

Évaluation des services écosystémiques fournis par les sols agricoles en appui à la planification territoriale :

Cas des systèmes prairiaux du territoire de Nantes Saint-Nazaire

M. Fossey^(1,4*), R. Martin⁽²⁾, C. Besse⁽³⁾, C. Von Fisher⁽³⁾, C. Ducommun⁽⁵⁾ et C. Walter^(1*)

- 1) INRAE, Institut Agro, UMR SAS, 35000 Rennes, France
- 2) INRAE, Unité de Recherche sur l'écosystème Prairial (UREP), 63039 Clermont-Ferrand, France
- 3) SCE, Groupe Kéran, 44200 Nantes, France
- 4) IDELE, Institut de l'élevage, 14310 Villers-Bocage, France
- 5) EPHOR, Agrocampus Ouest, 44000 Angers, France

* Auteurs correspondants : maxime.fossey@idele.fr et christian.walter@agrocampus-ouest.fr

RÉSUMÉ

La planification territoriale traduit une vision stratégique d'aménagement en projet de territoire intégrant les enjeux de développement durable. Visant à assurer l'équilibre entre le développement urbain et le bien-être social d'une part, et la préservation des espaces naturels, agricoles et forestiers d'autre part, ce projet structure les paysages, oriente des modes de gestion des écosystèmes les composant et impacte les services écosystémiques qu'ils procurent. Parmi ces écosystèmes, les agroécosystèmes sont au cœur de nombreux projets de territoire et sont largement concernés par les orientations de gestion pouvant être préconisées dans les documents de planification. Soumis à un double enjeu foncier, à la fois d'urbanisation pour le développement et de préservation pour la qualité de l'environnement, la gestion des agroécosystèmes, et notamment des sols agricoles, est reconnue comme un levier majeur pour concilier ce double enjeu. En position d'interface dans les écosystèmes, le sol est le lieu d'interactions dépendant de son occupation et de sa gestion d'une part, et de ses caractéristiques propres d'autre part. Il contribue à la fourniture d'une large gamme de services écosystémiques (SES - services écosystémiques des sols). Cet article vise à analyser le potentiel de prise en compte des SES agricoles dans la démarche de planification territoriale. A partir d'une évaluation biophysique des SES rendus par les agroécosystèmes prairiaux, la prise en compte de ces SES est ensuite illustrée à l'échelle de planification du bassin de vie du Pôle métropolitain de Nantes Saint-Nazaire correspondant au Schéma de Cohérence territoriale (SCoT). Une réflexion est également portée à l'échelle plus locale de l'intercommunalité (PLUM - Plan Local d'Urbanisme Métropolitain de Nantes) et

Comment citer cet article :

Fossey M., Martin R., Besse C., Von Fisher C., Ducommun C. et Walter C., 2021 - Évaluation des services écosystémiques fournis par les sols agricoles en appui à la planification territoriale : cas des systèmes prairiaux du territoire de Nantes Saint-Nazaire *Etude et Gestion des Sols*, 28, 113-142

Comment télécharger cet article :

<http://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-28-numero-1/>

Comment consulter/télécharger tous les articles de la revue EGS :

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

à l'échelle plus large du bassin hydrographique (SAGE - Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau Loire Estuaire). L'ensemble des résultats de cette analyse permet d'évaluer la capacité des sols des agroécosystèmes à fournir des services et de projeter l'évolution de cette capacité en fonction des choix de planification. L'article souligne ainsi l'intérêt d'intégrer les SES agricoles dans le processus de planification territoriale en tant qu'information complémentaire pour arbitrer des choix de planification visant à atteindre l'objectif de développement durable d'un territoire.

Mots-clés

Sol agricole, service écosystémique, système prairial, planification territoriale

SUMMARY

ASSESSING ECOSYSTEM SERVICES DELIVERED BY AGRICULTURAL SOILS IN SUPPORT OF TERRITORIAL PLANNING: Case of grassland systems in the Nantes Saint-Nazaire area

Land planning aims to convert a political project into practical actions of development taking into account sustainable management issues. Aiming to ensure a balance between urban development and human well-being on the one hand, and natural resource conservation at the other hand, these practical actions structure landscapes, guide the management of ecosystems and drive ecosystem services they provide. Among these ecosystems, agricultural systems are involved in many territorial projects and are largely concerned by the management guidelines that can be recommended in planning strategies. The management of agroecosystems, particularly agricultural soils, is recognised as a major lever for reconciling the two issues of urbanisation for development and preservation for environmental quality. As an interface in ecosystems, the soil is the site of interactions that depend on its occupation and management on the one hand, and on its own characteristics on the other. It contributes to the provision of a wide range of ecosystem services (SES - soil ecosystem services). This paper aims to evaluate the potential of considering agricultural SES in territorial planning processes. Based on a biophysical assessment of SES provided by grasslands, the potential for considering these SES is then illustrated at the planning scale of Nantes Saint-Nazaire Metropolitan area corresponding to supra urban development master plan (SCoT - Schéma de Cohérence Territoriale). Consideration is also given to the more local scale of inter-municipality (PLUM - Plan Local d'Urbanisme Métropolitain de Nantes) and to the wider scale of the catchment area (SAGE - Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau Loire Estuaire). Results of this analysis make it possible to assess the capacity of agroecosystem soils to provide services and to project the evolution of this capacity in line with planning choices. This paper thus underlines the interest of integrating agricultural SES into territorial planning processes as complementary information to arbitrate planning choices aimed at achieving the objective of sustainable development of a territory.

Key-words

Agricultural soil, ecosystem service, grassland system, territorial planning

RESUMEN

EVALUACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS PRESTADOS POR LOS SUELOS AGRÍCOLAS EN APOYO A LA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL: Caso de los sistemas pratenses del territorio de Nantes Saint-Nazaire:

La planificación territorial traduce una visión estratégica de ordenación en proyecto de territorio que integra los desafíos de desarrollo sostenible. Destinado a garantizar el equilibrio entre desarrollo urbano y bien-estar social de un lado, y preservación de los espacios naturales, agrícolas y forestales de otro lado, este proyecto estructura los paisajes, orienta modos de gestión de los ecosistemas que los componen y impacta los servicios ecosistémicos que proporcionan. Dentro de estos ecosistemas, los agroecosistemas se encuentran en el centro de numerosos proyectos de territorio y están relacionados con las orientaciones de gestión que pueden ser preconizadas en los documentos de planificación. Sometido a un doble desafío de tenencia de tierra, a la vez de urbanización para el desarrollo y de preservación para la calidad del medio ambiente, se reconoce la gestión de los agroecosistemas y en particular los suelos agrícolas como una palanca mayor para conciliar este doble desafío. En posición de interface en los ecosistemas, el suelo es el lugar de interacciones que dependen de un lado de su ocupación y de su gestión, y de otro lado de sus características propias. Contribuye al suministro de una larga gama de servicios ecosistémicos (SES - servicios ecosistémicos de suelos). Este artículo tiene por objeto analizar el potencial de toma en cuenta de los SES agrícolas en el enfoque de planificación territorial. A partir de una evaluación biofísica de los SES prestados por los agroecosistemas pratenses, la toma en cuenta de estos SES se ilustra luego a escala de la planificación de la cuenca de vida del Polo metropolitano de Nantes Saint-Nazaire que corresponde al Esquema de Coherencia territorial (SCoT). Una reflexión se lleva igualmente a escala más local de la intercomunalidad (PLUM - Plano Local de Urbanismo Metropolitano de Nantes) y a escala más larga de la cuenca hidrográfica (SAGE - Esquema de ordenamiento y de Gestión del Agua Loire Estuario). El conjunto de los resultados de este

análisis permite evaluar la capacidad de los suelos de los agroecosistemas a abastecer servicios y planear la evolución de esta capacidad en función de las opciones de planificación. El papel subraya así el interés de integrar los SES agrícolas en el proceso de planificación que se dedica lograr el objetivo de desarrollo sostenible de un territorio.

Palabras clave

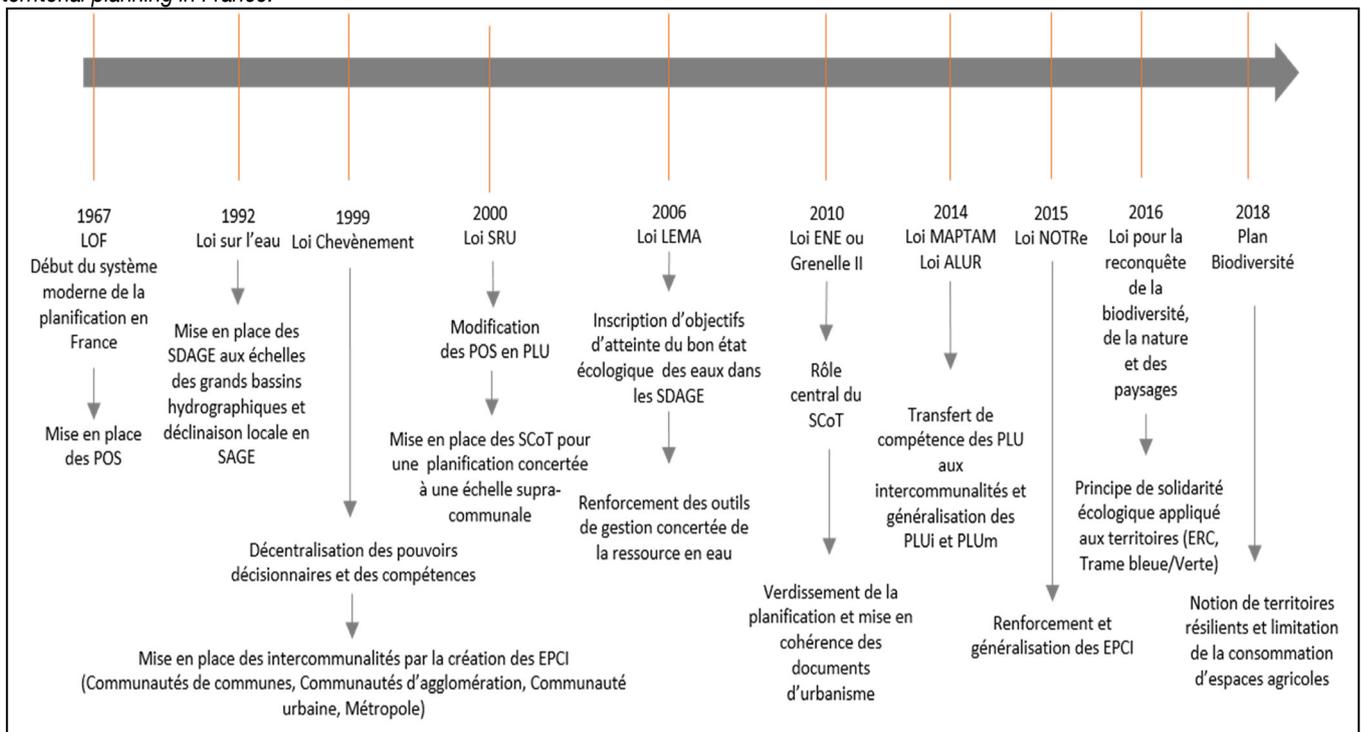
Suelos agrícolas, servicios ecosistémicos, sistemas pratenses, planificación territorial

La prise en compte des enjeux environnementaux et des enjeux sociétaux relatifs aux développements urbain et péri-urbain, via un zonage cohérent des activités, des équipements et des moyens de communication (Motte, 2006), s'effectue différemment selon les territoires et nécessite des approches adaptées pour y faire face. En France, cette approche correspond à la planification territoriale qui traduit une vision stratégique d'aménagement durable d'un territoire définissant « l'organisation dans l'espace des activités humaines et de leur développement futur tout en ménageant les ressources naturelles » (Nadou et Demazière, 2018). L'origine de la planification territoriale et son évolution réglementaire sont détaillées dans l'encadré 1 et la figure 1.

Depuis le concept fondateur des services écosystémiques (Costanza *et al.*, 1997; Daily, 1997), la recherche a récemment mis l'accent sur les relations entre les sols et la fourniture de services écosystémiques (Bouma, 2014; Dominati *et al.*, 2014; Walter *et al.*, 2014; Adhikari et Hartemink, 2016) et en particulier avec les sols des agroécosystèmes (Bommarco *et al.*, 2018; FAO 2018; Ellili *et al.*, 2021). Les changements d'occupation des sols, inhérents aux choix réalisés lors du processus de planification, se font couramment au détriment de terres agricoles (Béchet *et al.*, 2017). Ces changements sont reconnus comme perturbant les processus biophysiques impactant le bien-être humain par le biais de l'altération des services écosystémiques tels que la régulation du climat régional (Findell, 2017; Quesada *et al.*, 2018; Sandor *et al.*, 2018), la régulation de la ressource en eau (Cichota *et al.*,

Figure 1 : Chronologie des principales évolutions du cadre réglementaire portant sur la prise en compte des enjeux environnementaux dans la planification territoriale en France.

Figure 1: Chronology of the main changes in the regulatory framework concerning the consideration of environmental issues in territorial planning in France.



Encadré 1 : L'évolution du contexte réglementaire de la planification territoriale

Framed 1: The evolution of the regulatory context for territorial planning in France

La planification territoriale n'a cessé d'évoluer depuis ses origines en 1967 avec la Loi d'Orientation Foncière (LOF - n° 67-1253) qui marque le début de la planification moderne avec la mise en place du plan d'occupation des sols (POS) (*figure 1*). Cette évolution s'effectue en premier lieu par rapport aux enjeux sociétaux visant la réglementation de l'urbanisme et l'organisation territoriale. Avec le transfert des pouvoirs décisionnaires et des compétences administratives vers des entités plus locales, et notamment vers les établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) (loi n°99 586 - dite Chevènement), le remplacement du POS par le plan local d'urbanisme (PLU) et la mise en place du schéma de cohérence territoriale (SCoT) (loi SRU - n°2000 1208), la prise en compte des objectifs de développement durable s'inscrit désormais dans une démarche de coopération intercommunale (loi MAPTAM - n°2014-58 ; ALUR - n°2014-366 « - NOTRe - n°2015-991). Par ailleurs, cette évolution s'accompagne d'une prise en compte grandissante des enjeux environnementaux visant la protection des ressources naturelles et la résilience des territoires : tout d'abord, avec la définition d'objectifs de gestion des ressources en eau (SDAGE et SAGE) et des milieux aquatiques (loi LEMA - n°2006-1772) et l'instauration de règles d'usage aux échelles des territoires (industries, agricoles, potabilisation) ; puis, avec l'inscription systématique des enjeux environnementaux dans les documents d'urbanisme (loi ENE - n°2010-788 et loi pour la reconquête de la biodiversité - n°2016-1087) qui renforce la cohérence des actions et les outils de concertation entre les intercommunalités et reconnaît les actions de préservation des sols et de renforcement des systèmes agricoles durables comme des solutions favorisant la résilience des territoires.

La planification se doit de formuler et de motiver les choix entre préservation des ressources (sols, biodiversité, eau, etc ...) et développement des territoires (artificialisation et gestion des espaces non bâtis). Elle impacte directement les écosystèmes en place ainsi que les SES associés autant qu'elle est impactée par eux. En effet, la séquence « éviter, réduire, compenser », devenue l'instrument réglementaire majeur pour concilier préservation de l'environnement et développement territorial, ou encore la poursuite de l'objectif de Zéro Artificialisation Nette (ZAN) fixé par le plan biodiversité en 2018, imposent de prévoir des mesures compensatoires. Dès lors, l'évaluation des SES doit permettre d'analyser les effets et les conditions de leur gestion sur les processus biophysiques les soutenant (Ma *et al.*, 2016), tandis que le croisement avec les procédures de planification constitue un support de communication et de compréhension des liens qu'ils représentent entre enjeux environnementaux et sociétaux (Schleyer *et al.*, 2015). Alors que l'intégration des SES dans la planification territoriale est reconnue comme soutenant les objectifs de développement durable (Diaz *et al.*, 2015 ; Posner *et al.*, 2016), elle apparaît également cohérente avec les objectifs de la planification en évaluant la fourniture des SES en fonction d'un besoin dépendant des choix d'affectation des sols fixés lors du processus de planification (Burkhard *et al.*, 2012 ; Albert *et al.*, 2016 ; Cortinovis et Geneletti, 2018).

2016), la préservation des sols (McBratney *et al.*, 2014 ; Borrelli *et al.*, 2016 ; Baude *et al.*, 2019) ou encore le maintien de la biodiversité (Callahan *et al.*, 2003 ; Blüthgen *et al.*, 2012 ; Van Vooren *et al.*, 2018).

Si le concept de services écosystémiques a rapidement acquis une visibilité politique (Bouwma *et al.*, 2017), son opérationnalisation reste difficile (Carmen *et al.*, 2018 ; Jax *et al.*, 2018). Cependant, des travaux récents ont porté leur attention sur la prise en compte des SES (Services Ecosystémiques fournis par les Sols) dans les processus de planification (Breure *et al.*, 2012 ; Drobnik *et al.*, 2018) et plus particulièrement sur leur potentiel d'opérationnalisation au sein des documents de planification (Keller *et al.*, 2012 ; Blanchart *et al.*, 2018 ; Fossey *et al.*, 2020a et b) en tant que leviers de l'action publique en faveur d'un aménagement durable d'un territoire.

Dans ce contexte, cet article vise à analyser le potentiel d'intégration des services écosystémiques relatifs aux sols agricoles - et plus particulièrement dans les systèmes prairiaux - dans les processus de planification territoriale (voir la liste des services concernés en *Annexe A*). Pour ce faire, l'article est structuré comme suit : la *partie 1* présente les échelles courantes

de planification et les documents de planification associés, le territoire d'étude, les données utilisées pour l'évaluation des SES ainsi que la méthodologie d'évaluation. La *partie 2* présente les résultats de l'évaluation des SES en réponse aux hypothèses de recherche suivantes : (i) des liens existent entre les documents de planification et les SES soutenant leur potentiel d'usage en tant qu'information décisionnelle supplémentaire, (ii) la fourniture de SES varie en fonction du sol et de son mode de gestion et (iii) l'utilisation de la modélisation exploratoire pour la recherche d'un optimum foncier en termes de fourniture de SES est pertinente pour l'opérationnalisation du concept de SES dans les processus de planification. Pour illustrer comment les SES peuvent être intégrés dans un contexte concret de mise en œuvre de planification, la *partie 3* discute des choix faits dans le traitement des résultats avec des acteurs locaux de la planification (Pôle métropolitain de Nantes métropole Saint-Nazaire et SCE) en charge de la réflexion et de la conception de la stratégie de planification territoriale (SCoT). Enfin, dans la *partie 4*, une conclusion dressera un bilan des contributions que peut fournir une telle approche dans les processus décisionnels de planification. De plus, des

perspectives de recherche nécessaires à l'amélioration de l'opérationnalisation du concept de SES dans les processus de planification seront émises.

1. MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION ET D'ANALYSE DES SES

1.1 Trois échelles de gouvernance retenues pour la prise en compte des SES dans les documents de planification territoriale

Reposant sur un cadre réglementaire (figure 1) et des documents d'urbanisme dédiés, la planification territoriale fixe les grandes orientations de développement et/ou des règles opérationnelles encadrant la localisation et l'usage des secteurs anthropiques (habitat, industrie, équipements et réseaux de communication) et naturels (zones agricoles, boisées, montagneuses et littorales). Pour cette étude, trois échelles de gouvernance de planification territoriale correspondant à trois documents d'urbanisme compatibles entre eux ont été retenues (figure 2) : une échelle large (grand bassin hydrographique et sous-bassin) incarnée par le SAGE Loire estuaire (3 856 km²) répondant aux objectifs imposés dans la directive-cadre sur

l'eau (DCE - 2000/60/CE) en termes de quantité et de qualité de la ressource en eau ; une échelle intermédiaire, le groupement de communes formant un ou plusieurs EPCI (dont le périmètre est celui du Pôle métropolitain Nantes Saint-Nazaire) illustrée par le SCoT Nantes Saint-Nazaire (1 894 km²) visant à mettre en cohérence les différentes politiques des entités constituant le Pôle métropolitain Nantes Saint-Nazaire en matière d'habitat, de mobilité, de développement économique et d'environnement ; enfin, une échelle locale (métropole) représentée par le PLUm de Nantes métropole (déclinaison du PLU à l'échelle de la métropole de Nantes) (530 km²) fixant les règles d'affectation des sols avec la délimitation des zones urbaines ou à urbaniser et les zones naturelles agricoles et forestières à préserver.

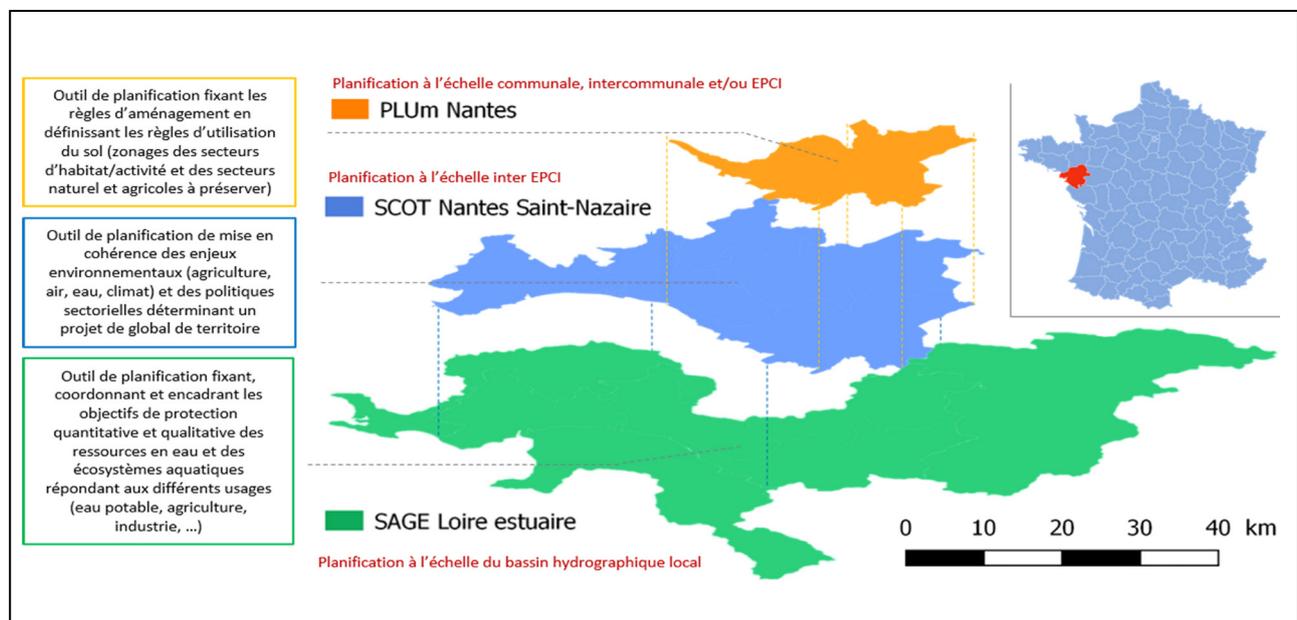
1.2 Le territoire du SCoT de Nantes Saint-Nazaire

Contexte climatique

L'étude est menée dans la région de la Loire en France (figure 2) sur le territoire du SCoT de Nantes Saint-Nazaire. Le climat de la région de la Loire est défini comme un climat océanique (Peel *et al.*, 2007). La température moyenne annuelle est de 12,1 °C avec une moyenne mensuelle maximale en juillet et minimale en février. Par ailleurs, les précipitations annuelles varient entre 486 mm et 898 mm, avec une moyenne de 751 mm,

Figure 2 : Echelles de mise en œuvre et hiérarchisation des documents de planification retenus sur le territoire de Nantes Saint-Nazaire : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE), Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT) et Plan Local d'Urbanisme métropolitain (PLUm).

Figure 2: Implementation scales and prioritisation of the planning documents adopted in the Nantes Saint-Nazaire area: water development and management scheme (SAGE), territorial coherence scheme (SCoT) and metropolitan local urban plan (PLUm).



et les mois de décembre et de juin sont respectivement les plus humides et les plus secs.

Contexte pédologique

Les caractéristiques des sols sont issues des données du Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol) par le biais du programme Inventaire, Gestion et Conservation des Sols de France (IGCS) constituant une représentation spatiale des sols (Arrouays *et al.*, 2004) associée à une base de données au format national, DoneSol, (Grolleau *et al.*, 2004). Pour l'évaluation des SES sur le territoire du SCoT de Nantes Saint-Nazaire, le Référentiel Régional Pédologique (RRP) des Pays de Loire (Agrocampus Ouest, Unité Ephor) au 1 : 250 000 a été utilisé. Sur cette base, 75 unités typologiques de sols (UTS - nomenclature RP 2008) ont été identifiées sur la zone d'étude dont les caractéristiques principales sont données en *Annexe B*. L'épaisseur des sols est comprise entre 25 cm et 230 cm et leur texture varie des classes Argile (AA) à Sables (SS) ou encore Limons sableux (Ls) selon la nomenclature GEPPA (17 classes).

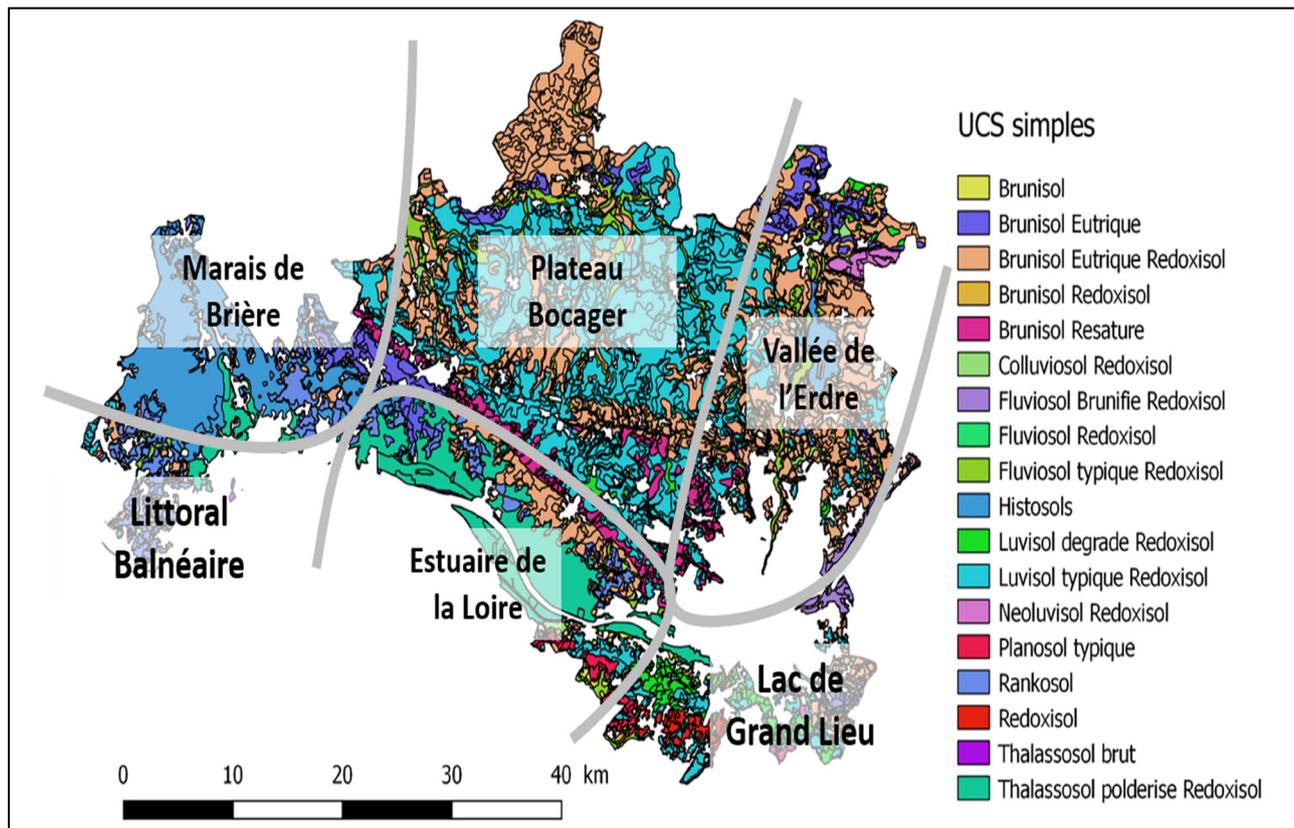
À l'échelle du SCoT de Nantes Saint-Nazaire, on rencontre 42 unités cartographiques de sols (UCS) caractérisées par 18 UTS dominantes qui constituent six grands ensembles de pédopaysages (*figure 3*): les marais de la Brière présentant des sols à dominante d'Histosols, le plateau bocager à dominante de Luvisols typiques-Rédoxisols et de Brunisols eutriques-Rédoxisols, la vallée de l'Erdre à dominante de Brunisols eutriques, le lac de Grand Lieu à dominante de Luvisols, l'estuaire de la Loire à dominante de Thalassosols et le littoral balnéaire à dominante de Rankosols.

Contexte agricole

Le portrait agricole du territoire de Nantes Saint-Nazaire a été établi sur la base de l'analyse croisée des données de Corine Land Cover (2018), des données socio-économiques relatives à l'agriculture en Pays de Loire (Chambre d'agriculture Pays de la Loire, 2018) et du rapport de caractérisation des exploitations agricoles de Nantes à Saint-Nazaire (2013) (*Annexe C*). À l'échelle du territoire du SCoT de Nantes Saint-Nazaire, il ressort

Figure 3 : Grands ensembles paysagers des unités cartographiques de sols (UCS) définies sur le territoire du SCoT de Nantes Saint-Nazaire (source : Référentiel Régional Pédologique des Pays de la Loire). Les UCS sont dénommées selon leur unité typologique de sol (UTS) dominante.

Figure 3: Major landscapes of the soil mapping units (UCS) defined in the Nantes Saint-Nazaire SCoT area (source: Pays de la Loire regional soil reference system). The UCS are named according to their dominant soil typology unit (UTS).



que 69 % du territoire (soit 1 731 km²) sont occupés par des zones agricoles dont 69 % (soit 902 km²) sont gérés en prairies. Les systèmes prairiaux recensés sur le territoire correspondent à des prairies temporaires et des fourrages cultivés (45 % - soit 406 km²) et des prairies permanentes (55 % - soit 496 km²) (tableau 1 et figure 4) dont les trois principaux modes de gestion et de pratiques associées sont : la fauche, le pâturage et une gestion mixte.

1.3 Évaluation biophysique par modélisation et démarche d'analyse des SES

Le modèle PASIM (Pasture Simulation Model - Version 5.3) (Riedo *et al.*, 1998; Vuichard *et al.*, 2007; Graux *et al.*, 2011) est un modèle qui simule le fonctionnement d'un agroécosystème prairial en réponse aux conditions pédoclimatiques et de gestion (Martin *et al.*, 2011). La paramétrisation des variables génériques d'entrée du modèle est basée sur le paramétrage réalisé pour les travaux de Ma *et al.* (2015) à l'échelle européenne. Nous faisons l'hypothèse que ces valeurs correspondent au domaine de validité du modèle et sont adaptées au secteur d'étude. Les variables

sites-spécifiques à renseigner pour le modèle PaSiM, à savoir le climat et le sol, sont décrites dans la partie précédente (§ 1.2) et les caractéristiques de l'agroécosystème prairial sont reportées dans le tableau 1. Les pools de carbone ont été traités au préalable par une mise à l'équilibre du modèle sur une période de 100 ans en bouclant les données météorologiques disponibles pour la période 2005-2015 avant d'être renseignés.

Sur la base des travaux récents de classification des services écosystémiques (CICES 2018, IPBES 2018) et du rapport de l'évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques rendus par les systèmes agricoles (EFESE-EA - Therond *et al.*, 2017), 11 services ont été identifiés et définis (Fossey *et al.*, 2020) (Annexe A) : la séquestration du carbone (SQ), le maintien du stock de carbone (MSC), la régulation des îlots de chaleur (RIC), l'approvisionnement en « Eau Bleue » (AEB), le soutien aux débits d'étiage (SDE), la régulation des crues (RC), la régulation de la qualité de l'eau (RQE), l'atténuation de l'érosion hydrique des sols (AES), l'approvisionnement en nutriments (AN), l'approvisionnement en « Eau Verte » (AEV) et la production de biomasse (PB).

Certains de ces SES ont été estimés de manière saisonnière et portent alors des préfixes - S pour la période dite sèche de

Figure 4 : Territoire du SCoT de Nantes Saint-Nazaire couvert par les agroécosystèmes prairiaux.

Figure 4: Territory of the Nantes Saint-Nazaire SCoT covered by grassland agroecosystems.

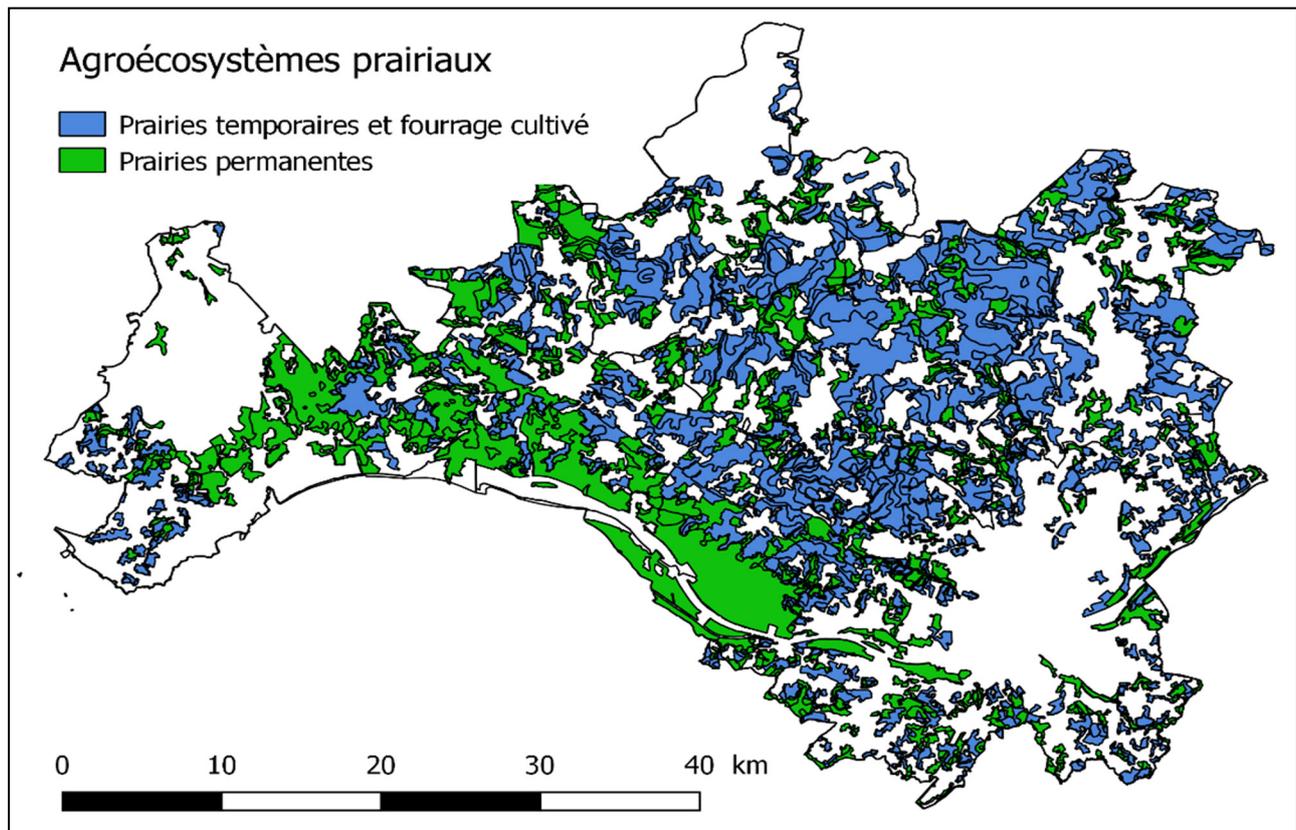


Tableau 1 : Pratiques de gestion recensées sur les prairies permanentes du territoire du SCoT de Nantes Saint-Nazaire.**Table 1:** Management practices identified on the permanent grasslands of the Nantes Saint-Nazaire SCoT territory.

Pratiques de gestion	Fauche exclusive	Pâturage exclusif	Gestion mixte
Surface d'occupation (ha)	1 984	20 336	27 280
Pourcentage d'occupation	4	41	55
Date de fauche (jour Julien)	166	-	145
Date de fertilisation (jour Julien)	60	60	60
Type de fertilisation (Kg N/m ²)	Principalement minéral 0,006	Principalement minéral 0,006	Principalement minéral 0,006
Date de mise en pâture (jour Julien)	-	90	213
Durée de pâturage (jours)	-	214	152
Densité de pâturage (UGB/m ²)	-	1,4	1,4

mai à octobre et - H pour la période dite humide de novembre à avril. Cette distinction porte à 16 le nombre d'indicateurs des 11 SES (Fossey *et al.*, 2020). Pour chacune des 75 unités typologiques de sols identifiées sur le territoire du SCoT de Nantes Saint-Nazaire, trois simulations ont été réalisées sur une période de 30 ans, correspondant aux trois modalités de gestion et de pratiques recensées.

Le cadre opérationnel de traitement des données issues de la modélisation a été développé par Fossey *et al.* (2020) et est illustré schématiquement sur la *figure 5*. L'agroécosystème prairial est défini comme étant un couple d'éléments associant un sol et une pratique de gestion. À l'échelle d'un territoire, l'ensemble des couples comprend les agroécosystèmes observés (couple effectivement observé) et des agroécosystèmes possibles (couple non observé mais plausible). Chacun des couples est ensuite traité par PaSiM afin d'obtenir une évaluation pour chacun des SES. Une hiérarchisation des valeurs par SES est ensuite réalisée. À la suite de cette hiérarchisation, la valeur du SES est normalisée en classes allant de 1 (quintile des plus basses valeurs observées) à 5 (quintile des plus hautes valeurs observées). À l'issue de ce traitement, deux cartes illustratives sont réalisées : une carte des SES actuels, correspondant aux couples effectivement observés, et une carte des sensibilités de réponse des sols aux changements de gestion, correspondant pour un sol donné aux écarts simulés entre les valeurs maximales et minimales du

SES pour ce sol (ces valeurs peuvent être issues de couples effectivement observés et/ou de couples non observés mais plausibles).

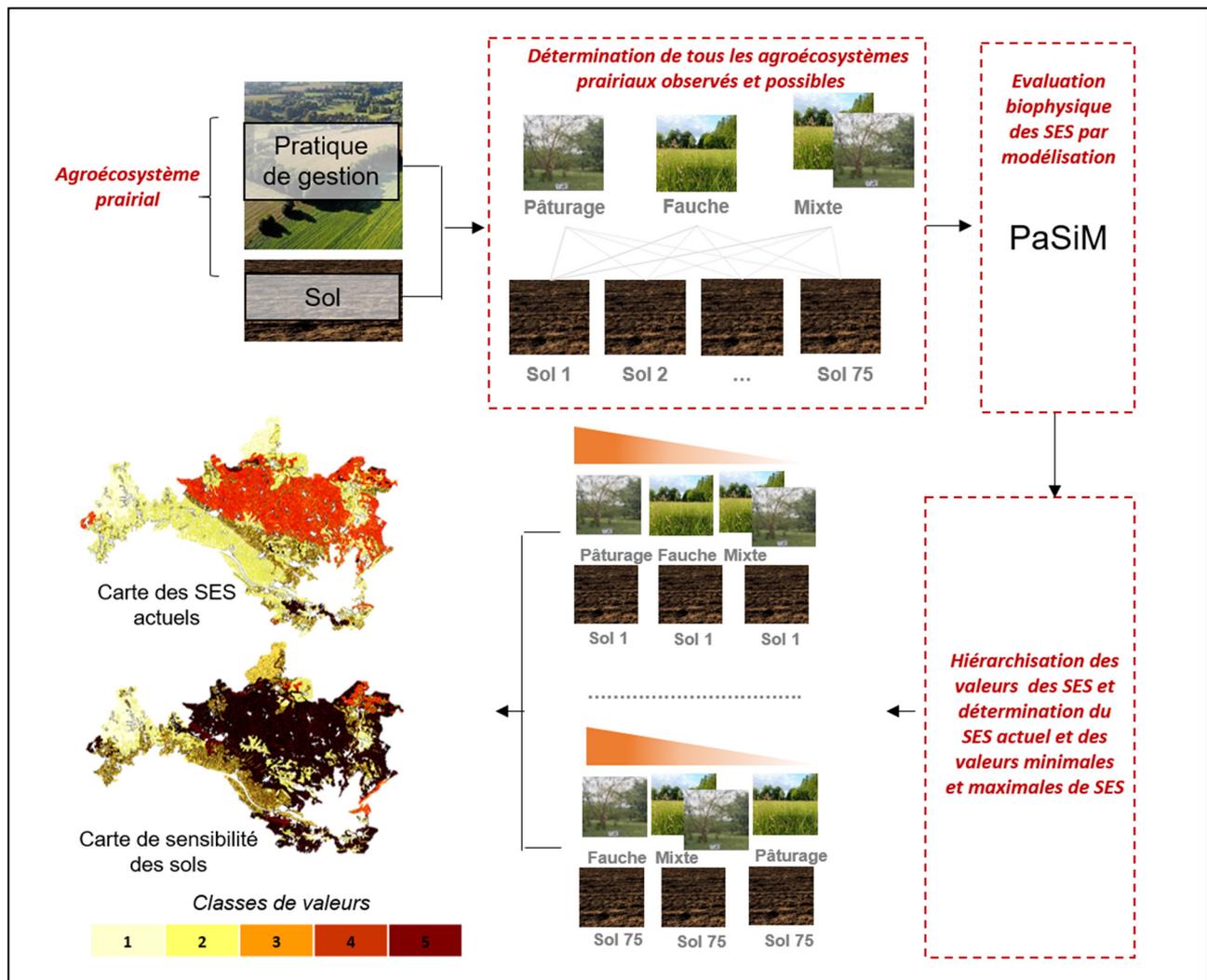
2. RÉSULTATS

2.1 Analyse des relations entre SES et planification territoriale

L'analyse des documents d'objectifs relatifs aux documents de planification, à savoir les projets d'aménagements de développement durable (PADD) pour le PLUm et le SCoT et le plan d'aménagement et de gestion durable (PAGD) pour le SAGE, permet d'établir des liens entre les SES et les échelles de planification (*figure 6*). Les thèmes de planification correspondent à des objectifs spécifiques des différents documents de planification : (i) les préoccupations locales du PLUM intègrent des considérations socio-économiques telles que le zonage du territoire pour le bien vivre ensemble et la viabilité des projets de développement, (ii) les préoccupations régionales du SCoT visent la mise en cohérence des activités (filières, connectivités) avec l'environnement naturel, et (iii) les préoccupations réglementaires aux échelles des bassins hydrographiques du SAGE garantissent la bonne gestion de la

Figure 5 : Schéma de la démarche d'évaluation des SES des agroécosystèmes prairiaux (adapté de Fossey *et al.*, 2020a).

Figure 5: Diagram of the SES assessment approach for grassland agroecosystems (adapted from Fossey *et al.*, 2020a).



ressource en eau et la bonne qualité des milieux aquatiques. L'échelle du SCoT, quant à elle, en partageant des thématiques avec le PLUM (transition écologique et projet agricole) et le SAGE (protéger la ressource en eau) fait le lien entre ces deux échelles de planification.

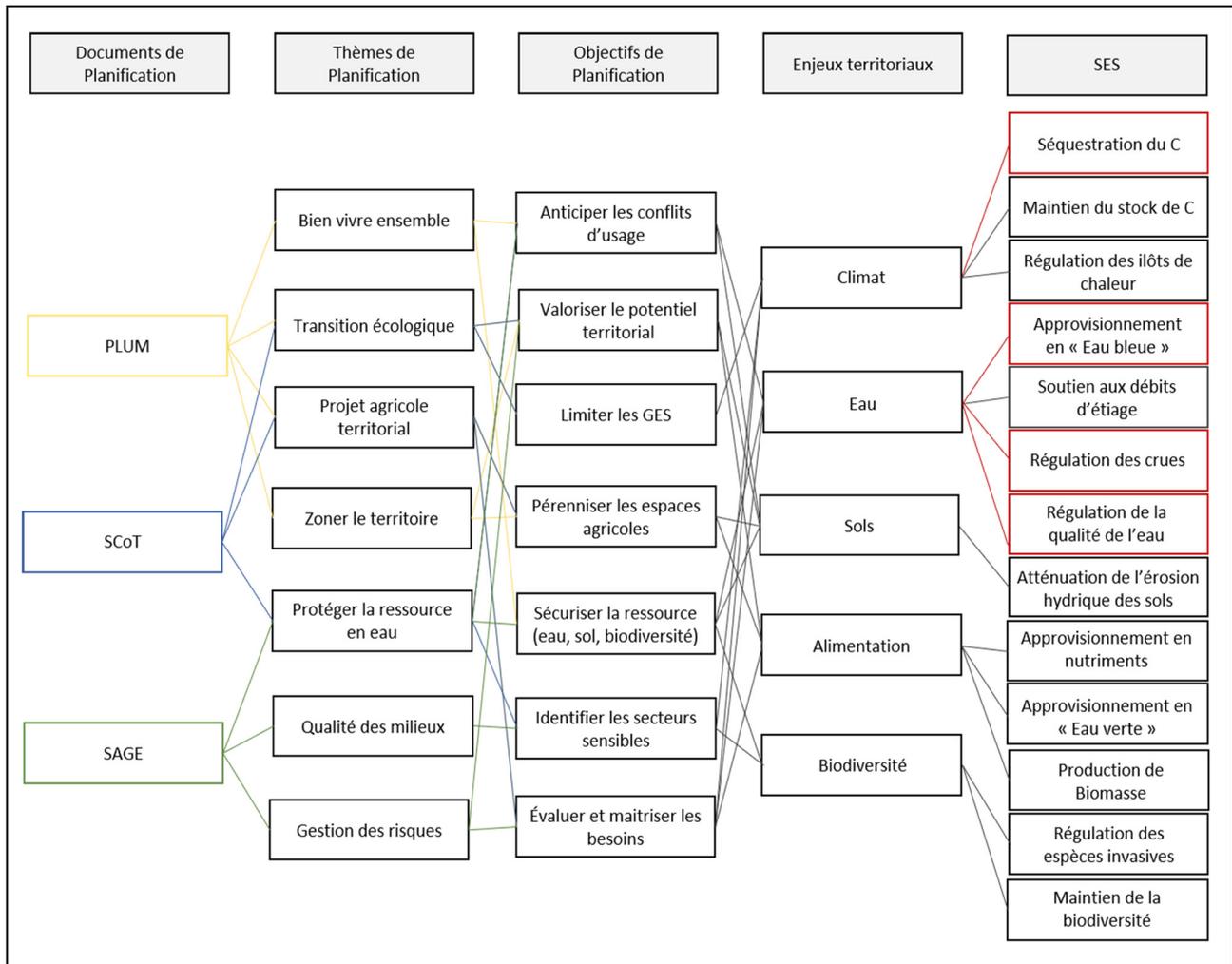
Les objectifs de planification partagés par les trois échelles et relevant des sept thématiques (figure 6) sont : (i) anticiper les conflits d'usage, (ii) valoriser le potentiel territorial, (iii) limiter les GES, (iv) pérenniser les espaces agricoles, (v) sécuriser les ressources eau et sol, (vi) identifier les secteurs sensibles, et (vii) évaluer et maîtriser les besoins. Ces objectifs peuvent être classés par appartenance à des enjeux territoriaux définis dans le cadre de l'évaluation de Fossey *et al.* (2020) à savoir : le climat, l'eau, le sol, l'alimentation et la biodiversité. Ces enjeux font le lien avec les SES considérés dans cette étude pour que

chaque SES ne soit associé qu'à un seul enjeu. Ce lien simple permet d'associer chacun des SES et son indicateur à un enjeu et évite un double comptage (Fu *et al.*, 2011) lors d'évaluations ultérieures.

Cependant, si l'ensemble de ces SES peuvent fournir une information répondant à chacun des enjeux et objectifs de planification à travers l'expression d'indicateurs (Annexe C), les concertations avec les acteurs de la planification font ressortir que seuls quatre SES seraient potentiellement exploitables par le biais de traitement secondaire de l'indicateur de référence. En effet, seuls ces 4 SES permettent l'obtention d'une information quantitative nécessaire à tout projet d'aménagement répondant à une démarche s'inscrivant dans la séquence « éviter, réduire, compenser » (ERC) (MTES, 2017). Cette séquence a pour objectif « d'éviter les atteintes à l'environnement, de réduire celles qui

Figure 6 : Liens entre les documents de planification territoriale aux échelles du PLUM, SCoT et SAGE et les services écosystémiques rendus par les sols. Les services écosystémiques dans les encadrés rouges représentent les services pour lesquels une information est considérée intégrable à l'échelle de planification du PLUM.

Figure 6: Links between territorial planning documents at the scales of PLUM, SCoT and SAGE and the ecosystem services provided by soils. The ecosystem services in the red boxes represent the services for which information is considered integrable at the planning scale of the PLUM.



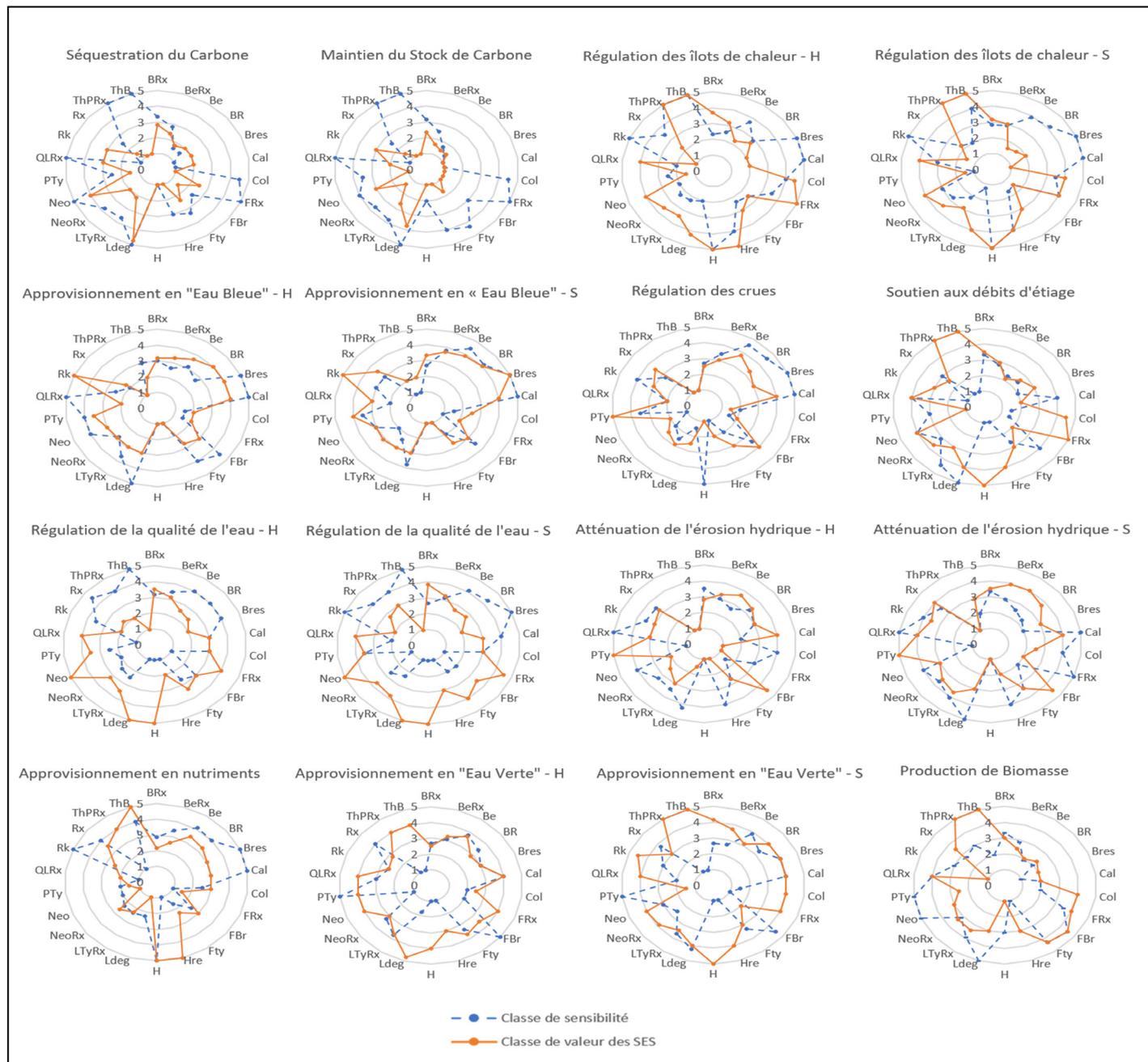
n'ont pu être suffisamment évitées et, si possible, de compenser les effets notables résiduels ». Elle nécessite de mesurer les effets d'un projet afin de planifier les actions de « réhabilitation, de restauration et/ou de création de milieux » et de mettre en place des mesures de gestion conservatoire adaptées. Ces SES, associés aux enjeux « Eau » et « Climat », se rapportent aux objectifs de limitation des GES, de sécurisation de la ressource en eau, d'identification des secteurs sensibles et d'évaluation des besoins. Il s'agit des services d'« Approvisionnement en Eau Bleue - AEB », de « Régulation des crues - RC » et de « Régulation de la qualité de l'eau - RQE » et de « Séquestration du Carbone - SC » (figure 6).

2. 2 Analyse des relations entre SES et types de sols

L'évaluation des SES par modélisation biophysique a permis d'obtenir trois valeurs par SES, correspondant aux trois modalités de gestion des systèmes prairiaux et ce, pour chacune des 75 unités de types de sols représentés sur le territoire. Le traitement des données de sortie du modèle permet d'évaluer et d'analyser (i) la capacité moyenne d'un groupe de sols à fournir un SES et (ii) la sensibilité d'un groupe de sols à un changement de gestion (figure 7). La capacité moyenne de fourniture de SES (dénommée classe de valeurs de SES) est exprimée en classes

Figure 7 : Classes de valeurs et de sensibilité aux modifications de gestion par groupe de sols représenté sur le territoire du SCoT de Nantes Saint-Nazaire et pour chaque SES évalués. La classe de valeurs correspond à la valeur moyenne de fourniture du SES pour un groupe de sols et pour les trois modalités de gestion (de 1 - faible à 5 - fort) et la classe de sensibilité correspond à l'écart entre les valeurs minimale et maximale de fourniture du SES pour un groupe de sols et pour les trois modalités de gestion (de 1 - faible à 5 - fort). Exemple : pour la séquestration du Carbone, le groupe ThR présente une classe de valeur faible (1) avec une sensibilité aux modifications de gestion forte (5).

Figure 7: Classes of values and sensitivity to changes in management for each group of soils represented in the Nantes Saint-Nazaire SCoT territory and for each SES evaluated. The value class corresponds to the average value of SES supply for a group of soils and for the three management methods (from 1 - low to 5 - high) and the sensitivity class corresponds to the difference between the minimum and maximum values of SES supply for a group of soils and for the three management methods (from 1 - low to 5 - high). Example: for carbon sequestration, the ThR group has a low value class (1) with a high sensitivity to management changes (5).



sol augmente en période sèche à l'exception de RIC et des groupes PTy, FBr et Be pour AEV (figure 8). Ces singularités s'expliquent par le facteur limitant qui est la disponibilité en eau sur cette période pour RIC et AES (SES basé sur le potentiel évapotranspiratoire et érosion hydrique des sols) et par les fortes teneurs en sable qui caractérisent les sols cités et limitent ainsi le stockage de l'eau dans les sols sur cette période. Par ailleurs, l'augmentation de la fourniture de RQE s'explique pour partie par la période de fertilisation (tableau 1) qui intervient lors de la période humide, limitant ainsi les transferts azotés lors de la période sèche. Concernant AEB, certains groupes de sols caractérisés par des profondeurs faibles (Bres) ou des fortes teneurs en sable (Rx et PTy) semblent plus contribuer à la production de SES en période sèche, par comparaison avec les autres groupes de sols.

2.3 Les SES en appui à la planification territoriale

Une analyse spécifique des SES dans un contexte territorial donné répond à un besoin émis par l'ensemble des parties prenantes des processus de planification territoriale de traduire les indicateurs d'évaluation des SES en termes d'information décisionnelle complémentaire utilisable pour la gestion durable des territoires.

Une information qualitative générale aux échelles des SCoT et des SAGE

Aux échelles larges (SAGE) et intermédiaire (SCoT) du territoire de Nantes Saint-Nazaire, l'ensemble des résultats permet de hiérarchiser des groupes de sols (regroupement effectué sur la base de la nomenclature du référentiel pédologique des sols (Baize et Girard, 2008 selon leur capacité actuelle à fournir un SES et la variation de réponse attendue en termes de fourniture du SES induite par une modification de gestion de ces sols. L'évaluation de la capacité actuelle d'un sol à fournir un SES est réalisée en moyennant chacune de ses valeurs de SES obtenues par pratique de gestion et pondérées par les surfaces respectives de chacune des UTS composant l'UCS. Par ailleurs, l'évaluation de la réponse des sols en termes de fourniture de SES est réalisée par une double analyse qualitative et quantitative des écarts entre les valeurs de SES calculées pour les trois pratiques de gestion et pour chacun des sols. Ces deux évaluations aboutissent à la réalisation de classes de valeurs et de classes de sensibilité normalisées de 1 (faible) à 5 (fort).

La synthèse de ce traitement permet une hiérarchisation qualitative des sols par comparaison de leurs paramètres respectifs de fourniture de SES (classe de valeurs des SES) et de réponse à une variation de pression de gestion (classe de sensibilité des sols). Quatre catégories de fonctionnalités des

groupes de sols ont été définies afin de localiser les secteurs à enjeux et de vérifier la cohérence avec les actions envisagées afin d'optimiser ces dernières au regard du foncier :

Catégorie 1 : des sols à forte fourniture de SES sans potentiel de gain. Les sols dont la classe de valeur pour un SES est forte (> 3) et dont la classe de sensibilité est faible (< 3) sont définis comme des sols ayant une forte capacité actuelle de fourniture de SES et pour lesquels peu de variations sont attendues à la suite de modifications de gestion. Autrement dit, toute modification issue de choix de planification n'impactera pas significativement la fourniture de SES. Ces sols peu sensibles peuvent donc être gérés de manière à s'adapter au mieux aux besoins.

Catégorie 2 : des sols à forte fourniture de SES avec potentiel de perte. Les sols dont la classe de valeur pour un SES est forte (> 3) et dont la classe de sensibilité est forte (> 3) sont définis comme des sols ayant une forte capacité actuelle de fourniture de SES et pour lesquels de fortes variations sont attendues à la suite de potentielles modifications de gestion. Autrement dit, toute modification de modes de gestion issue de choix de planification est susceptible d'impacter négativement la fourniture de SES. Ces sols assez sensibles doivent donc conserver le mode de gestion le plus adapté à leurs caractéristiques.

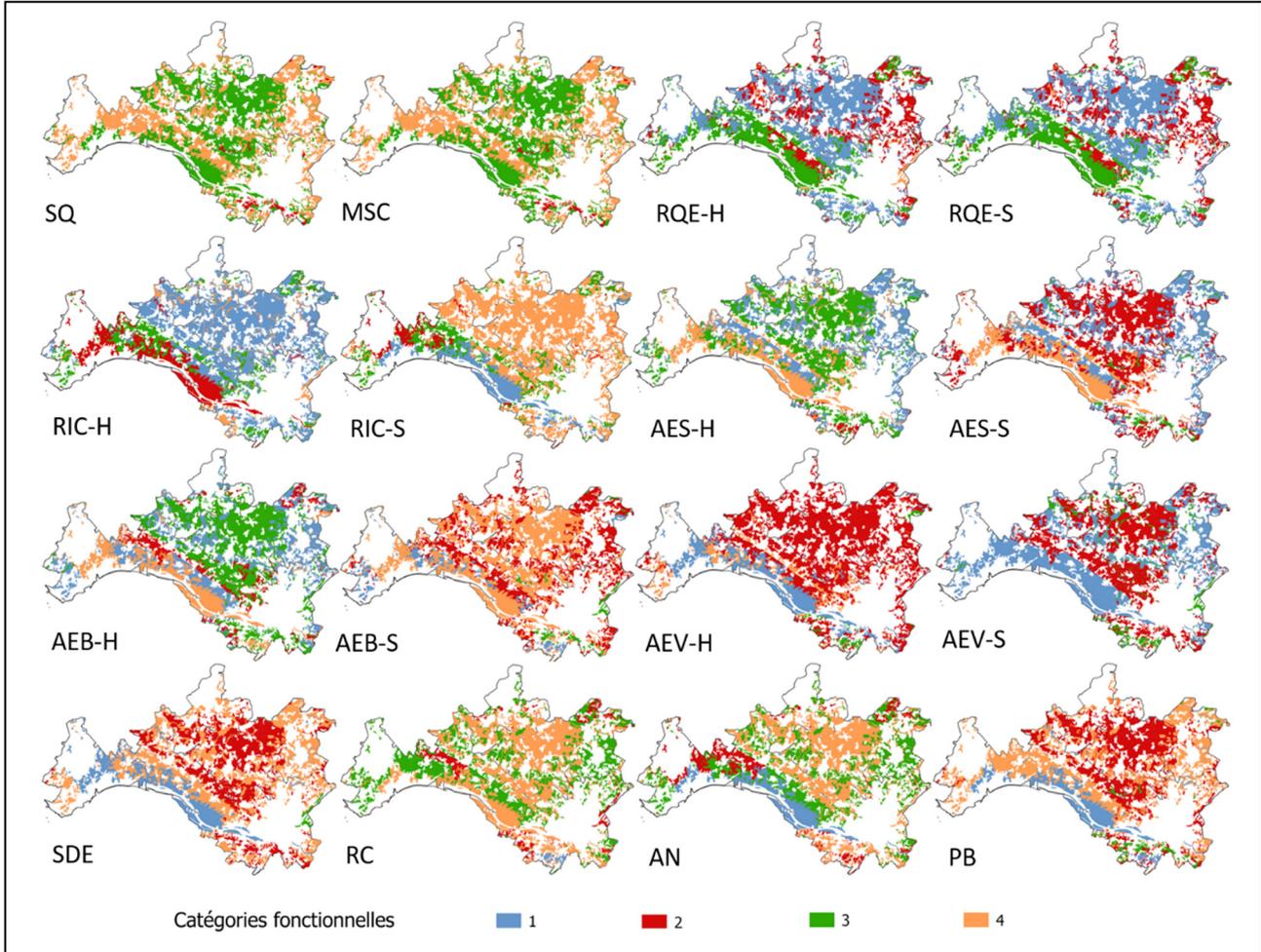
Catégorie 3 : des sols à faible fourniture de SES avec potentiel de gain. Les sols dont la classe de valeur pour un SES est faible (< 3) et dont la classe de sensibilité est forte (> 3) sont définis comme des sols ayant une faible capacité actuelle de fourniture de SES et pour lesquels de fortes variations sont attendues à la suite de potentielles modifications de gestion. Autrement dit, toute modification issue de choix de planification est susceptible d'impacter positivement la fourniture de SES. Ces sols assez sensibles devraient donc être gérés de manière la plus adaptée à leurs caractéristiques.

Catégorie 4 : des sols à faible fourniture de SES sans potentiel de gain. Les sols dont la classe de valeur pour un SES est faible (< 3) et dont la classe de sensibilité est faible (< 3) sont définis comme des sols ayant une faible capacité actuelle de fourniture de SES et pour lesquels peu de variations sont attendues à la suite de modifications de gestion. Autrement dit, toute modification issue de choix de planification n'impactera pas significativement pas la fourniture de SES. Ces sols peu sensibles peuvent donc être gérés de manière à s'adapter au mieux aux besoins.

À l'échelle du SCoT de Nantes Saint-Nazaire, les SES peuvent alors être cartographiés (figure 9) et mis en relation avec les pédopaysages (figure 3). En effet, ces pédopaysages, traduisant des grandes entités géomorphologiques et paysagères, des enjeux et des perspectives de développement propres, peuvent constituer une première échelle d'intégration des SES en ciblant des secteurs d'intérêt reliés aux sols en

Figure 9 : Cartographie des catégories fonctionnelles des groupes de sols à l'échelle du territoire du SCoT de Nantes Saint-Nazaire avec (1) sols non sensibles à haute fourniture de SES - actions modulables, (2) sols sensibles à haute fourniture de SES - actions à éviter, (3) sols sensibles à faible fourniture de SES - actions recommandées et (4) sols non sensibles à faible fourniture de SES - actions modulables.

Figure 9: Mapping of the functional categories of soil groups at the scale of the Nantes Saint-Nazaire SCoT territory with (1) non-sensitive soils with high SES supply - modifiable actions, (2) sensitive soils with high SES supply - actions to be avoided, (3) sensitive soils with low SES supply - recommended actions and (4) non-sensitive soils with low SES supply - modifiable actions.



place. Le plateau bocager illustre de manière assez complète l'interprétation de cette information. En effet, il apparaît comme ayant un potentiel intéressant (catégorie 3) concernant la gestion du carbone (SQ et MSC) et semble important à conserver en l'état (catégorie 2) pour la gestion de l'eau et de l'érosion hydrique avec un risque de dégradation (AEV et AES-S) si des modifications de gestion avaient lieu. Par ailleurs, un potentiel de gain pour la recharge de la nappe (AEB) et la conservation des sols (AEV) pourrait être attendu sur la période humide (H) en modifiant les pratiques de gestion sur les secteurs ne présentant pas d'impact négatif (catégorie 1 et 4) en période sèche (S).

Une information quantitative spécifique à l'échelle du PLUM

Les indicateurs d'évaluation des SES (AEB, RC, RQE et SQ), correspondant aux scénarii d'optimisation de gestion des sols en place, ont été cartographiés et exprimés sur la base des données chiffrées émanant des objectifs à atteindre et inscrits au sein des documents de planification. Ces objectifs chiffrés répondent soit à des demandes réglementaires nationales (DCE) ou des ambitions de qualité environnementale (4p1000), soit à des fins de connaissance du territoire, soit à des besoins techniques aux échelles plus locales des PLUM. Ces données quantitatives seraient utilisées préférentiellement aux échelles

de projet d'aménagement afin d'évaluer les coûts écologiques de ces derniers dans le cadre de la séquence ERC ou encore à des échelles de gestion particulières telles que les aires d'alimentation de captage (AAC). Illustrés à l'échelle de l'AAC du Plessis pas Brunet (04514X0006/F1 - code ADES), les indicateurs issus des SES de SQ, AEB, RQE présentent respectivement les potentiels d'atteinte de l'objectif 4p1000 (figure 10a), de gain en gestion des eaux de ruissellement susceptibles d'augmenter l'aléa inondation (figure 10b) et de contribution à la fourniture en eau pour AEP (figure 10c), d'atteinte ou de dépassement des normes réglementaires de qualité d'eau en périodes humide et sèche (figures 10d et e). À l'échelle de cette AAC, les résultats permettent de localiser les secteurs susceptibles de répondre aux objectifs fixés (objectifs 4/100 et qualité de l'eau de recharge) si des actions de gestion

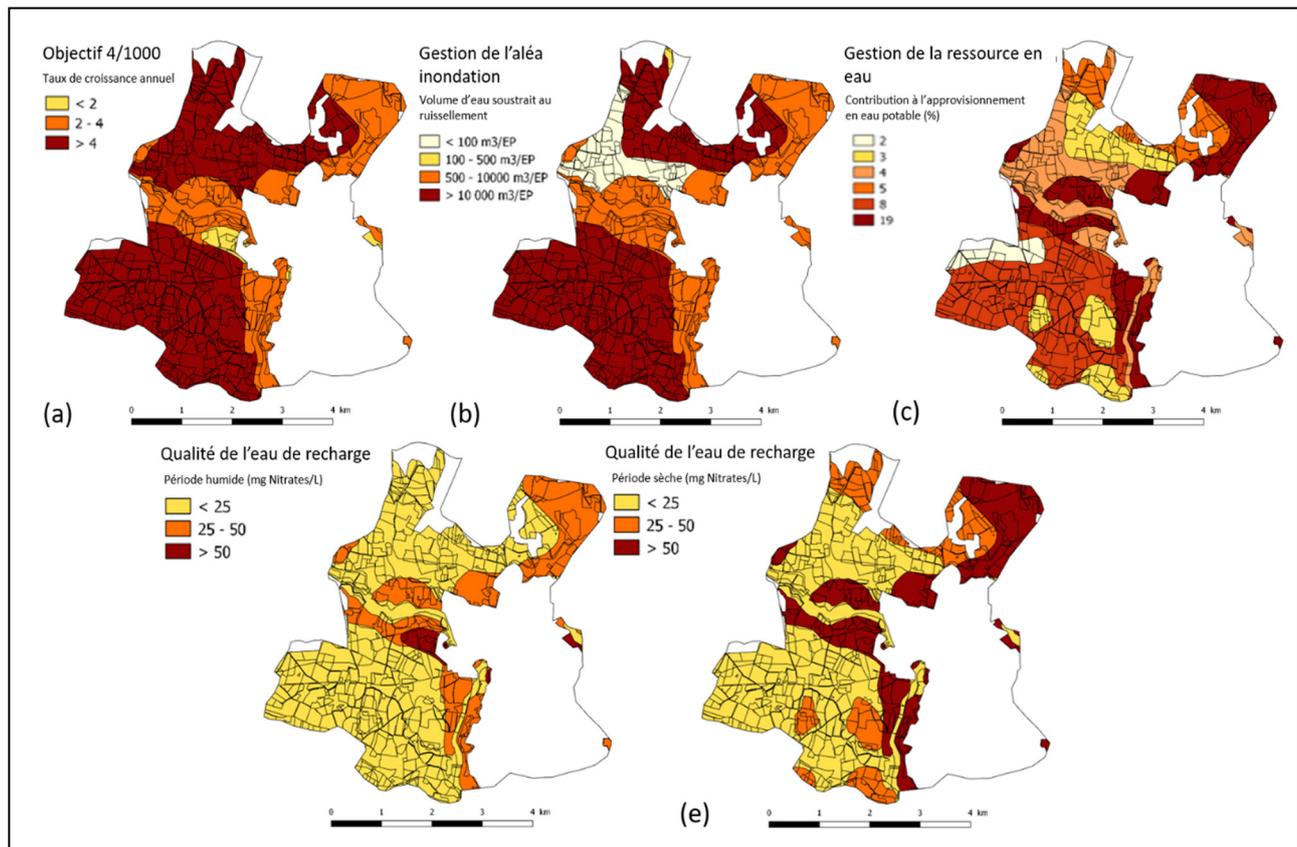
étaient entreprises. Ces résultats permettent également de localiser et de hiérarchiser les secteurs sur lesquels agir pour compenser des projets (gestion de l'aléa inondation) ou pour limiter l'impact sur la ressource en eau en termes de quantité pour assurer la pérennité des installations nécessaires à la population (gestion de la ressource en eau).

3. DISCUSSION

Depuis plusieurs années, les collectivités se voient assumer des compétences environnementales induisant un « verdissement » de la planification. De plus, le renforcement des processus de concertation et de coopération inter-collectivités les pousse à élaborer des stratégies de développement

Figure 10 : Cartographie des potentialités territoriales du SCoT à l'échelle d'un périmètre du captage d'alimentation en eau potable en termes d'atteinte des objectifs de (a) stockage du Carbone dans les sols relatifs au programme 4p1000, (b) diminution de volume d'eau ruisselée pour la gestion des inondations, (c) gestion des conflits d'usage pour la ressource en eau en terme de contribution à la demande en eau potable et (d et e) diminution de l'aléa de pollution diffuse des nappes pour la bonne qualité des eaux souterraines.

Figure 10: Mapping of the territorial potential of the SCoT on the scale of a drinking water supply catchment area in terms of achieving the objectives of (a) carbon storage in soils relating to the 4p1000 programme, (b) reduction in the volume of run-off water for flood management, (c) management of conflicts of use for water resources in terms of contribution to the demand for drinking water, and (d and e) reduction in the risk of non-point source pollution of the aquifers for the good quality of the ground water.



cohérentes à des échelles supra-territoriales tenant compte des objectifs et des contraintes propres à chacune. Ce verdissement et cette mise en cohérence des planifications ouvrent un champ d'intégration favorisant l'élargissement de l'urbanisme aux questions environnementales qui dépassent les considérations locales (organisation spatiale des territoires). Par ailleurs, la littérature scientifique a mis l'accent sur les relations existant entre les sols, la fourniture de services écosystémiques et le bien-être humain. Dans un contexte de planification, ces relations sont fortement dépendantes des territoires et des projets de développement lesquels consomment des sols et notamment des sols agricoles. Là où la recherche interroge sur le concept de services et sur son potentiel d'intégration dans les documents de planification, l'urbanisme tient une position plus opérationnelle. Afin d'intégrer ces données environnementales dans les études d'urbanisme et répondre aux nouvelles demandes réglementaires, des outils d'évaluation de services écosystémiques se développent.

3.1 Une information complémentaire sur les sols s'inscrivant dans le contexte réglementaire existant

La planification territoriale est une recherche permanente du meilleur compromis entre des intérêts et objectifs souvent antagonistes. L'évaluation des incidences des choix possibles, et leur appréciation, constituent ainsi une étape déterminante dans le processus de prise de décision. En l'absence d'arguments factuels et objectifs, certaines incidences risquent d'être sous-évaluées voire négligées lors de cette évaluation.

À l'échelle des documents de planification ou de projets territoriaux, l'analyse des incidences est le plus souvent comparative entre deux territoires ou secteurs de localisation potentielle et est réalisée dans l'objectif d'atteindre le projet de développement dit de « moindre impact environnemental ». Cet objectif répond aux engagements pris par l'Etat français au titre de la mise en œuvre de la directive-cadre sur l'eau (DCE - 2000/60/CE) et impliquant le respect de la séquence « éviter, réduire, compenser » (ERC - MTES, 2017) devenu l'instrument réglementaire majeur de politique publique environnementale visant à concilier développement et préservation de l'environnement. En effet, selon les principes de cette séquence « ERC », trois étapes itératives permettent de minimiser les impacts de développement : (i) éviter les impacts en modifiant ou délocalisant le ou les projets de développement, (ii) réduire les impacts du ou des projets et (iii) compenser les impacts résiduels (Alligand et al. 2018). Les évaluations environnementales des plans et programmes (SAGE - article R122-17 du code de l'environnement) et des documents d'urbanisme (SCoT - articles R141-2 et suivants et PLU et PLUi - articles R151-1 et suivants du code de l'urbanisme) sont des procédures pour lesquelles la séquence ERC s'applique.

Pour rendre les SES « opérationnels » dans le processus de planification territoriale, il est ainsi indispensable de rendre les incidences lisibles et intelligibles au regard des enjeux du territoire tant en termes de développement socio-économique que de préservation environnementale. À ce titre, les indicateurs relatifs aux SES, en hiérarchisant et localisant les impacts inhérents au développement territorial (plans, programmes ou projets d'aménagement) viennent s'inscrire comme une information complémentaire pouvant se justifier dans cette démarche réglementaire appliquée aux évaluations environnementales.

Il résulte du précédent point que le moindre impact sur l'environnement, et donc sur les SES, peut être un argument orientant les choix de planification. D'une part, l'information qualitative proposée permet de comparer les impacts et de justifier le projet de « moindre impact environnemental » répondant ainsi aux deux premiers points de la séquence ERC. D'autre part, l'information quantitative permet de répondre aux besoins de données mesurables nécessaires à la mise en place, le cas échéant, de mesures compensatoires inhérentes au dernier point de la séquence ERC.

3.2 Une intégration des SES encouragée par un contexte politique favorable

Les attentes sociétales en matière de bien-être, de préservation des ressources naturelles et de l'environnement s'affirment de plus en plus nettement au niveau local et se traduisent en volonté politique nationale. Ces attentes supposent notamment de rendre compatibles les besoins de production alimentaire et d'infrastructures nécessaires à l'habitat, aux transports et au développement économique des territoires avec les enjeux de climat, de santé, et de conservation des ressources naturelles. Les espaces et les sols agricoles, en tant que supports d'alimentation et foncier et compartiments naturels de premier ordre en termes de processus écologiques, constituent un levier majeur pour répondre à ces attentes. Ce levier suppose de favoriser des choix maximisant les processus écologiques des sols responsables de la fourniture des SES. Ces attentes et cette reconnaissance des SES comme enjeu clé des politiques publiques de développement des territoires se retrouvent à travers différentes actions gouvernementales.

La convention sur la diversité biologique (CBD, 2010) marque une étape importante de la prise en compte de la biodiversité et des services écosystémiques dans les stratégies gouvernementales. La mise en place de l'IPBES et les « objectifs d'Aichi » en sont des illustrations. Les objectifs 1 et 4 d'Aichi visent à prendre en compte les causes sous-jacentes de pertes de diversité biologique en les intégrant « aux préoccupations gouvernementales » en prenant conscience des mesures pouvant être prises pour « conserver et utiliser de manière durable » la biodiversité et « assurer une production

et une consommation durables en maintenant les incidences de l'utilisation des ressources naturelles dans des limites écologiques sûres ». L'objectif 7 cible particulièrement les espaces agricoles pour une gestion durable. Enfin, les objectifs 11, 14 et 15 visent respectivement à (i) conserver les zones importantes pour les services fournis par les écosystèmes au moyen de réseaux écologiques, (ii) restaurer et sauvegarder les écosystèmes « qui fournissent des services essentiels, en particulier l'eau, et contribuent à la santé, aux moyens de subsistance et au bien-être, et (iii) adapter les écosystèmes pour favoriser leur résilience face au changement climatique. L'ensemble de ces objectifs peut se traduire opérationnellement par l'identification des secteurs d'un territoire répondant au mieux à ces enjeux, à savoir les secteurs maximisant la fourniture de SES sous l'effet de pratiques de gestion adaptées.

Plus récemment, la Loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages (n°2016-1087) inscrit notamment l'objectif de zéro perte nette de biodiversité et le plan biodiversité (MTES, 2018) propose à travers 6 axes stratégiques de renforcer l'utilisation des solutions fondées sur la nature pour contribuer à l'adaptation au changement climatique et favoriser la résilience des territoires (objectif 1.2), limiter la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers pour atteindre l'objectif zéro artificialisation nette (ZAN) (objectif 1.3), faire de l'agriculture une alliée de la biodiversité et accélérer la transition écologique (objectif 2.2) ou encore d'agir pour la préservation de la biodiversité des sols (objectif 3.3). Ces ambitions de zéro perte nette de biodiversité et de ZAN, au-delà du principe de « refaire la ville sur la ville » (renouvellement urbain, réhabilitation de friches) qui s'avère insuffisant au regard de la croissance démographique (France stratégie, 2019), rejoignent la problématique relative à la séquence ERC, à savoir la compensation d'une nouvelle artificialisation des sols agricoles ou naturels en faveur de l'urbanisation par une « désartificialisation » ou renaturation équivalente. Dès lors, une information tant qualitative que quantitative sur les tendances possibles de maximisation des SES, assimilables pour partie aux solutions fondées sur la nature, fournit une base de réflexion pour les besoins de compensation devant répondre aux questions : quoi compenser ? combien compenser ? et où compenser ?

Enfin, devenue l'une des thématiques prioritaires de la nouvelle stratégie française de normalisation, la ville durable se voit munie d'un mode d'emploi par le biais de la norme volontaire de management NF ISO 37101 « Développement durable des communautés » (2016) accompagnée de la norme NF ISO 37120 (2018) recensant les « indicateurs permettant d'orienter et de mesurer les performances des services urbains et de la qualité de vie ». Le guide d'application de la ville durable (NF ISO 37104) intitulé « recommandations pour la mise en œuvre pratique de l'ISO 37101 au plan local » intègre désormais les SES dans l'un des 12 domaines d'action (Biodiversité et

services écosystémiques) proposés aux pouvoirs publics locaux en charge de l'aménagement des territoires. Cet effort de normalisation traduit une confirmation de la reconnaissance croissante des SES comme un enjeu clé des politiques publiques. Leur prise en compte dans la planification territoriale n'est dès lors plus seulement un sujet de recherche, mais bel et bien un facteur qui doit peser dans le choix des orientations et projets d'aménagement. Reposant sur une démarche volontaire de rendre les territoires les plus attractifs possibles, y compris par le biais d'un label « ville durable », cette normalisation, qui s'adresse à toutes collectivités territoriales, participe également à la mise en cohérence des actions, de par une évaluation globale des impacts des projets, de plus en plus réalisées à des échelles intercommunales (SCoT, PLUi et PLUm) et dans le respect du principe d'additionnalité de la séquence ERC.

3.3 Des limites réglementaires, méthodologiques et techniques à lever pour systématiser l'intégration des SES dans la planification territoriale

L'absence de réglementation propre au sol, contrairement à l'eau et l'air, « ressources » toutes deux encadrées par des directives européennes, rend sa prise en compte difficile dans les processus de planification. Dès lors qu'aucune recommandation directe ne concerne les sols, l'intégration d'une information spécifique aux sols, et aux SES par extension, est perçue comme facultative dans une évaluation multicritère déjà complexe répondant à des réglementations spécifiques sur les thèmes de l'eau, de l'air et des déchets. Par ailleurs, les logiques d'aménagement et de développement des territoires sont encore davantage contraintes par des préoccupations conjoncturelles (intérêts économiques et politiques) et structurelles (fonctionnement urbain et péri-urbain et mobilité) que des préoccupations environnementales pouvant nécessiter des coûts supplémentaires non supportables par les collectivités.

Prendre en compte les SES dans la planification (PLU), c'est reconnaître que la fonction des sols ne s'arrête pas à une vocation agricole (A) ou naturelle (N). Le besoin de sensibilisation et de pédagogie auprès des acteurs de l'aménagement est encore nécessaire. Dès lors, les SES doivent permettre d'appréhender de manière claire des résultats en lien avec des enjeux forts et dont les caractéristiques possèdent un référentiel. C'est-à-dire, exprimer par le biais des SES les plus-values obtenues sur des thématiques soumises à réglementation (qualité de l'eau) ou à fort intérêt telles que la gestion quantitative de la ressource en eau (conflit d'usage entre potabilisation et irrigation, inondation), ou la séquestration du carbone. Cette expression se doit également, par souci de pédagogie et d'acceptation de la démarche d'intégration des SES dans la planification, d'identifier les bénéficiaires de ces SES. Au regard des différentes échelles

considérées (SAGE, SCoT et PLU), il est également essentiel d'intégrer les bénéficiaires, qu'ils soient locaux (propriétaires fonciers, porteurs de projets d'aménagement) ou globaux (la société, la planète...).

Enfin, la disponibilité de la donnée « sol » et la résolution spatiale de cette dernière sont importantes à prendre en compte : si la sensibilité d'un grand secteur peut être un argument pour évaluer une cohérence d'actions à l'échelle d'un grand territoire (SAGE) ou privilégier un autre secteur moins sensible (SCoT), la question se pose le plus souvent à l'échelle d'un site à aménager (PLU) pouvant aller de quelques milliers de m² à des dizaines d'hectares. Pour être opérationnelle, l'analyse comparative des SES doit donc permettre d'approcher cette échelle. Néanmoins, pour permettre une discrimination fine aux échelles parcellaires et de projet, il faut disposer d'une information pédologique à une échelle plus fine que celle au 1/250 000 utilisée dans ce travail, information qui n'est pas encore disponible de façon exhaustive sur le territoire français. Cependant, les progrès réalisés en matière de cartographie numérique des sols (Ellili *et al.*, 2019) ou encore la progression de la cartographie des sols de France au 1 : 50 000 (Voltz *et al.*, 2018) devraient permettre de pallier à terme cette limite.

4. CONCLUSION

En prenant comme exemple le territoire du Pôle Métropolitain de Nantes-St Nazaire, cette étude visait à proposer des évaluations des services écosystémiques fournis par les sols pouvant être mobilisées lors de procédures de planification territoriale. La démarche s'est fondée sur une approche de modélisation dynamique simulant l'évolution du sol et du couvert végétal selon les situations pédoclimatiques observées sur le territoire considéré et les scénarii de gestion envisagés. Les sorties de ces modélisations sont mobilisées pour évaluer à la fois l'intensité d'un ensemble de 11 services écosystémiques dans les conditions actuelles et leur sensibilité à des modifications éventuelles. La combinaison de ces indicateurs d'état actuel et de sensibilité permet d'identifier au sein d'un territoire des aires géographiques à fourniture plus ou moins grande de SES et dont la sensibilité invite soit à les préserver, soit à chercher à les accroître ou encore à considérer qu'un aménagement est à moindre impact sur les SES dans tel secteur plutôt que dans tel autre. Ces indicateurs peuvent alors être croisés avec les objectifs de planification territoriale pour évaluer les potentialités du territoire à atteindre ces objectifs selon différents scénarios.

L'analyse des SES s'inscrit comme une information nouvelle dans une évaluation multicritère déjà très complexe dans les études de planification territoriale. Il revient aux décideurs, et aux urbanistes qui les conseillent, de les prendre en compte. Cela suppose un effort important pour rendre facilement opérationnelle cette démarche et permettre son inclusion

dans les études préalables à la planification territoriale. Toutefois, le nouveau guide d'application de la norme ISO 37101 « Développement durable au sein des communautés territoriales » intègre les services écosystémiques dans l'un des 12 domaines d'action (« biodiversité et services écosystémiques ») confirmant la reconnaissance croissante des services écosystémiques comme un enjeu clé des politiques publiques. La prise en compte des SES dans la planification territoriale doit donc bien peser dans le choix des orientations et des projets d'aménagement.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un projet de recherche collaboratif SOILSERV -*Evaluation multi-échelle des services écosystémiques des sols au sein d'agroécosystèmes* - (ANR-16-CE32-0005-01) financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Les auteurs remercient l'US 1106 - INFOSOL (INRAE - Centre National de Ressources sur les Sols) pour la mise à disposition des données du Référentiel Régional Pédologique (RRP) de la région Pays de Loire.

BIBLIOGRAPHIE

- Adhikari K., Hartemink A.E., 2016 - Linking soils to ecosystem services - A global review. *Geoderma* 262:101-111.
- Albert C., Galler C., Hermes J., Neuendorf F., von Haaren C., Lovett A., 2016 - Applying ecosystem services indicators in landscape planning and management: The ES-in-Planning framework. *Ecological Indicators* 61:100-113.
- Alligand G., Hubert S., Legendre T., Millard F., Müller A., 2018 - THEMA Évaluation environnementales - Etude d'aide à la définition des mesures ERC, CGDD, MTES, Paris, [en ligne] URL : <https://www.ecologie-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20%20Guide%20d%E2%80%99aide%20%C3%A0%20la%20d%C3%A9finition%20des%20mesures%20ERC.pdf>, consulté le 06/01/2020.
- Arrouays D., Hardy R., Schnebelen N., Le Bas C., Eimberck M., Grolleau E., Pelletier A., Doux J., Lehmann S., Saby N., King D., Jamagne M., Rat D., Stengel P., 2004 - Le programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols de France. *Etude et Gestion des Sols* 11(3):187-197.
- Baize D., Girard M.C. (Eds). 2008 - Référentiel pédologique, Association française pour l'Etude du Sol. Editions Quae, Savoir faire, 399 p.
- Baude M., Meyer B.C., Schindewolf M., 2019 - Land use change in agricultural landscape causing degradation of soil-based ecosystem services. *Science of the Total Environment* 659:1526-1536.
- Béchet B., Le Bissonnais Y., Ruas A., Desrousseaux M., 2017 - Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols : Détermination, impacts et leviers d'action. IFFSTAR et INRA (France), Rapport, 650 pp.
- Blanchard A., Séré G., Chérel 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.
- Blüthgen N., Dormann C.F., Prati D., Klaus V.H., Kleinebecker T., Hölzel N., Alt F., Boch S., Gockel S., Hemp A., Müller J., Nieschulze J., Renner S.C., Schöning I., Schumacher U., Socher S.A., Wells K., Birkhofer K., Buscot F., Oelmann Y., Rothenwöhrer C., Scherber C., Tschamke T., Weiner C.N., Fischer M., Kalko E.K.V., Linsenmair K.E., Schulze E.D., Weisser W.W., 2012 - A quantitative index of land-use intensity in grasslands: Integrating mowing, grazing and fertilization. *Basic and Applied Ecology* 13:207-220.
- Bommarco R., Vico G., Hallin S. (2018) - "Exploiting ecosystem services in agriculture for increased food security." *Global Food Security* 17: 57-63. doi: 10.1016/j.gfs.2018.04.001.
- Borrelli P., Paustian K., Panagos P., Jones A., Schütt B., Lugato E., 2016 - Effect of good agricultural environment conditions on erosion and soil organic carbon balance: A national case study. *Land Use Policy* 50:408-421.
- Bouma J., 2014 - Soil science contributions towards sustainable development goals and their implementation: linking soil functions with ecosystem services. *Journal of Plant Nutrition and Soil science* 177(2):111-120.
- Bouwma, I., Schleyer, C., Primmer, E., Winkler, K.J., Berry, P., Young, J., *et al.*, 2018 - Adoption of the ecosystem services concept in EU policies. *Ecosystem Services* 29: 213-222. doi: 10.1016/j.ecoser.2017.02.014
- Breure A.M., De Deyn G.B., Dominati E., Eglin T., Hedlund K., Van Orshoven J., *et al.* 2012 - Ecosystem services: a useful concept for soil policy making! *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4(5): 578-585. doi: 10.1016/j.cosust.2012.10.010
- Burkhard B., Kroll F., Nedkov S., Müller F., 2012 - Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators* 21:17-29.
- Callahan J.M.A., Blair J.M., Todd T.C., Kitchen D.J., Whiles M.R., 2003 - Macroinvertebrates in North American tallgrass prairie soils: effects of fire, mowing, and fertilization on density and biomass. *Soil biology and biochemistry* 32:1079-1093.
- Carmen E., Watt A., Carvalho L., Dick J., Garcia-Blanco G., Grizzetti B., Hauck J., Izakovicova Z., Kopperoinen L., Liqueste C., Oede D., Steingröver E., Young J., 2018 - Knowledge needs for the operationalisation of the concept of ecosystem services. *Ecosystem Services* 29:441-451.
- Chambre d'agriculture Pays de la Loire, 2018 - Panorama socio-économique de l'agriculture des Pays de la Loire : Données régionales et spécificités départementales - Chiffres 2016. Terres d'avenir.
- CICES (2018). "The Common International Classification of Ecosystem Services, V5.1." from <https://cices.eu/resources/>. (06/03/2018)
- Cichota R., Vogeler I., Trovole S., Malcolm B., Thomas S., Mike B., 2016 - Describing the effect of grazing on nitrogen leaching in winter forage-ryegrass rotations. *In: Integrated nutrient and water management for sustainable farming. Occasional report n° 29. Fertilizer and lime research centre, Massey University, Palmerston North, New Zealand.*
- Cortinovis C., Geneletti D., 2018 - Ecosystem services in urban plans: What is there, and what is still needed for better decisions. *Land Use Policy* 70:298-312.
- Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., van der Belt M., 1997 - The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387:253.
- Daily G., 1997 - *Nature's Services: societal dependence on natural ecosystems.* Island, Washington, DC.
- Diaz S., Demissew S., Carabias J., Joly C., Lonsdale M., Ash N., *et al.*, 2015 - The IPBES conceptual framework - connecting nature and people. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 14:1-16.
- Dominati E., Mackay A., Green S., Patterson M., 2014 - A soil-change-based methodology for quantification and valuation of ecosystem services from agro-ecosystems: A case study of pastoral agriculture in New Zealand. *Ecological Economics* 100:119-129.
- Drobnik, T., Greiner, L., Keller, A., Grêt-Regamey, A., 2018 - Soil quality indicators - From soil functions to ecosystem services. *Ecological Indicators* 94(Part1): 151-169. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.06.052
- Ellili Y., 2019 - Évaluation biophysique des services écosystémiques des sols cultivés - Adaptation de l'information pédologique pour la modélisation dynamique du fonctionnement des sols. Thèse Agrocampus Ouest, 270 p., thèse N° 2019-21_D-87
- Ellili Bargaoui Y., Walter C., Michot D., Saby N., Vincent S., Lemerrier B. 2019 - Validation of digital maps derived from spatial disaggregation of legacy soil maps. *Geoderma*, 356, pp.
- Ellili-Bargaoui Y., Walter C., Lemerrier B., Michot, D. 2021 - Assessment of six soil ecosystem services by coupling simulation modelling and field measurement of soil properties, *Ecological Indicators*, Volume 121, 2021, 107211, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107211.
- FAO, 2018 - *The future of food and agriculture - Alternative pathways to 2050.* Rome. 224 p.
- Findell K.L., Berg A., Gentine P., Krasting J.P., Lintner B.R., Malyshev S., Santanello J.A., Shevliakova E., 2017 - The impact of anthropogenic land use and land cover change on regional climate extremes. *Nature Communications* 8:989. doi:10.1038/s41467-017-01038-w.
- Fossey M., Angers D.A., Bustany C., Cudennec C., Durand P., Gascuel-Odou C., Jaffrezic A., Peres G., Besse C., Walter C., 2020a - A Framework to consider soil ecosystem services in territorial planning. *Frontiers Environmental Science* 8 :28. Doi:10.3389/fenvs.2020.00028
- Fossey M., Besse C., Von Fischer C., Walter C. 2020b - Un outil pour prendre en compte les services écosystémiques des sols. *Diagonal*, 210, 20-21.
- France stratégie - 2019 - Objectif « Zéro artificialisation nette » : quels leviers pour protéger les sols ? Fosse J., Belaunde J., Dégremont M. et Grémillet A. - Rapport au ministre de la Transition écologique et solidaire, au ministre de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales et au ministre chargé de la ville et du Logement, Rapport, 54 pp.

- Fu B.-J., Su C.-H., Wei Y.-P., Willet I.R., Lü Y.-H., Liu G.-H., 2011 - Double counting in ecosystem services valuation: causes and countermeasures. *Ecological Research* 26(1): 1-14.
- Graux A.I., Gaurut M., Agabriel J., Baumont R., Delagarde R., Delaby L., Soussana J.-F., 2011 - Development of the Pasture Simulation Model for assessing livestock production under climate change. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 144(1) : 69-91.
- Grolleau E., Bargeot L., Chafchafi A., Hardy R., Doux J., Beaudou A., Le Martret H., Lacassin J.-C., Fort J.-L., Falipou P., Arrouays D., 2004 - Le système d'information national sur les données pédologiques spatialisées : DONESOL et les outils associés. *Etude et Gestion des Sols* 11(3):255-269.
- IPBES (2018). "Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services." Retrieved last accessed 05 april 2018, from <https://www.ipbes.net/outcomes>.
- Jax K., Furman E., Saarikoski H., Barton D.N., Delbaere B., Dick J., Duke G., Görg C., Gomez-Baggethun E., Harrison P.A., Maes J., Perez-Soba M., Saarela S.R., Turkelboom F., van Dijk J., Watt A.D., 2018 - Handling a messy world: Lessons learned when trying to make the ecosystem services concept operational. *Ecosystem Services* 29:415-427.
- Keller C., Lambert-Habib M.L., Robert S., Ambrosi J.P., Rabot E., 2012 - Méthodologie pour la prise en compte des sols dans les documents d'urbanisme : application à deux communes du bassin minier de Provence, Sud-Ouest européen, 33 I 2012, 11-24.
- Ma S., Lardy R., Graux A.I., Ben Touhami H., Klumpp K., Martin R., Bellocchi G., 2015 - Regional-scale analysis of carbon and water cycles on management grasslands systems. *Environmental Modelling and Software* 72:356-371.
- Ma S., Duggan J.M., Eichelberger B.A., McNally B.W., Foster J.R., Pepi E., Conte M.N., Daily G.C., Ziv G., 2016 - Valuation of ecosystem services to inform management of multiple-use landscapes. *Ecosystem Services* 19:6-18.
- Martin R., Gaurut M., Carrere P., Graux A.I., Drouet J.L., Fiorelli J.L., Blanfort V., Capitaine M., Duret S., Gabrielle B., Cellier P., Soussana J.F., 2011 - Des modèles pour comprendre la réponse des écosystèmes prairiaux au changement climatique. *Innovations Agronomiques* 12:97-108.
- McBratney A., Field D.J., Koch A., 2014 - The dimension of soil security. *Geoderma* 213:203-213.
- MTES - Ministère de la transition écologique et solidaire, 2018 - [en ligne] URL <https://www.ecologie-solidaire.gouv.fr/plan-biodiversite>, consulté le 07/01/2020.
- MTES - Ministère de la transition écologique et solidaire, 2017 - La séquence « éviter, réduire et compenser » : un dispositif consolidé. Collection Théma, 4 pp.
- Motte A., 2006 - La notion de planification stratégique spatialisée (Strategic Spatial Planning) en Europe (1995-2005). Collection Recherches du PUCA, Paris.
- Nadou F., Demazière C., 2018 - L'aménagement à la rencontre des proximités territoriales: Application à la planification spatiale et à la coopération intercommunale en France. *Revue d'Economie Régionale et Urbaine* 5-6:1235-1260.
- Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A., 2007 - Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union*, 2007, 11(5):1633-1644.
- Posner S., Getz C., Ricketts T., 2016 - Evaluating the impact of ecosystem service assessments on decision-makers. *Environmental Science and Policy* 64:30-37.
- Quesada B., Arneth A., Robertson E., de Noblet-Ducoudre N., 2018 - Potential strong contribution of future anthropogenic land-use and land-cover change to the terrestrial carbon cycle. *Environmental Research Letters* 13(6). doi:10.1088/1748-9326/aac4c3.
- Riedo M., Grub A., Rosset M., Fuhrer J., 1998 - A pasture simulation model for dry matter production and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy. *Ecological Modelling* 105:141-183.
- Rollinski S., Müller C., Heinke J., Weindl I., Biewald A., Bodirsky B.L., Bondeau A., Boons-Prins E.R., Bouwman A.F., Leffelaar P.A., te Roller J.A., Schaphoff S., Thonicke K., 2018 - Modeling vegetation and carbon dynamics of managed grasslands at the global scale with LPJmL 3.6. *Geoscientific Model development* 11:429-451.
- Sandor R., Ehrhardt F., Brilli L., Carozzi M., Recous S. et al., 2018 - The use of biogeochemical models to evaluate mitigation of greenhouse gas emissions from management grasslands. *Science of the Total Environment* 642:292-306.
- Schleyer C., Görg C., Hauck J., Winkler K.J., 2015 - Opportunities and challenges for mainstreaming the ecosystem services concept in the multi-level policy-making within the EU. *Ecosystem Services* 16:174-181.
- Steinfeld H., Gerber P., Wassenaar T., Castel V., Rosales M., de Haan C., 2006 - *Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options*, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- Therond O., Tichit M., Tibi A., Accatino F., Biju-Duval L., Bockstaller C., et al., 2017 - Volet "écosystèmes agricoles" de l'Evaluation Française des Ecosystèmes et des Services Ecosystémiques. Rapport d'étude, INRA (France), 966 pp. (<https://prodirna.inra.fr/record/432343>)
- Van Vooren L., Reubens B., Broekx B., Reheul K., Verheyen K., 2018 - Assessing the impact of grassland management extensification in temperate areas on multiple ecosystem services and biodiversity. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 267:201-212.
- Voltz M., Arrouays D., Bispo A., Lagacherie P., Laroche B., Lemerrier B., Richerde-Forges A.C., Sauter J., Schnebelen N., 2018 - La cartographie des sols en France : Etat des lieux et perspectives. INRA, France, 112 pages
- Vuichard N., Ciais P., Viovy N., Calanca P., Soussana J.F., 2007 - Estimating the greenhouse gas fluxes of European grasslands with a process-based model: 2. Simulations at the continental level. *Global Biogeochemical Cycles* 21, GB1005, doi:10.1029/2005GB002612.
- Walter C., Bispo A., Chenu C., Langlais A., Schwartz C., 2014 - Les services écosystémiques des sols : du concept à son évaluation. *Cahiers Demeter n° 15, Agriculture et Foncier*, 51-68. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01137484>

Annexe A :

Définition des indicateurs des services écosystémiques des sols (SES) dérivés des variables de sorties du modèle PASIM.

Annex A: Definition of soil ecosystem service (SES) indicators derived from PASIM model output variables.

SES	Code	Variables de sorties du modèle	Code et unités de la variable	Définition de l'indicateur dérivé des variables de sorties du modèle	Expression	Unités
Séquestration du Carbone	SQ	Carbone organique total du sol	COS Kg C/m ²	Evaluation des deltas journaliers de COS sur la période de simulation	$SQ = \left(\sum_{a=1}^{30} \sum_{j=1}^{365} (COS_{t+1} - COS_t) \right) / 30$	Kg C/m ² /an
Maintien du stock de Carbone	MSC	Carbone organique total du sol	COS Kg C/m ²	Evaluation de la différence de stock de C sur la période de simulation	$MSC = COS_{j:365,a:30} - COS_{j:1,a:1}$	Kg C/m ²
Régulation des îlots de chaleur ¹	RIC	Flux de chaleur latente	FC W/m ²	Evaluation de l'énergie consommée par le système	$RIC = - \left(\sum_{a=1}^{30} \sum_{j=1}^{365} FC / 30 \right)$	W/m ² /an
Approvisionnement en « eau bleue » ¹	AEB	Drainage profond	DP mm/j	Evaluation de la quantité d'eau drainée en profondeur	$AEB = \left(\sum_{a=1}^{30} \sum_{j=1}^{365} DP \right) / 30$	mm eau/an
Soutien aux débits d'étiage	SDE	Teneur en eau du sol	TES m ³ /m ³	Evaluation de la teneur en eau du sol sur la période sèche	$SDE = \overline{TES_{a=1,m=mai}^{30 \text{ octobre}}}$	m ³ /m ³
Régulation des crues	RC	Teneur en eau du sol	TES m ³ /m ³	Evaluation de la teneur en eau du sol sur la période humide	$RC = 1 - \left(TES_{a=1,m=novembre}^{30 \text{ avril}} \right)$	m ³ /m ³

SES	Code	Variables de sorties du modèle	Code et unités de la variable	Définition de l'indicateur dérivé des variables de sorties du modèle	Expression	Unités
Régulation de la qualité de l'eau ¹	RQE	Quantité de N lessivé	NL Kg N/m ²	Evaluation de la quantité de N lessivé	$RQE = \max \left(\frac{\sum_{a=1}^{30} \sum_{j=1}^{365} NL}{30} - \left(\frac{\sum_{a=1}^{30} \sum_{j=1}^{365} NL}{30} \right)_{sol,i} \right)$	Kg N/m ² /an
Atténuation de l'érosion hydrique des sols ¹	AES	Teneur en eau du sol	TES m ³ /m ³	Evaluation du nombre de jours favorables au maintien des sols	$AES = 365 - \left(\sum_{a=1}^{30} \sum_{j=1}^{365} \text{jours}^{TES > 70\% \theta_{sat}, P > 0} / 30 \right)$	Nb jours/an
Approvisionnement en nutriments	AN	Minéralisation du sol et Teneur en N des végétaux	MNS/N/Veg Kg N/m ²	Evaluation du N du sol disponible pour les végétaux	$AN = \left(\frac{MNS_{a=1, j=1}^{30, 365}}{NVE_{a=1, j=1}^{30, 365}} \right) \times 100$	%
Approvisionnement en « eau verte » ¹	AEV	Demande transpiratoire des végétaux et teneur en eau du sol	DTrans/TES mm eau/j et m ³ /m ³	Evaluation de la part d'eau du sol disponible pour les végétaux	$AEV = \left(\frac{TES_{a=1, j=1}^{30, 365} \times \text{épaisseur}_{sol}}{\sum_{a=1}^{30} \sum_{j=1}^{365} DTrans} \right) \times 100$	%
Production en biomasse	PB	Production primaire nette	PPN Kg C/m ²	Evaluation de la quantité de biomasse produite	$PB = \left(\sum_{a=1}^{30} \sum_{j=1}^{365} PPN \right) / 30$	Kg C/m ² /an

1) Pour ces SES, l'indicateur a été évalué pour les périodes spécifiques dites « humide », de novembre à avril et « sèche », de mai à octobre

Annexe B :
Principales caractéristiques des sols couvrant le territoire du SCoT de Nantes Saint-Nazaire utilisées pour l'évaluation biophysique des services écosystémiques.

Annex B. Main soil characteristics covering the territory of the Nantes Saint-Nazaire SCoT used for the biophysical evaluation of ecosystem services.

Groupe de sols	ID - Sols	Nom Sols - RP 2008	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	Drainage	MO (g/Kg)	Profondeur (mm)
Brunisol-Rédoxisol	24	BRUNISOL - REDOXISOL leptique limon argilo-sableux, issu de schiste gréseux paléozoïque altéré	41	34	25	favorable	15.3	720
	129	BRUNISOL - REDOXISOL surredoxisol, sable argilo-limoneux, moyennement caillouteux, issu de dépôts de pente.	62	24	14	faible	9.5	550
	152	BRUNISOL - REDOXISOL leptique surredoxisol limon sablo-argileux issu de micaschistes sur versant	27	54	19	favorable	8.0	950
	191	BRUNISOL - REDOXISOL leptique, issus d'arène granitique en position de pente faible ou replat	46	39	15	faible	8.6	1200
	225	BRUNISOL - REDOXISOL leptique (surredoxisol) limon sablo-argileux très épais sur plateau	40	36	24	excessif	11.1	1400
Brunisol Eutrique-Rédoxisol	26	BRUNISOL EUTRIQUE - REDOXISOL luviue surredoxisol limon sablo-argileux à limon argilo-sableux	62	22	16	favorable	4.1	850
	38	BRUNISOL EUTRIQUE - REDOXISOL surredoxisol limon argilo-sableux issus d'altérite de schiste et grès	39	31	30	faible	7.9	1100
	40	BRUNISOL EUTRIQUE - REDOXISOL leptique sable argilo-limoneux, issus d'altérite de schiste ou grès	53	27	20	favorable	28.7	1000
BeRx	57	BRUNISOL EUTRIQUE - REDOXISOL limon sablo-argileux, issu de schiste briovérien altéré	20	58	22	faible	11.4	900
	113	BRUNISOL EUTRIQUE - REDOXISOL sable limoneux issu de sable pliocène	56	29	15	favorable	16.0	1000
	116	BRUNISOL EUTRIQUE-REDOXISOL surredoxisol Sable argilo-limoneux, moyennement gravelo-caillouteux	47	27	26	faible	13.3	1000
	124	BRUNISOL EUTRIQUE - REDOXISOL surredoxisol limon sablo-argileux, issu de limons éoliens remaniés	44	38	18	faible	7.9	700

Groupe de sols	ID - Sols	Nom Sols - RP 2008	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	Drainage	MO (g/ Kg)	Profondeur (mm)
Brunisol Eutrique-Rédoxisol	137	BRUNISOL EUTRIQUE - REDOXISOL, issu de schiste briovérien phylliteux altéré, en position de replat	47	32	21	favorable	6.4	800
	-	BRUNISOL EUTRIQUE - REDOXISOL sable argilo-limoneux, issus de gneiss et résidus sableux.	56	22	22	faible	6.0	1000
	BeRx	BRUNISOL EUTRIQUE-REDOXISOL lithique surrédoxisol limon sablo-argileux caillouteux colluvionné	54	28	18	excessif	8.8	1000
	211	BRUNISOL EUTRIQUE-REDOXISOL leptique surrédoxisol limon sablo-argileux	52	28	20	modéré	7.2	700
	216	BRUNISOL EUTRIQUE - REDOXISOL limon sablo-argileux issu de gneiss en position plane.	52	28	20	imparfait	7.2	1200
	55	BRUNISOL EUTRIQUE limon sablo-argileux, issu de schiste briovérien altéré	34	49	18	imparfait	7.4	820
	117	BRUNISOL EUTRIQUE sable argilo-limoneux moyennement gravelo-caillouteux épais, d'anciennes terrasses	64	25	11	imparfait	22.0	800
	127	BRUNISOL EUTRIQUE, sable argilo-limoneux, à horizon caillouteux profond, issu de dépôts de pente.	60	24	16	imparfait	9.5	800
	133	BRUNISOL EUTRIQUE lithique caillouteux, issu de schiste briovérien dur en position de pente moyenne	54	35	11	favorable	13.5	350
	134	BRUNISOL EUTRIQUE leptique issu de schiste briovérien +/- moins altéré en position de pente faible	41	44	25	favorable	5.3	450
Brunisol Eutrique	180	BRUNISOL EUTRIQUE sable limoneux moyennement épais, issus de gneiss et résidus sableux.	66	24	10	imparfait	17.1	800
	185	BRUNISOL EUTRIQUE sable argilo-limoneux, moyennement épais, issu de granite et sables résiduels	62	25	13	faible	9.7	700
	200	BRUNISOL EUTRIQUE sable argileux issu de dépôts tertiaires Sableux (argileux) sur micaschiste en position de butte.	83	8	9	favorable	9.6	600
	209	BRUNISOL EUTRIQUE lithique, limon sablo-argileux, à charge grossière, issu de gneiss dur	60	27	13	favorable	13.9	280

Groupe de sols	ID - Sols	Nom Sols - RP 2008	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	Drainage	MO (g/Kg)	Profondeur (mm)
Brunisol	149	BRUNISOL leptique, sable argilleux issu de micaschistes et limons allochtones, sur versant concave	59	23	18	modéré	8.0	600
	-	BRUNISOL lithique limon sablo-argilleux issu de micaschistes et limons allochtones, sur versant	38	43	19	favorable	15.8	280
	BR	BRUNISOL leptique rédoxique sable argilleux issu de micaschistes et limons de versant concave	59	24	17	modéré	8.0	670
	224	BRUNISOL leptique, sable argilo-limoneux issus de gneiss, en position de versant à pente moyenne	62	25	13	imparfait	10.9	1100
Brunisol resaturé	189	BRUNISOL RESATURÉ lithique, issu de granite dur, en position de versant à pente moyenne à forte	53	31	16	favorable	16.5	400
Calcisols	203	CALCISOLS argilo-limoneux, issus de calcaire gréseux	64	20	16	modéré	8.6	600
Colluviosol	67	COLLUVIOSOL - REDOXISOL surrédoxique limon sablo-argilleux épais.	31	41	28	faible	18.4	1200
-	76	COLLUVIOSOL-REDOXISOL surrédoxique à horizon rédoxique profond, argile limono-sableux.	23	48	29	Assez pauvre	10.9	1400
Col	73	FLUVIOSOL - REDOXISOL surrédoxique à horizon rédoxique profond, limon argilo-sableux, très épais	12	66	22	imparfait	12.1	1400
Fluvisols-Redoxisol	74	FLUVIOSOL-REDOXISOL surrédoxique rédoxique limon argilo-sableux, très épais	12	66	22	imparfait	12.1	1400
-	FRx	FLUVIOSOL-REDOXISOL surrédoxique rédoxique limon argilo-sableux, très épais	12	66	22	imparfait	12.1	1400
Fluvisol Brunifié	68	FLUVIOSOL BRUNIFIÉ - REDOXISOL surrédoxique sable argilleux, très épais, de plaine alluviale	63	21	16	modéré	6.3	1300
-	FBr	FLUVIOSOL BRUNIFIÉ rédoxique sableux, épais, en position de plaine alluviale	81	11	8	modéré	5.8	1700
Fluvisol Typique	70	FLUVIOSOL TYPIQUE sableux et très épais, en position de plaine alluviale.	91	5	4	modéré	8.2	1600
-	75	FLUVIOSOL TYPIQUE - REDOXISOL, Limon argilo-sableux, en position de plaine alluviale.	25	50	25	faible	8.1	1200
FTy	78	FLUVIOSOL TYPIQUE alluvio-colluvial à horizon rédoxique profond, en position de fond de vallée	35	42	23	pauvre	5.8	1800

Groupe de sols	ID - Sols	Nom Sols - RP 2008	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	Drainage	MO (g/Kg)	Profondeur (mm)
Histosol Recouvert	79	HISTOSOLS RECOUVERTS, à horizon mésique, à texture argileuse sur altérite	46	28	26	pauvre	155.7	1500
	Hre							
Histosol	81	HISTOSOL mésique, à horizon saprique, très profonds, sur granulite	15	31	54	très pauvre	31	1500
	-							
	H	HISTOSOLS sapriques, à horizon mésiques, sodique, très profonds	16	52	32	très pauvre	314.5	1500
Luvisol Degradé	31	LUVISOL DEGRADE - REDOXISOL surrédoxique limon sablo-argileux sur argile limon-sableuse	43	39	18	favorable	2.4	1600
	-							
Ldeg	62	LUVISOL DEGRADE - REDOXISOL limon sablo-argileux progressivement limon argilo-sableux	32	50	18	favorable	4.8	1400
	120	LUVISOL DEGRADE - REDOXISOL (surrédoxique) limon sableux très épais issu de limons éoliens	18	54	28	faible	5.7	1300
Luvisol Typique-Redoxisol	61	LUVISOL TYPIQUE - REDOXISOL limon sablo-argileux progressivement limon argilo-sableux	29	54	17	faible	2.7	1200
	96	LUVISOL TYPIQUE - REDOXISOL surrédoxique polycyclique, Sable limoneux à argile sableuse, très épais	66	23	11	faible	5.4	1200
	97	LUVISOL TYPIQUE-REDOXISOL surrédoxique, polycyclique, sable argilo-limoneux à argile sableuse, très épais	48	31	21	faible	10.6	1300
	100	LUVISOL TYPIQUE - REDOXISOL (surréd) planosolique sablo-limoneux sur argile limoneuse épais	66	23	11	faible	6.3	1100
	106	LUVISOL TYPIQUE - REDOXISOL (surrédoxique) moyennement épais issu de sables / substrat indifférencié	62	31	7	faible	7.1	700
	122	LUVISOL TYPIQUE - REDOXISOL surrédoxique Limon sablo-argileux, issu de limons éoliens	29	52	19	faible	33.1	1200
	-							
	LTYRx							

Groupe de sols	ID - Sols	Nom Sols - RP 2008	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	Drainage	MO (g/Kg)	Profondeur (mm)
	143	LUVISOL TYPIQUE - REDOXISOL, issu de schiste briovérien altéré, en position de pente faible	29	50	21	faible	6.6	1400
	194	LUVISOL TYPIQUE-REDOXISOL (surrédoxique), issu de limons sur arène granitique en position de plateau	46	36	18	faible	6.6	1200
	227	LUVISOL TYPIQUE - REDOXISOL limon sablo-argileux très épais, légèrement graveleux, sur plateau	42	38	20	imparfait	7.6	1200
	59	NEOLUVISOL - REDOXISOL limon sablo-argileux progressivement limon argilo-sableux	32	50	18	faible	8.9	1200
	112	NEOLUVISOL - REDOXISOL surrédoxique, limon sablo-argileux, très épais, issu de résidus pliocènes	28	56	16	favorable	11.3	1100
	123	NEOLUVISOL REDOXISOL Limon sablo-argileux légèrement graveleux, issu de limons éoliens	26	56	18	faible	16.2	1200
Neoluvisol-Redoxisol	126	NEOLUVISOL - REDOXISOL sable argilo-limoneux, issu de dépôts de pente colluvionnés.	59	24	17	faible	7.1	1000
	138	NEOLUVISOL - REDOXISOL, issu de schiste briovérien altéré, en position de pente faible ou replat	33	48	19	favorable	5.9	1100
	157	NEOLUVISOL - REDOXISOL limon sablo-argileux, issu de micaschistes altéré sur pente très faible	35	49	16	faible	12.6	1200
	195	NEOLUVISOL - REDOXISOL, issus de limon sur arène granitique, en position de pente faible ou replat	46	31	23	faible	8.2	1200
Neoluvisol	142	NEOLUVISOL tronqué, issu de schiste briovérien altéré, en position de pente faible ou replat	31	44	25	faible	5.3	1100
- Neo								

Groupe de sols	ID - Sols	Nom Sols - RP 2008	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	Drainage	MO (g/ Kg)	Profondeur (mm)
Planosol Typique	104	PLANOSOL TYPIQUE sédimorphe (humifère) très épais, sableux sur argile sableuse sur lithologie variée	75	14	11	favorable	4.3	1200
	-	PLANOSOL TYPIQUE sédimorphe épais humifère sableux sur altérée de micasciste, de plateau	84	10	6	favorable	5.1	1200
Quasi-Luvisol-Redoxisol	144	QUASI-LUVISOL - REDOXISOL, issu de schiste briovérien altéré, en position de pente faible ou replat	32	44	24	faible	6.0	1400
	-	RANKOSOL d'érosion limon argilo-sableux, très acide, humifère, issu de schiste gréseux paléozoïque	40	32	28	favorable	7.5	250
Rankosol	21	RANKOSOL d'érosion sableux, issus de Gneiss dur et de sable plio-quaternaire	68	23	9	faible	14.1	300
	-	REDOXISOL parfois surrédoxique, colluvionné en surface, sableux sur sable argileux, moyennement épais et graveleux	70	22	8	faible	7.0	550
Redoxisol	130	REDOXISOL leptique surrédoxique sableux sur argile sableuse colluvionné en surface sur gneiss altéré	66	21	13	faible	15.0	550
	-	REDOXISOL surrédoxique limon sablo-argileux sur argile limono-sableuse, sur altération argileuse	34	39	27	favorable	31.7	1200
Rx	201	REDOXISOL (surrédoxique) sableux très épais, issu de sable sur micasciste en position de butte	54	28	18	faible	8.2	1300

Groupe de sols	ID - Sols	Nom Sols - RP 2008	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	Drainage	MO (g/Kg)	Profondeur (mm)
Thalassosol Polderise-Redoxisol	85	THALASSOSOL POLDERISE REDOXISOL salin en voie de décarbonatation, vertique, réductique profond	5	36	59	assez pauvre	22.3	2300
Thalassosol Brut	90	THALASSOSOL BRUT - SALISOL - REDUCTISOL STAGNIQUE calcaire superficiel issue d'argile marine épaisse	7	39	54	très pauvre	33.4	1500

Annexe C :

Occupation des sols et portrait agricole du territoire du SCoT de Nantes Saint-Nazaire.

Annex C: Land use and agricultural portrait of the Nantes Saint-Nazaire SCoT territory.

Annexe C1 : Grandes catégories d'occupations des sols sur le territoire du SCoT de Nantes Saint-Nazaire.

Annex C1: Main categories of land use in the Nantes Saint-Nazaire SCoT territory.

Catégories CLC 2018	Zones urbaines	Zones en eau	Zones forestières	Zones humides	Zones agricoles	Total
Surface d'occupation (ha)	32 198	3 788	9 470	13 258	130 686	189 400
Pourcentage d'occupation	17	2	5	7	69	100

Annexe C2 : Répartition des activités agricoles au sein des zones agricoles sur le territoire du SCoT de Nantes Saint-Nazaire.

Annex C2: Distribution of agricultural activities within the agricultural zones of the Nantes Saint-Nazaire SCoT territory.

Catégories CLC 2018	Vignobles et vergers	Espaces naturels	Prairies	Cultures	Total
Surface d'occupation (ha)	1 307	2 614	90 173	36 592	130 686
Pourcentage d'occupation	1	2	69	27	100

Annexe C3 : Répartition des surfaces fourragères au sein des prairies sur le territoire du SCoT de Nantes Saint-Nazaire.

Annex C3: Distribution of forage areas within grasslands in the Nantes Saint-Nazaire SCoT territory.

Catégories	Prairies permanentes	Prairies temporaires	Fourrage cultivé	Total
Surface d'occupation (ha)	49 595	24 347	16 213	90 173
Pourcentage d'occupation	55	27	18	100