif qui constitue le pilier central du processus d'évaluation environnementale des impacts d'un projet, d'un plan ou d'un programme d'aménagement. Dans la pratique, la séquence est principalement appliquée à l'échelle des projets (Bigard *et al.*, 2017). Pourtant, la prise en compte des réels enjeux écologiques autour de la séquence ERC implique de « dézoomer » afin de l'intégrer dans une réelle stratégie de planification territoriale. La planification permet en effet d'envisager une dynamique des composantes territoriales (écologiques, foncières, etc.), et ainsi de considérer leur trajectoire dans des espace-temps plus pertinents. Par exemple, au lieu de se focaliser sur une espèce impactée dans le cadre d'un projet, la planification devrait intégrer des dynamiques écologiques de cette espèce, et envisager des mesures d'évitement, de réduction et de compensation pertinentes à l'échelle d'un territoire. Une approche territoriale permet également de mieux considérer les impacts cumulés, qui doivent

être pris en compte dans la séquence ERC, et d'envisager des limitations de ces derniers afin de ne pas dépasser des seuils d'irréversibilité.

4. CONCLUSION

La séquence ERC est aujourd'hui une réalité pour tous les aménageurs du territoire, pour qui elle constitue le principal cadre juridique. Dès lors, elle devrait pouvoir prendre en compte toutes les composantes de l'environnement. Cette étude montre que ce n'est pas le cas pour le sol; il nous appartient de faire évoluer ce constat. Pour ce faire, nous préconisons :

- 1) de faire évoluer et de rendre plus lisible le cadre juridique dispersé concernant la protection et la conservation des sols,
- 2) de mieux informer et former tous les acteurs de l'aménagement sur les sols, depuis les maîtres d'ouvrages jusqu'aux régulateurs,
- 3) de proposer des guides techniques clairs et fonctionnels facilitant sa prise en compte par les opérateurs de l'aménagement,
- 4) d'encourager l'élaboration d'une planification moins segmentée et plus intégratrice de nos territoires.

Ces préconisations ont un coût financier, mais le coût de l'inaction sera forcément plus élevé. Celui d'une hypothétique restauration des fonctions des sols, altérées notamment par l'artificialisation, le sera plus encore et s'avère complexe, voire impossible, à traiter *a posteriori*.

Il est donc urgent pour tous les acteurs de l'aménagement du territoire, et pour la société en général, de changer de regard sur le sol. Le sol n'est pas une simple surface mais un volume. Les fonctions et services rendus par les sols doivent être pris en compte, préservés et protégés dans les projets d'aménagement toujours plus nombreux. Et la séquence ERC, principal outil de protection de l'environnement dans l'aménagement du territoire, doit maintenant intégrer cette réalité.

REMERCIEMENTS

Cet article a été initié dans le cadre du CSTI RNEST (<https://rnest.fr/le-comite-scientifique-technique-et-dinnovation/>). Il a bénéficié d'un financement OFB (Office Français de la Biodiversité) pour réaliser l'enquête et l'analyse bibliographique. Nous remercions tous les acteurs de territoire ayant participé à l'enquête.

BIBLIOGRAPHIE

- Andreadakis A., Bigard C., Delille N., Sarrazin F., Schwab T. (2021). Approche standardisée du dimensionnement de la compensation écologique-Guide de mise en œuvre, 149 p. https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/794609/approche-standardisee-du-dimensionnement-de-la-compensation-ecologique-guide-de-mise-en-oeuvre?_lg=fr-FR
- Autorité environnementale (2020). Rapport annuel, 95 p.
- Autorité environnementale (2021). Rapport annuel, 120 p.
- Autorité Environnementale (2023). Rapport annuel, 95 p. https://www.igedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ra-ae_2022_web_dble_cle0f2197.pdf
- Baize D., Girard M.C. (2008). Référentiel Pédologique. Quae Editions, 406 p. https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2017/11/Referentiel_Pedologique_2008.pdf
- Barral S., Guillet F. (2022). Temps de la nature, temps de la procédure. Conflit de temporalités dans le droit de l'environnement, *Droit et Société*, 2022/2 (n° 111), 305-318. <https://doi.org/10.3917/drs1.111.0305>
- Béchet B. (coord.), Le Bissonnais Y. (coord.), Ruas A. (coord.), Aguilera A., André M., Andrieu H., Ay J.-S., Baumont C., Barbe E., Beaudet-Vidal L., Belton-Chevallier L., Berthier E., Billet P., Bonin O., Cavailhès J., Chancibault K., Cohen M., Coisnon T., Colas R., Cornu S., Cortet J., Dablanc L., Darly S., Delolme C., Fack G., Fromin N., Gadal S., Gauvreau B., Géniaux G., Gilli F., Guelton S., Guérois M., Hedde M., Houet T., Humbertclaude S. (expert technique), Jolivet L., Keller C., Le Berre I., Madec P. (expert technique), Mallet C., Marty P., Mering C., Musy M., Oueslati W., Paty S., Polèse M., Pumain D., Puissant A., Riou S., Rodriguez F., Ruban V., Salanié J., Schwartz C., Sotura A., Thébert M., Thévenin T., Thisse J., Vergnès A., Weber C., Wery C., Desrousseaux M. (2017). Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols, Déterminants, impacts et leviers d'action. INRA (France), 609 p. <https://www.inrae.fr/actualites/sols-artificialises-processus-dartificialisation-sols>
- Bezombes L., Gaucherand S., Kerbirou C., Reinert M.E., Spiegelberger T. (2017). Ecological Equivalence Assessment Methods: What Trade-Offs between Operationality, Scientific Basis and Comprehensiveness? *Environmental Management* 60, 216 – 230. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0877-5>
- Bezombes L., Gaucherand S., Spiegelberger T., Gouraud V., Kerbirou C. (2018). A set of organized indicators to conciliate scientific knowledge, offset policies requirements and operational constraints in the context of biodiversity offsets. *Ecological Indicators*, 93, 1244-1252. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.027>
- Bigard C., Regnery B., Blasco F., Thompson J.D. (2017). La prise en compte de la biodiversité dans les études d'impact: Évolutions prometteuses mais lacunaires. *Sciences, Eaux et Territoires, Hors Série* 39, 8 p.
- Billet P. (2023). Protection de sols: un zéro artificialisation (pas très) net, *Energie, Environnement, Infrastructures* n°2, févr. 2023, Focus n°25.
- Billet P., Desrousseaux M. (2021). Pourquoi ne protège-t-on pas les sols? *In Le livre vert, Environnement et économie*, éd. Le Pommier, pp. 138-141.
- Blanchart A., Séré G., Cherel J., Warot G., Stas M., Consalès J.N., Morel J.L., Schwartz C. (2018). Towards an operational methodology to optimize ecosystem services provided by urban soils. *Landscape and Urban Planning* 176: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.03.019>
- Boileau J., Calvet C., Pioch S., Moulhéat S. (2022). Ecological equivalence assessment: the potential of genetic tools, remote sensing and ecological modelling to better apply the mitigation hierarchy. *Journal of Environmental Management*. 305, 114415.
- Branchu P., Marseille F., Béchet B., Bessièrre J.-P., Boithias L., Duvigneau C., Genesco P., Keller C., Lambert M.-L., Laroche B., Le Guern C., Lemot A., Métois R., Moulin J., Néel C., Sheriff R. (2022). MUSE. Intégrer la multifonctionnalité dans les documents d'urbanisme. 184 p. <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/5415-muse-integrer-la-multifonctionnalite-des-sols-dans-les-documents-d-urbanisme.html>
- Calvaruso C., Blanchart A., Bertin S. (2019). Diagnostic de la qualité des sols agricoles et forestiers: indicateurs de suivi et stratégies de déploiement. 80 p. ADEME. <https://librairie.ademe.fr/produire-autrement/290-diagnostic-de-la-qualite-des-sols-agricoles-et-forestiers.html>
- Calvaruso C., Blanchart A., Bertin S., Grand C., Pierart A., Eglin T. (2021). Quels paramètres du sol mesurer pour évaluer les fonctions et les services écosystémiques associés? *Revue de la littérature et sélection de paramètres en ateliers participatifs. Etude et Gestion des Sols*, 28(1), 3-29. https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2020/11/EGS_2021_28_Calvaruso_03-29.pdf
- Calvet C., Napoléone C., Salles J.-M. (2015). The Biodiversity Offsetting Dilemma: Between Economic Rationales and Ecological Dynamics. *Sustainability*, 7, 7357 – 7378.
- Calvet C. (2022). The place of ecological knowledge in policies for ecological neutrality. *In: Do we need to be nostalgic about the past to protect the nature of tomorrow? L. Godet, S. Dufour et A.J. Rollet (Coord.), Iste Editions*, chapter 8, pp. 117-144.
- Conseil Economique Social et Environnemental (2023). Du sol au foncier, des fonctions aux usages, quelle politique foncière? *Journal Officiel de la République Française*. https://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Avis/2023/2023_03_politique_fonciere.pdf
- Devictor V. (2018). Dossier: La fabrication de la compensation écologique: controverses et pratiques – La compensation écologique: fondements épistémiques et reconfigurations technoscientifiques. *Natures Sciences Sociétés*, 26(2), 136-149.
- Díaz S., Settele J., Brondízio E.S., Ngo H.T., Agard J., Arneth A., Balvanera P., Brauman K.A., Butchart S.H.M., Chan K.M.A., Garibaldi L.A., Ichii K., Liu J., Subramanian S.M., Midgley G.F., Miloslavich P., Molnar Z., Obura D., Pfaff A., Polasky S., Purvis A., Razaque J., Reyers B., Chowdhury R.R., Shin Y.-J., Visseren-Hamakers I., Willis K.J., Zayas C.N. (2019). Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, 366(6471), eaax3100.
- Doran J.W., Parkin T.B. (1994) Defining and Assessing Soil Quality. *In: Doran J.W., Coleman D.C., Bezdicek D.F. and Stewart B.A., Eds., Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, Soil Science Society of America Journal, Madison, 3-21. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>
- FAO (2015). Les fonctions du sol. Rome. <https://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/fr/c/294324>
- FAO (2020). State of knowledge of soil biodiversity, Status, Challenges and potentialities. Rome. <https://www.fao.org/policy-support/tools-and-publications/resources-details/en/c/1363310/>
- FAO (2022). Soils for nutrition: state of the art. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc0900en>
- Froger C., Pelfrère A., Volatier J.-L., Roussel H., Marot F., Brunet J.-F., Saby N.P.A., Bispo A. (2023). L'offre du GIS Sol en appui aux questions de santé: les données disponibles et leur utilisation pour les politiques publiques et la recherche, *Etude et Gestion des Sols*, 30, 235-252. https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2023/05/EGS_2023_30_Froger_235-252.pdf
- Gayet G., Baptist F., Baraille L., Caessteker P., Clément J.-C., Gaillard J., Gaucherand S., Isselin-Nondedeu F., Poinot C., Quéfier F., Touroult J., Barnaud G. (2016). Guide de la méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides, Onema, collection Guides et protocoles. 190 p.
- GIBOP Global Inventory of Biodiversity Offset Policies (GIBOP). (2019). International Union for Conservation of Nature. The Biodiversity Consultancy, Durrell Institute of Conservation & Ecology [WWW Document]. <https://portals.iucn.org/offsetpolicy/>
- Godet L., Devictor V. (2018). What Conservation does. *Trends in Ecology and Evolution*, 33 (10), 720-730. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2018.07.004>

- Imbert C., Santorufo L., Ortega C., Jolivet C., Bougon N., Cheviron N., Cluzeau D., Cortet J., Lévêque A., Mougou C., Murat C., Pérès G., Pottier J., Ranjard L., Villenave C., Bispo A. (2021). Le RMQS comme support de suivi de la biodiversité des sols : les programmes passés, présents et futurs. *Etude et Gestion des Sols*, 28(1), 193-206. https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2021/12/EGS_2021_Imbert_193-206.pdf
- IPBES (2019). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Diaz, and H. T. Ngo (editors). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 1148 p. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>
- IUSS Working Group WRB (2022). World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.
- Jaunatre R., Buisson E., Leborgne E., Dutoit T. (2023). Soil fertility and landscape surrounding former arable fields drive the ecological resilience of Mediterranean dry grassland plant communities. *Front. Ecol. Evol.* 11:1148226. doi: 10.3389/fevo.2023.1148222
- Joimel S., Schwartz C., Hedde M., Kiyota S., Krogh P.H., Nahmani J., Pérès G., Vergnes A., Cortet J. (2017). Urban and industrial land-uses have a higher soil biological quality than expected from physico-chemical quality. *Science of the Total Environment* 584-585, 614-621. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.086>
- Levrel H., Guillet F., Lombard-Latune J., Delforge P., Frascaria-Lacoste N. (2018). Application de la séquence « Éviter - Réduire - Compenser » en France : le principe d'additionnalité mis à mal par 5 dérives. *Vertigo*, 18 (2). <https://journals.openedition.org/vertigo/20619>
- Mechin A., Pioch S. (2019). Séquence ERC : comment améliorer l'utilisation des méthodes de dimensionnement de la compensation écologique. *Vertigo* 19(3). <https://doi.org/10.4000/vertigo.27310>
- Moreno-Mateos D., Maris V., Béchet A., Curran M. (2015). The true loss caused by biodiversity offsets. *Biological Conservation* 192, 552-559. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.08.016>
- MEDDE (2013). Lignes directrices nationales sur la séquence « Éviter - Réduire - Compenser » les impacts sur les milieux naturels, Paris, France, Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 230 p. https://territoire-environnement-sante.fr/sites/pnse4/files/fichiers/2021/02/0047_Outils%20op%C3%A9rationnels%20pour%20la%20biodiversit%C3%A9.pdf
- Naturefrance (2018). Artificialisation du territoire métropolitain. <https://naturefrance.fr/indicateurs/artificialisation-du-territoire-metropolitain>. consulté en avril 2023
- Renault P., Cousin I., Gascuel-Oudou C., Antoni V., Bispo A., Bougon N., Desrousseaux M., Feix I., Joassard I., Laville P., Pierart A., Caquet T. (2023). Des propriétés des sols aux indicateurs de la qualité des sols, en appui aux politiques publiques et en réponse aux besoins de la société. *Etude et Gestion des Sols*, 30, 207-221. https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2023/03/EGS_2023_30_Renault_207-222.pdf
- Ruellan A. (2016). Chapitre 3. Le sol et ses fonctions. In: *Des sols et des hommes: Un lien menacé*, pp. 53-68. IRD Éditions. <http://books.openedition.org/irdeditions/8309>
- Santorufu L., Joimel S., Auclerc A., Deremiens J., Grisard G., Hedde M., Nahmani J., Pernin C., Cortet J. (2021). Early colonization of constructed Technosol by microarthropods. *Ecological Engineering* 162, 106174. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106174>
- Schatz E.M., Bovet J., Lieder S., Schroeter-Schlaack C., Strunz S., Marquard E. (2021). Land take in environmental assessments: Recent advances and persisting challenges in selected EU countries, *Land Use Policy*, Vol. 111.
- Schwartz C., Bispo A., Blanchart A., Brunet J.-F., Cambou A., Cannavo P., Consalès J.N., De Fouquet C., Ducommun C., Lattelas C., Le Guern C., Saby N., Sauvaget B., Séré G., Vidal-Beaudet L. (2022). Sols urbains et projets d'aménagement (SUPRA) : de l'échantillonnage des sols urbains à l'outil d'aide à la décision d'affectation des sols. 221 p. <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/6231-sols-urbains-et-projets-d-amenagement-supra.html>
- Truchon H., de Billy V., Bezombes L., Padilla B. (2020). Dimensionnement ex ante de la compensation des atteintes à la biodiversité - État de l'art des approches, méthodes disponibles et pratiques en vigueur, 64 p. <https://professionnels.ofb.fr/fr/doc-comprendre-agir/dimensionnement-ex-ante-compensation-atteintes-biodiversite-etat-lart-approches>
- Walter C., Bispo A., Chenu C., Langlais A., Schwartz C. (2015). Les services écosystémiques des sols : Du concept à sa valorisation. *Cahiers Demeter*, 15, 53-68 (halshs-01137484)
- Weissgerber M., Roturier S., Julliard R., Guillet F. (2019). Biodiversity offsetting: Certainty of the net loss but uncertainty of the net gain. *Biodiversity Conservation*, 237, 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.06.036>

GLOSSAIRE

Artificialisation des sols : altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage (définition retenue par l'article 192 de la LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets - C. urbanisme, art. L. 101-2-1)

DDT(M) : Direction départementale des territoires (et de la mer). Les DDT(M) sont des directions départementales interministérielles, placées sous l'autorité des préfets de département. Elles sont compétentes en matière de politiques liées au développement durable et à l'aménagement au sein des territoires (Ministère de la transformation et de la fonction publique).

DREAL : Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement. Les DREAL sont des services de l'Etat placés sous l'autorité des préfets de région et de département. Elles mettent en œuvre et coordonnent les politiques publiques des Ministères de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires et des Relations avec les collectivités territoriales (Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires).

Fonctions d'un sol : Fonctions écologiques de l'écosystème « sol » qui résultent des interactions entre les processus biotiques et abiotiques du sol qui se déroulent avec ou sans la présence de l'Homme (Calvaruso *et al.*, 2019) sur le diagnostic de la qualité des sols agricoles et forestiers).

MRAe : Mission régionale d'autorité environnementale. Les MRAe sont des formations du CGEDD (Conseil général de l'environnement et de développement durable) devenu IGEDD en 2022 (inspection générale de l'environnement et du développement durable), composées de membres permanents de ce conseil et de membres associés. Elles ont été créées afin de renforcer l'indépendance des décisions et des avis rendus par les autorités environnementales locales sur les plans et programmes. <https://www.mrae.developpement-durable.gouv.fr/les-20-missions-regionales-d-autorite-a1121.html&sa=D&source=docs&ust=1683114865093591&usg=AOvVawOZgkhqQCd7RHgOuBhn8Jn>

3620FB : Office Français de la Biodiversité. Établissement public dédié à la protection et la restauration de la biodiversité en métropole et dans les Outre-mer, sous la tutelle des ministères chargés de l'écologie et de l'agriculture. <https://www.ofb.gouv.fr/>

PLUi : Plan local d'urbanisme intercommunal. Le PLUi est un document d'urbanisme intercommunal qui détermine les conditions d'aménagement et d'utilisation des sols (<https://www.cerema.fr/fr/mots-cles/plan-local-urbanisme-intercommunal-plui>).

Qualité des sols : La qualité des sols est la capacité du sol à fonctionner, au sein de son écosystème, afin de permettre la production biologique, le maintien de la qualité de l'environnement et la préservation de la santé des plantes et des animaux (Doran et Parkin, 1994)

RNEST : Réseau National d'Expertise Scientifique et Technique sur les Sols.

Communauté de recherche sur la gestion des sols, visant à fournir aux décideurs publics et aux usagers des sols des connaissances et des outils opérationnels pour évaluer, surveiller, gérer, voire améliorer la qualité des sols, qu'ils soient naturels, agricoles ou urbains. <https://mest.fr/le-comite-scientifique-technique-et-dinnovation/>

Service écosystémique : La notion de service écosystémique est associée à l'usage des écosystèmes dans l'intérêt des sociétés humaines. Un service écosystémique rendu par les sols est donc un bénéfice direct ou indirect (bien ou service) pour la société tiré du fonctionnement des sols (Calvaruso *et al.*, 2019).

Zéro artificialisation nette (ZAN) : Solde de l'artificialisation et de la renaturation des sols constatées sur un périmètre et sur une période donnés. La renaturation quant à elle, ou désartificialisation, consiste en des actions ou des opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité d'un sol ayant pour effet de transformer un sol artificialisé en un sol non artificialisé (définitions retenues par l'article 192 de la LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets - C. urbanisme, art. L. 101-2-1).

