



**HAL**  
open science

## Projet ANR - ANR-16CE32-005-01 Soilserv programme 2016-2021 - Compte-rendu de fin de projet

Christian Walter

### ► To cite this version:

Christian Walter. Projet ANR - ANR-16CE32-005-01 Soilserv programme 2016-2021 - Compte-rendu de fin de projet. [Rapport de recherche] inrae. 2021. hal-03299072

**HAL Id: hal-03299072**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03299072v1>**

Submitted on 26 Jul 2021

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

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

**Projet ANR-ANR-16-CE32-0005-01**

***Soilserv***

Programme 2016-2021

## Table des matières

A	Identification	3
B	Résumé consolidé public	4
B.1	Résumé consolidé public en français	4
B.2	Résumé consolidé public en anglais	8
C	Mémoire scientifique	12
C.1	Résumé du mémoire	12
C.2	Enjeux et problématique, état de l'art	13
C.3	Approche scientifique et technique	15
C.4	Résultats obtenus	19
C.4.1	L'évaluation biophysique des services écosystémiques	
C.4.2	L'information pédologique nécessaire aux évaluations	
C.4.3	L'intégration de l'évaluation des SES dans des chaînes de décision	
C.5	Exploitation des résultats	23
C.6	Discussion	24
C.7	Conclusions	27
C.8	Références citées (voir aussi la liste des publications du projet)	27
D	Liste des livrables	29
E	Impact du projet	32
E.1	Indicateurs d'impact	32
E.2	Liste des publications et communications	33
E.2.1	Articles dans des revues internationales a comité de lecture.....	33
E.2.2	Ouvrage ou chapitres d'ouvrage.....	34
E.2.3	Conférences internationales.....	34
E.2.4	Articles dans des revues nationales a comité de lecture.....	36
E.2.5	Chapitre d'ouvrages nationaux.....	36
E.2.6	Conférences nationales.....	36
E.2.7	Articles de vulgarisation.....	37
E.2.8	Conférences de vulgarisation.....	37
E.2.9	Thèses.....	38
E.2.10	Mémoires d'étudiants.....	38
E.3	Liste des éléments de valorisation	38
E.3.1	brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet.....	38
E.3.2	logiciels et tout autre prototype.....	38

E.3.3	actions de normalisation.....	38
E.3.4	Bases de données et systèmes d'information géographiques .....	38
E.3.5	nouveaux projets .....	39
E.3.6	Contribution à des projets et ouverture internationale.....	39
E.3.7	Organisation de colloques ou de Symposiums .....	39
E.3.8	Formations continues et formations doctorales .....	39
E.4	Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires)	40
F	Annexe 1 : liste des mémoires d'étudiants et des rapports internes	41

*Ce document est à remplir par le coordinateur en collaboration avec les partenaires du projet. L'ensemble des partenaires doit avoir une copie de la version transmise à l'ANR.*

## A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	<i>Soilserv</i>
Titre du projet	Evaluation multi-échelle des services écosystémiques des sols au sein d'agroécosystèmes
Coordinateur du projet (société/organisme)	Christian WALTER (Institut Agro - Agrocampus Ouest)
Période du projet (date de début – date de fin)	1 octobre 2016 31 mars 2021
Site web du projet, le cas échéant	<a href="http://www6.inrae.fr/Soilserv/">www6.inrae.fr/Soilserv/</a>

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	Pr. Christian WALTER
Téléphone	02 23 48 54 39
Adresse électronique	<a href="mailto:christian.walter@agrocampus-ouest.fr">christian.walter@agrocampus-ouest.fr</a>
Date de rédaction	15 juin 2021

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	UMR INRAE-Institut Agro SAS UMR INRAE-Institut Agro SMART US INRAE Infosol Orléans UMR INRAE-Institut Agro-Univ. Rennes 1 IGEPP Société SCE Nantes Pôle Métropolitain Nantes St-Nazaire CRDQ Québec
---	---

## **B RESUME CONSOLIDE PUBLIC**

### **B.1 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS**

#### L'ÉVALUATION DES SERVICES RENDUS PAR LES SOLS AGRICOLES

##### *Évaluer les services écosystémiques des sols pour l'aide à la décision*

Les sols sont une ressource peu renouvelable qui assurent des services essentiels pour l'Homme. Le projet *Soilserv* associe des approches biophysiques et socio-économiques pour évaluer les services écosystémiques des sols (SES) cultivés à différentes échelles spatiales et pour analyser leur prise en compte dans les choix stratégiques des exploitants agricoles et des gestionnaires de territoire. Il a pour premier objectif d'affiner le cadre conceptuel de l'évaluation biophysique des SES en mobilisant des descripteurs dérivés de mesures ou de modélisations. Il cherche aussi à améliorer et à adapter l'information spatiale sur les sols nécessaire à l'évaluation des SES par des approches innovantes de désagrégation et de changement de support géographique des bases de données existantes. Enfin, *Soilserv* analyse l'intégration des SES dans des chaînes de décision, d'une part dans des modèles économiques de gestion d'exploitations agricoles, d'autre part dans des stratégies de développement des territoires. Une originalité forte du projet réside dans le croisement d'approches disciplinaires autour de ce concept émergent de service écosystémique des sols. Une autre originalité forte est la mobilisation d'acteurs de la recherche et du monde professionnel dans le projet pour intégrer la perception et les attentes des acteurs dans les démarches développées.

##### *Une méthodologie mobilisant mesures de terrain, bases de données et modélisation dans différents contextes agricoles*

Les services écosystémiques des sols ont été estimés par modélisation sur différents territoires de 12 à 1800 km<sup>2</sup> dans le nord-ouest de la France et en Champagne en adaptant le modèle d'évaluation au système de production considéré (cultures annuelles ou prairies). L'estimation conjointe de six à treize services écosystémiques a été obtenue, selon une méthodologie homogène entre sites, à partir de simulations sur 30 ans de la croissance des plantes et des flux d'éléments issues de modèles dynamiques tenant compte des conditions climatiques, des propriétés des sols et des pratiques agricoles. Les bases de données existantes sur les sols permettant ces évaluations étant en règle générale de faible résolution, une recherche méthodologique a été menée pour améliorer leur résolution spatiale et leur précision en mobilisant des démarches innovantes de désagrégation spatiale issues des sciences des données. Par ailleurs, les données existantes permettant d'analyser les services liés à la biodiversité des sols étant insuffisantes, quatre campagnes nouvelles d'échantillonnage de la biodiversité des sols ont été réalisées sur le bassin versant agricole de Naizin (Morbihan) pour identifier les facteurs agronomiques et ceux liés au milieu structurant les communautés lombriciennes, les carabes et les taupins, susceptibles de générer des services positifs ou négatifs à l'Homme.

Le couplage des bases de données sols à des bases de données de comptabilité agricole et à d'autres données territoriales a permis de mobiliser des outils d'évaluation économique et de planification territoriale pour l'aide à la décision.

##### *Résultats majeurs du projet*

Un modèle conceptuel a été proposé mettant en relation les services rendus par les sols agricoles avec les enjeux du développement socio-économique d'un territoire. La déclinaison opérationnelle de ce modèle permet d'évaluer de façon quantitative les services, d'étudier

leurs interactions et de les comparer selon les contextes climatiques et pédologiques, mais aussi selon des scénarios de gestion agronomique.

La simulation sur 30 ans des SES par modélisation sur plusieurs sites et l'analyse des données de biodiversité des sols ont permis d'évaluer l'importance relative des variabilités temporelles et spatiales des services écosystémiques selon les conditions climatiques, la diversité des sols et les pratiques de gestion. Cela ouvre la voie à des approches simplifiées d'évaluation des services écosystémiques mobilisant des indicateurs plus faciles d'accès ou des méta-modélisations.

L'information pédologique nécessaire aux évaluations biophysiques et économiques peut être améliorée en résolution et en précision par des approches de désagrégation spatiale, mais sans que cette amélioration apporte des différences significatives sur l'estimation des services écosystémiques. Par contre, les résultats quant à la prise en compte de données sols dans l'évaluation économique des performances des exploitations agricoles, suggèrent que les modèles micro-économétriques de choix de production agricole pourraient être substantiellement améliorés par des données « sols » de nouvelle génération, et ce d'autant plus que ces modèles concernent de grandes aires géographiques.

La démarche d'évaluation des SES dans le cadre de la planification territoriale d'un territoire a permis de classer les sols selon leur capacité moyenne à fournir un SES donné sous les conditions de gestion proposées et selon leur sensibilité en réponse à un changement de gestion. Cela fournit une information nouvelle aux décideurs, et aux urbanistes qui les conseillent, pour leur permettre de prendre en compte les sols dans le choix des orientations et des projets d'aménagement.

Au final, les résultats conceptuels et méthodologiques du projet *Soilserv* confirment l'intérêt d'une évaluation des services écosystémiques des sols qui aille au-delà de l'évaluation classique des fonctions des sols habituellement conduite, car elle permet d'intégrer dans la démarche les attentes actuelles et futures des bénéficiaires des services écosystémiques. Ils participent ainsi à l'élaboration de stratégies de gestion des exploitations agricoles et des territoires incluant un objectif de préservation des sols.

### *Production scientifique*

Le projet *Soilserv* a donné lieu à douze articles publiés ou soumis dans des revues scientifiques internationales et à 35 communications scientifiques nationales et internationales. Le programme a bénéficié des contributions scientifiques de 4 thèses et a financé 10 mémoires de master. Un symposium dans le cadre du congrès européen *Eurosoil*, un numéro spécial dans la revue *Etude et Gestion des Sols* et deux écoles doctorales ont accru la dissémination des résultats et des méthodes mises au point et suscité des collaborations pour la poursuite des travaux, notamment au niveau européen.

Par ailleurs, différentes bases de données ont été produites portant sur l'estimation de propriétés des sols et sur l'évaluation de services écosystémiques sur les territoires, mais aussi couplant des données économiques et des données sols. Ces bases de données vont être mis à disposition de la communauté scientifique et d'autres utilisateurs et pourront être reprises dans des travaux de recherche ou de planification territoriale.

*Soilserv* a également été un lieu de collaboration avec le monde professionnel, puisque la société SCE, bureau d'étude spécialisée dans les études environnementales, et la collectivité territoriale du pôle métropolitain de Nantes-St-Nazaire, ont été partenaires du projet. Les bénéfices ont été réciproques pour les acteurs de la recherche et du monde professionnel et permettent d'envisager une transposition plus rapide des méthodes développées vers les acteurs de terrain.

Illustration

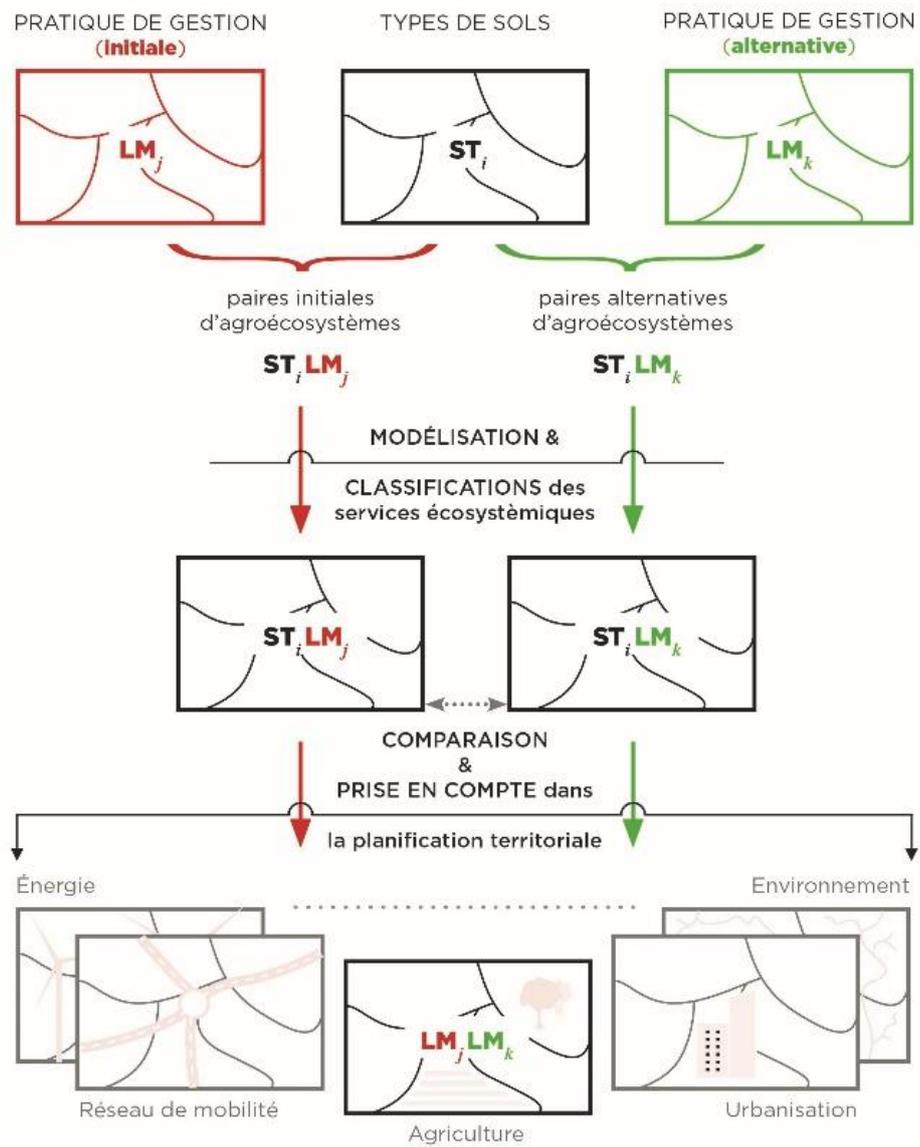


Figure 1 – Représentation de la méthodologie d'évaluation des services écosystémiques des sols et de sa prise en compte dans la planification territoriale



Figure 2 – Dans un écosystème agricole, les sols rendent plusieurs types de services écosystémiques comme la production de biomasse à travers les fournitures d'eau et d'azote aux plantes, la séquestration de carbone atmosphérique, l'habitat pour la biodiversité, la régulation biologique des pathogènes, mais aussi la régulation de la qualité de l'eau et de l'air ou encore la recharge des nappes phréatiques. Evaluer les services écosystémiques des sols en prenant en compte leurs caractéristiques propres et leur mode de gestion permet de mieux intégrer les sols lors de la prise de décision aux niveaux locaux ou territoriaux.

### Informations factuelles

Le projet « *Soilserv* : évaluation multi-échelle des services écosystémiques des sols au sein d'agroécosystèmes ; [www6.inrae.fr/Soilserv](http://www6.inrae.fr/Soilserv) » est un programme de recherche fondamentale financé par le programme de *Projets de Recherche Collaboratives* financé par l'Agence Nationale de la Recherche et coordonné par Christian Walter de l'UMR 1069 SAS de Rennes. Il associe les laboratoires SAS Rennes (Sol, Agro hydrosystèmes, Spatialisation), SMART-LERECO Rennes (Structures et Marchés Agricoles, Ressources et Territoires), INFOSOL Orléans, IGEPP Rennes (Institut de Génétique, Environnement et Protection des cultures), ainsi que la société SCE à Nantes, le Pôle Métropolitain Nantes Saint Nazaire et le CRDQ Québec (Centre de Recherche et de Développement de Québec) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada. Le projet a débuté au 1<sup>er</sup> septembre 2016 et s'est déroulé sur 54 mois pour se terminer en mars 2021. Il a bénéficié d'une subvention ANR de 504 k€ pour un coût global de l'ordre de 2,8 M€.

## B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

### VALUATION OF SERVICES DELIVERED BY AGRICULTURAL SOILS

#### *Assessing soil ecosystem services for decision support*

Soils are a scarce renewable resource that provides essential services to humans. The *Soilserv* project combines biophysical and socio-economic approaches to evaluate cultivated soil ecosystem services (SES) at different spatial scales and to analyse their consideration in the strategic choices of farmers and land managers. The first objective was to refine the conceptual framework of biophysical evaluation of ESS by mobilising descriptors derived from measurements or modelling. It also sought to improve and adapt the spatial information on soils required for the assessment of SES by using innovative approaches to disaggregate and change the geographical support of existing databases. Finally, *Soilserv* analysed the integration of SES in decision chains, on the one hand in economic models for farm management, and on the other hand in territorial development strategies, such as territorial coherence plans (SCOT). A strong originality of the project lies in the crossing of disciplinary approaches around this emerging concept of soil ecosystem services.

#### *A methodology mobilising fields measurements, databases and modelling in different agricultural contexts*

Soil ecosystem services were estimated by modelling on different territories from 12 to 1800 km<sup>2</sup> in north-western France and in Champagne by adapting the evaluation model to the production system considered (annual crops or grasslands). The joint estimation of six to thirteen ecosystem services was obtained, according to a methodology that was homogeneous between sites, based on 30-year simulations of plant growth and element flows from dynamic models driven by climatic conditions, soil properties and agricultural practices. As the existing soil databases used for these assessments were generally of low resolution, methodological research was conducted to improve their spatial resolution and accuracy by mobilising innovative spatial disaggregation approaches issued from data sciences. In addition, since the existing data for analysing soil biodiversity services were insufficient, four new soil biodiversity sampling campaigns were conducted in the Naizin (Morbihan) agricultural catchment area to identify the agronomic and environmental factors structuring earthworm, carabid and wireworm communities that are likely to generate positive or negative services for humans.

The coupling of soil databases with agricultural accounting databases and other territorial data has made it possible to mobilise econometric modelling and territorial planning tools for decision support.

#### *Key results of the project*

A conceptual model was proposed that relates the services provided by agricultural soils to the socio-economic development issues of a territory. The operational version of this model makes it possible to quantitatively evaluate the services, to study their interactions and to compare them according to climatic and soil contexts, but also according to agronomic management scenarios.

The 30-year simulation of SES by modelling on several sites and the analysis of soil biodiversity data made it possible to assess the relative importance of the temporal and spatial variability of ecosystem services according to climatic conditions, soil diversity and management practices. This opens the way for simplified approaches to ecosystem service assessment using more easily accessible indicators or meta-modelling.

The soil information needed for biophysical and economic assessments can be improved in resolution and precision by spatial disaggregation approaches, but without this improvement bringing significant differences in the estimation of ecosystem services. On the other hand, the results concerning the inclusion of soil data in the economic evaluation of farm performance suggest that micro-econometric models of agricultural production choices could be substantially improved by new-generation soil data, especially as these models concern large geographical areas.

The SES evaluation on a peri urban territory has made it possible to classify soils according to their average capacity to provide SES under the proposed management conditions and according to their sensitivity in response to a change in management. This provides new information for decision-makers and the planners who advise them and should enable them to take soils into account in the choice of planning orientations and projects.

Finally, the conceptual and methodological results of the *Soilserv* project confirm the interest of an assessment of soil ecosystem services that goes beyond the classic evaluation of soil functions usually carried out, because it allows the current and future expectations of the beneficiaries of ecosystem services to be integrated into the approach. In this way, they participate in the development of farm and territorial management strategies that include a soil preservation objective.

### *Scientific production*

The *Soilserv* project resulted in 12 articles published or submitted in international scientific journals and 35 national and international scientific communications. The programme benefited from the scientific contributions of 4 PhDs and financed 10 master's theses. A symposium within the framework of the *Eurosoil* congress, a special issue of the journal *Etude et Gestion des Sols* and two doctoral schools increased the dissemination of the results and methods and led to collaborations for the continuation of the work, particularly at the European level.

In addition, various databases have been produced on the estimation of soil properties and on the assessment of ecosystem services within territories, but also coupling economic data and soil data. These databases will be made available to the scientific community and other users and may be used in research or territorial planning.

*Soilserv* has also been a place of collaboration with professionals, since the company SCE, a consultancy firm specialising in environmental studies, and the local authority of the Nantes-St-Nazaire metropolitan area, have been partners in the project. The benefits were reciprocal for both the research and professional actors and make it possible to envisage a more rapid transposition of the methods developed to the actors in the field.

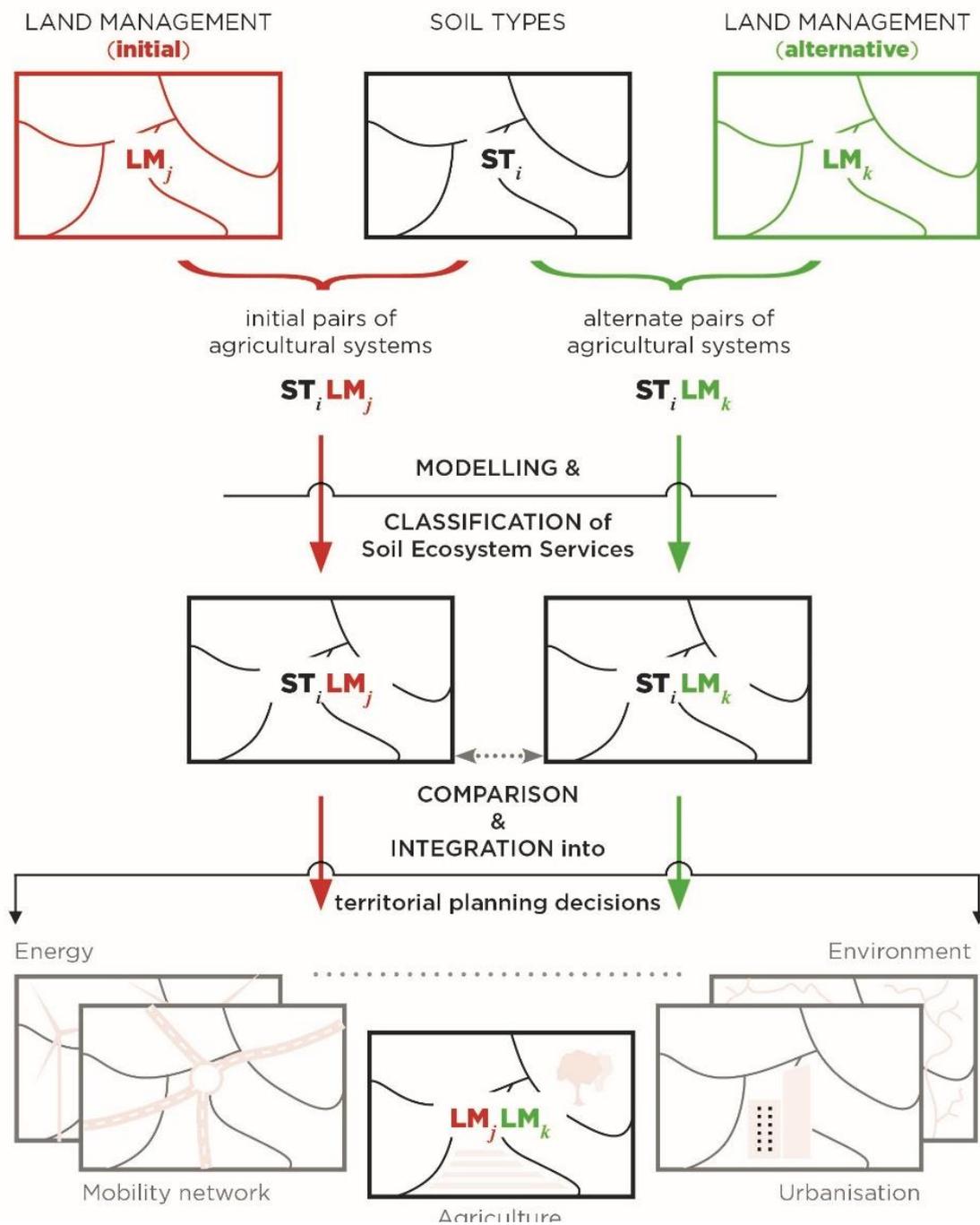


Figure 1 - Representation of the methodology for evaluating soil ecosystem services and its consideration in territorial planning



*Figure 2 - In an agricultural ecosystem, soils provide several types of ecosystem services such as biomass production through the supply of water and nitrogen to plants, atmospheric carbon sequestration, habitat for biodiversity, biological regulation of pathogens, but also the regulation of water and air quality or the recharging of groundwater. Evaluating ecosystem services provided by the soils makes it possible to better integrate soils into decision-making at local or territorial levels.*

#### *Project identity card*

The project "Soilserv: multi-scale assessment of soil ecosystem services in agroecosystems; [www6.inrae.fr/Soilserv](http://www6.inrae.fr/Soilserv)" is a fundamental research programme financed by the Collaborative Research Projects programme funded by the French National Research Agency and coordinated by Christian Walter of UMR 1069 SAS in Rennes. It associates the SAS Rennes (Soil, Agro-hydrosystems, Spatialization), SMART-LERECO Rennes (Agricultural Structures and Markets, Resources and Territories-), INFOSOL Orléans, IGEPP Rennes (Institute of Genetics, Environment and Crop Protection) laboratories, as well as the company SCE in Nantes, the Nantes Saint Nazaire Metropolitan Cluster and the CRDQ Quebec (Quebec Research and Development Centre) of Agriculture and Agri-Food Canada. The project started on 1 September 2016 and ran for 54 months, ending in March 2021. It benefited from an ANR grant of 504 k€ for a total cost of around 2.8 M€.

## C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

**Mémoire scientifique confidentiel** : non

### C.1 RESUME DU MEMOIRE

*Ce résumé peut être repris du résumé consolidé public.*

#### L'ÉVALUATION DES SERVICES RENDUS PAR LES SOLS AGRICOLES

##### *Évaluer les services écosystémiques des sols pour l'aide à la décision*

Les sols sont une ressource peu renouvelable qui assure des services essentiels pour l'Homme. Le projet *Soilserv* associe des approches biophysiques et socio-économiques pour évaluer les services écosystémiques des sols (SES) cultivés à différentes échelles spatiales et pour analyser leur prise en compte dans les choix stratégiques des exploitants agricoles et des gestionnaires de territoire. Il a pour premier objectif d'affiner le cadre conceptuel de l'évaluation biophysique des SES en mobilisant des descripteurs dérivés de mesures ou de modélisations. Il cherche aussi à améliorer et à adapter l'information spatiale sur les sols nécessaire à l'évaluation des SES par des approches innovantes de désagrégation et de changement de support géographique des bases de données existantes. Enfin, *Soilserv* analyse l'intégration des SES dans des chaînes de décision, d'une part dans des modèles économiques de gestion d'exploitations agricoles, d'autre part dans des stratégies de développement des territoires, comme les schémas de cohérence territoriale (SCOT). Une originalité forte du projet réside dans le croisement d'approches disciplinaires autour de ce concept émergent de service écosystémique des sols. Une autre originalité forte est la mobilisation d'acteurs de la recherche et du monde professionnel dans le projet pour intégrer la perception et les attentes des acteurs dans les démarches développées.

##### *Une méthodologie mobilisant mesures de terrain, bases de données et modélisation dans différents contextes agricoles*

Les services écosystémiques des sols ont été estimés par modélisation sur différents territoires de 12 à 1800 km<sup>2</sup> dans le nord-ouest de la France et en Champagne en adaptant le modèle d'évaluation au système de production considéré (cultures annuelles ou prairies). L'estimation conjointe de six à treize services écosystémiques a été obtenue, selon une méthodologie homogène entre sites, à partir de simulations sur 30 ans de la croissance des plantes et des flux d'éléments issues de modèles dynamiques tenant compte des conditions climatiques, des propriétés des sols et des pratiques agricoles. Les bases de données existantes sur les sols permettant ces évaluations étant en règle générale de faible résolution, une recherche méthodologique a été menée pour améliorer leur résolution spatiale et leur précision en mobilisant des démarches innovantes de désagrégation spatiale issues des sciences des données. Par ailleurs, les données existantes permettant d'analyser les services liés à la biodiversité des sols étant insuffisantes, quatre campagnes nouvelles d'échantillonnage de la biodiversité des sols ont été réalisées sur le bassin versant agricole de Naizin (Morbihan) pour identifier les facteurs agronomiques et liés au milieu structurant les communautés

lombriciennes, les carabes et les taupins, susceptibles de générer des services positifs ou négatifs à l'Homme.

Le couplage des bases de données sols à des bases de données de comptabilité agricole et à d'autres données territoriales a permis de mobiliser des outils d'évaluation économique et de planification territoriale pour l'aide à la décision.

### *Résultats majeurs du projet*

Un modèle conceptuel a été proposé mettant en relation les services rendus par les sols agricoles avec les enjeux du développement socio-économique d'un territoire. La déclinaison opérationnelle de ce modèle permet d'évaluer de façon quantitative les services, d'étudier leurs interactions et de les comparer selon les contextes climatiques et pédologiques, mais aussi selon des scénarios de gestion agronomique.

La simulation sur 30 ans des SES par modélisation sur plusieurs sites et l'analyse des données de biodiversité des sols ont permis d'évaluer l'importance relative des variabilités temporelles et spatiales des services écosystémiques selon les conditions climatiques, la diversité des sols et les pratiques de gestion. Cela ouvre la voie à des approches simplifiées d'évaluation des services écosystémiques mobilisant des indicateurs plus faciles d'accès ou des méta-modélisations.

L'information pédologique nécessaire aux évaluations biophysiques et économiques peut être améliorée en résolution et en précision par des approches de désagrégation spatiale, mais sans que cette amélioration apporte des différences significatives sur l'estimation des services écosystémiques. Par contre, les résultats quant à la prise en compte de données sols dans l'évaluation économique des performances des exploitations agricoles, suggèrent que les modèles micro-économétriques de choix de production agricole pourraient être substantiellement améliorés par des données « sols » de nouvelle génération, et ce d'autant plus que ces modèles concernent de grandes aires géographiques.

La démarche d'évaluation des SES dans le cadre de la planification territoriale d'un territoire a permis de classer les sols selon leur capacité moyenne à fournir un SES donné sous les conditions de gestion proposées et selon leur sensibilité en réponse à un changement de gestion. Cela fournit une information nouvelle aux décideurs, et aux urbanistes qui les conseillent, pour leur permettre de prendre en compte les sols dans le choix des orientations et des projets d'aménagement.

Au final, les résultats conceptuels et méthodologiques du projet *Soilserv* confirment l'intérêt d'une évaluation des services écosystémiques des sols qui aille au-delà de l'évaluation classique des fonctions des sols habituellement conduite, car elle permet d'intégrer dans la démarche les attentes actuelles et futures des bénéficiaires des services écosystémiques. Ils participent ainsi à l'élaboration de stratégies de gestion des exploitations agricoles et des territoires incluant un objectif de préservation des sols.

## **C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART**

### *Les enjeux et l'état de l'art*

Les sols agricoles assurent plus de 90 % des besoins nutritionnels de la population mondiale à travers la production de plantes et d'animaux nourris directement ou indirectement via les sols. En outre, les sols cultivés représentent une part importante (50 %) de la production de fibres textiles, ainsi qu'une proportion non négligeable de la production d'énergie, par la récolte du bois et la production d'électricité issue de la biomasse. Les prédictions pour l'avenir, quels que soient les scénarios de systèmes alimentaires envisagés, suggèrent que cette prédominance des produits dépendant des sols restera forte, tant pour satisfaire les besoins nutritionnels d'une population en croissance rapide que pour faire face aux défis actuels de la

transition énergétique (FAO, 2018). La nécessité de préserver et de développer les fonctions d'approvisionnement assurées par les sols reste donc une priorité forte et a été reconnue récemment comme telle par la commission européenne à travers sa mission « santé des sols et alimentation » (EA, 2020).

Cet impératif de production ne doit néanmoins pas reléguer au second plan d'autres fonctions importantes, telles que la régulation des flux d'eau ou des populations biologiques, assurées par les sols en tant que composante de l'écosystème. La notion de service écosystémique (SE), issue du champ économique (Constanza et al., 1997) a été prise en compte par les sciences de l'environnement à partir de la publication de l'Evaluation des Ecosystèmes pour le Millénaire (MEA, 2005). Elle offre une base conceptuelle reconnue (IPBES, 2018 ; Parlement Européen, 2021) pour appréhender la multifonctionnalité des sols et sensibiliser les décideurs qui gèrent les sols de manière directe (agriculteurs) ou indirecte (acteurs du marché et des politiques publiques). Compte tenu de son aspect intégratif, le concept de service écosystémique favorise également les approches transversales pour aborder les questions relatives aux "sols" par l'apport combiné des sciences environnementales et des sciences sociales, principalement l'économie.

Les travaux de recherche récents ont fait évoluer le concept de service écosystémique, initialement défini comme le « bénéfice que l'homme tirait des écosystèmes » (MEA, 2005) pour l'adapter aux écosystèmes fortement anthropisés, dont les écosystèmes cultivés. Pour ces écosystèmes perturbés par l'homme, il apparaît en effet indispensable de distinguer dans le bénéfice final la contribution de l'écosystème de celle permise par les interventions humaines directes, notamment à travers l'apport d'intrants d'origine industrielle. Dans la lignée des travaux d'évaluation des services écosystémiques des espaces agricoles menés aux niveaux européen (Maes et al., 2016) et français (EFESE-EA, 2017), la définition retenue dans le programme de recherche *Soilserv* d'un service écosystémique est « la contribution de la structure et des fonctions des écosystèmes, en combinaison avec d'autres entrées, au bien être humain ».

En tant qu'interface critique dans l'environnement, les sols peuvent fournir une large gamme de services écosystémiques (SE), que nous qualifions par la suite de services écosystémiques des sols (SES)<sup>1</sup>. Cependant, alors qu'il existe une demande croissante pour évaluer les SE des sols dans les systèmes agricoles, leur prise en compte dans les stratégies de gestion des terres reste un défi. En effet, en raison de la difficulté de relier les propriétés du sol aux SE, les SES ne sont toujours pas pleinement pris en compte dans le processus de décision en matière d'aménagement du territoire.

La biodiversité du sol, y compris les organismes aériens et souterrains, a été reconnue comme un élément clé pour la fourniture des services et/ou des disservices<sup>2</sup> des écosystèmes du sol (Kibblewhite et al., 2008). Afin de développer des agroécosystèmes durables, il est crucial d'identifier les principaux facteurs (propriétés du sol, pratiques agricoles) agissant sur cette biodiversité du sol et, par conséquent, les services écosystémiques qui y sont liés. Pour certains taxons comme les vers de terre, les facteurs ont été mis en évidence par des observations de terrain à une échelle fine (champ) et ont été identifiés par modélisation à des échelles larges

---

<sup>1</sup> La dénomination de « services écosystémiques fournis ou rendus par les sols » est préférée par certains auteurs (Eglin et al., 2021) au motif que les sols ne constituant pas un écosystème par eux-mêmes, ils ne peuvent délivrer directement de services écosystémiques. Dans Fossey et al. (2020), nous défendons l'idée que les sols peuvent être considérés comme des écosystèmes englobés dans des écosystèmes plus larges et que par conséquent la notion de « services écosystémiques des sols » fait sens.

<sup>2</sup> Le terme de disservice est défini comme un effet négatif des fonctions d'un écosystème pour le bien-être humain.

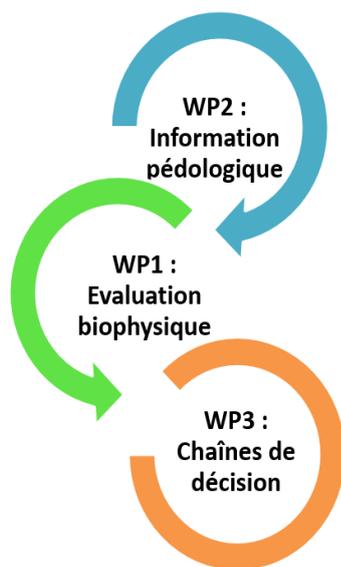
(européenne, mondiale) (Rutgers et al., 2016 ; Phillips et al., 2019). Mais, un manque subsiste concernant les principaux moteurs à moyenne échelle comme le bassin versant où les propriétés du sol et les pratiques agricoles sont diverses. De plus, jusqu'à présent, rares sont les études qui ont considéré simultanément la fourniture de services et de disservices. Or, la durabilité de l'agriculture repose sur des bouquets de (dis)services pour lesquels une étude systémique est nécessaire (Lescourret et al., 2015).

L'évaluation des services écosystémiques des sols a fait l'objet de nombreux travaux conceptuels, mais de peu d'applications opérationnelles allant jusqu'au développement d'indicateurs de plusieurs services écosystémiques déployés sur un territoire et d'une analyse critique d'une telle mise en œuvre. En particulier, est questionnée la mobilisation des données, la pertinence de la variabilité spatiale des services écosystémiques au regard de leur variabilité temporelle, les propriétés des sols les plus déterminantes afin de porter l'effort d'inventaire et de surveillance sur elles.

### *Les objectifs du programme*

L'objectif central du projet *SOILSERV* était d'associer des approches biophysiques et socio-économiques pour évaluer les services écosystémiques des sols (SES) cultivés aux échelles locales et territoriales et pour analyser leur prise en compte dans les choix stratégiques des exploitants agricoles et des gestionnaires de territoire.

En mobilisant une équipe pluridisciplinaire associant des chercheurs en science du sol, en écologie, en science des données, en économie et des professionnels de la planification territoriale, le projet a développé trois axes de recherche, notés WP1 à WP3 :



(WP1) l'évaluation biophysique des SES à des échelles spatiales allant de la parcelle agricole à des petites régions agricoles, en mobilisant des approches de modélisation et en les confrontant quand c'est possible à des descripteurs dérivés de mesures et d'indicateurs plus accessibles ; cet axe de recherche comprend aussi l'identification à l'échelle d'un paysage agricole des facteurs contrôlant la biodiversité et les services et disservices associés ;

(WP2) la prédiction de l'information pédologique du sol nécessaire à l'évaluation des services écosystémiques des sols, par des approches innovantes de désagrégation et de changement de support de l'information spatiale existante ;

(WP3) l'intégration des SES dans des chaînes de décision, d'une part dans des modèles économiques de gestion d'exploitations agricoles, d'autre part dans des stratégies de développement des territoires, à l'instar des schémas de cohérence territoriale (SCOT).

## **C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE**

### *L'élaboration du cadre conceptuel d'évaluation biophysique des services écosystémiques*

Le cadre conceptuel de l'évaluation biophysique des services écosystémiques des sols a été défini en trois étapes :

1. Une analyse bibliographique approfondie des approches d'évaluation existantes en tenant compte des travaux de recherche en cours aux niveaux européen et français (MAES, EFES-EA, Landmark, DESTISOL, MUSE). Les responsables de ces programmes ont par ailleurs été invités à l'une des cinq assemblées générales du programme *Soilserv* pour confronter les démarches d'évaluation des SES dans différents contextes ;

2. Une expertise collective mobilisant les compétences pluridisciplinaires des participants de *SOILSERV* visant une méthodologie d'évaluation des SES depuis l'échelle du pixel de 100 m de côté jusqu'à l'échelle régionale : définition du service, modélisation, information nécessaire, mesure directe du service si possible et proxy pour évaluer le service ;
3. La proposition d'un cadre conceptuel ensuite développé en un cadre opérationnel pour rendre les SES compréhensibles et utilisables par les acteurs de la planification territoriale. L'élaboration de ce cadre s'est appuyée sur une enquête préalable auprès d'acteurs de la planification territoriale de la métropole de Nantes-St Nazaire.

### Les zones d'étude et l'acquisition des données

En fonction des axes du programme et pour couvrir différentes échelles spatiales, plusieurs sites d'étude ont été considérés dans le cadre de *Soilserv* (Tableau 1) :

- le site de l'Observatoire de Recherche en Environnement *Aghrys* pour évaluer par modélisation et par mesure directe les services écosystémiques des sols et pour identifier les déterminants de la distribution à l'échelle des paysages de communautés biologiques qui déterminent des services écosystémiques de régulation ou des disservices ;
- le département d'Ille-et-Vilaine et la plaine de Beauce pour tester à l'échelle de grands territoires des procédures d'amélioration de la résolution des cartes de sols existantes, fournissant l'information pédologique nécessaire à l'évaluation des SES ;
- le département de la Marne pour coupler les informations pédologiques existantes avec des données comptables d'exploitation agricoles pour estimer par une approche micro-économétrique l'impact des propriétés des sols sur les services de production agricole ;
- le territoire de pôle métropolitain de Nantes-St Nazaire pour évaluer les SES à l'échelle territoriale dans un contexte de Schéma de Cohérence Territoriale.

Tableau 1 : Les sites d'étude et les données mobilisées dans le programme *Soilserv*

	Superficie (km <sup>2</sup> )	Axe de recherche	Acquisition de données nouvelles	Utilisation et amélioration de bases de données existantes
Observatoire de Recherche en Environnement (ORE) <i>Aghrys</i> (Morbihan)	12	WP1 et WP2	- 4 campagnes d'échantillonnage en 2018 et 2019 pour identifier les paramètres météorologiques et/ou agronomiques structurant les communautés lombriciennes, les carabes et les larves de taupins - 108 sites échantillonnés en 2013 (ANR Mosaic) et en 2018 (ANR <i>Soilserv</i> ) pour évaluer le stockage de carbone dans les sols	Bases de données de l'ORE <i>Aghrys</i> : sur le climat, sur les sols, sur l'historique de l'occupation des sols, sur les systèmes de production agricoles et les pratiques agricoles
Département d'Ille et Vilaine	6 513	WP2 et WP1	135 sites choisis par échantillonnage probabiliste décrits et analysés pour valider les prédictions spatiales des propriétés des sols	Bases de données sur les sols (IGCS), le climat, les pratiques agricoles.
Plaine de Beauce	4 800	WP2	60 sites choisis par échantillonnage probabiliste décrits et analysés pour valider les prédictions spatiales des propriétés des sols	Bases de données sur les sols (IGCS)
Département de la Marne et exploitations limitrophes	8 169	WP2	Couplage des données économiques des exploitations agricoles	Bases de données sur les sols (IGCS, BDAT) et comptabilités analytiques de 500 à 900 exploitations agricoles par an entre 1998 à 2015
Territoire métropolitain de Nantes St Nazaire	1 872	WP1, WP2 et WP3	Construction des bases de données permettant l'évaluation de 13 services écosystémiques	Carte des sols (IGCS) et documents de planification territoriale du SCOT

### L'étude des structures spatiales de la biodiversité des sols

Quatre campagnes d'échantillonnage « biodiversité » ont été réalisées durant le projet sur une série de parcelles agricoles du bassin-versant de Naizin (tableau 1) : trois campagnes en 2018 (mars, mai, juin) afin d'identifier les paramètres mésologiques et/ou agronomiques structurant les communautés lombriciennes, les carabes et les larves de taupins ; une campagne a été réalisée en 2019 (avril) afin d'étudier l'effet d'éléments paysagers incluant les prairies sur la structure des communautés de larves de taupins et des lombriciens. Des mesures complémentaires (biomasse microbienne, infiltration) ont été réalisées en 2018. L'ensemble de ces mesures a été analysé au regard des propriétés des sols et des divers pratiques agricoles recensées. Les données ont été analysées selon différentes méthodes : Random forest, Gradient Boosting Trees, Cubist, GLM, GLMM (Generalised linear mixed models).

### L'évaluation des services écosystémiques par modélisation

L'évaluation des services écosystémiques par modélisation a été mise en œuvre en s'appuyant sur deux modèles existants : (i) le modèle de simulation de cultures Stics (Brisson et al., 2008) dans sa version 9.0 pour les rotations culturales associant des cultures et des prairies temporaires ; (ii) le modèle de simulation PASIM (Graux et al., 2011) dans sa version 5.3 pour la simulation du fonctionnement d'agroécosystèmes prairiaux. Ces modèles ont été paramétrés en tenant compte des pratiques locales de gestion agronomique et de l'information pédologique disponible sur la zone d'étude considérée. Les simulations ont été réalisées sur une période de 30 ans à un pas de temps journalier.

Les sorties des modèles Stics ou Pasim ont servi au calcul des services écosystémiques rendus par les sols selon des algorithmes communs à tous les travaux menés dans le cadre de *Soilserv* et définis en début de programme par l'expertise collective sur l'évaluation des SES (Cf. supra). Six SES (régulation du climat, recharge des nappes, régulation des nitrates, fourniture d'azote aux plantes, fourniture d'eau aux plantes, production de biomasse) ont été évalués de façon systématique avec un pas d'intégration annuel lors les travaux du WP1 et WP3 (Figure 3).

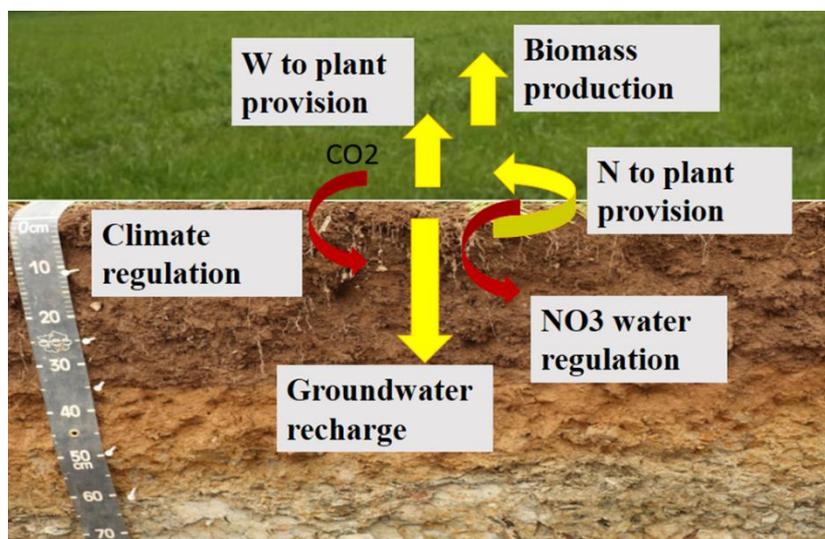


Figure 3 – Les six services écosystémiques des sols évalués par modélisation dans l'ensemble des sites d'étude de *Soilserv*.

### L'amélioration de l'information pédologique par cartographie numérique

Une large gamme d'approches de cartographie numérique a été appliquée pour tenter d'améliorer la résolution spatiale des cartes de sol existantes, utilisant des algorithmes de classification par apprentissage automatique (DSMART, Random Forest - RF, Quantile

Random Forest - QRF) et des données environnementales explicatives de la variabilité spatiale des sols (lithologie, relief, occupation du sol, climat...).

L'approche de désagrégation spatiale DSMART (Odgers et al., 2014) a été employée pour prédire en chaque pixel (résolution 50m en Ille-et-Vilaine et 25 m dans la plaine de Beauce) l'unité typologique de sol la plus probable et sa probabilité d'occurrence. Les algorithmes RF et QRF ont été testés dans la plaine de Beauce. Des cartes des unités typologiques de sol ont été dérivées en jeux de cartes de propriétés pédologiques à 6 profondeurs selon les standards internationaux *GlobalSoilMap*.

### Le transfert de l'information aux échelles de décision par agrégation spatiale

Les résolutions des bases des données sur les sols existantes ou désagrégées doivent être adaptées à l'échelle attendue pour l'évaluation des SES. L'agrégation spatiale permet ce passage de données d'entités naturelles indivisibles en unités spatiales arbitraires (Openshaw et Pumain, 1981). Un travail méthodologique a été conduit pour évaluer comment l'information sur les sols, ainsi que l'évaluation des SES qui s'y rattache, peut être transférée, par agrégation, à des échelles aux résolutions plus grossières et caractéristiques de niveaux opérationnels auxquels des décisions d'aménagement sont prises.

### L'estimation micro-économétrique de l'effet des propriétés du sol sur les performances de la production agricole

Deux types d'analyses économétriques ont été conduits à partir des comptabilités analytiques d'exploitations agricoles (données « comptables ») situées dans la Marne (pour les 2/3) et dans les départements voisins (pour 1/3), couvrant environ 900 exploitations sur la période 1998–2014. Les séquences de culture de ces exploitations ont été identifiées et leurs îlots de parcelles géolocalisés grâce aux données du Registre Parcellaire Graphique (RGP, sur la période 2007–2014). Ainsi, les données « comptables » ont pu être liées aux caractéristiques des sols (en moyenne sur la surface des îlots considérés) issues des données *GlobalSoilMap* France (Mulder et al., 2016). Cet appariement de données « comptables », de données « sols » et de données « RPG » sur les séquences des cultures (et de données météorologiques à l'échelle des communes) a produit une base de données d'une richesse unique (à notre connaissance). Les données ainsi obtenues ont permis des analyses statistiques originales (a) de l'impact des sols sur les choix des agriculteurs d'une part et (b) des choix de pratique de production des agriculteurs.

### La prise en compte de la qualité des sols par les agriculteurs

La gestion au cours du temps de la qualité des sols par les agriculteurs a été analysée théoriquement par un modèle de contrôle optimal, dans lequel la qualité est la capacité du sol à fournir des services écosystémiques intrants. La qualité est supposée décroître avec l'usage d'intrants de synthèse et s'accroître sous l'action de pratiques agricoles coûteuses en travail et équipement. Les approches empiriques ont été réalisées par traitements statistiques et économétriques de données nationales de sols (BDAT), de pratiques de fertilisation (IDELE et enquêtes sur les pratiques agricoles), de structures, politiques et comptabilités agricoles (recensement agricole, enquêtes structures, registre parcellaire graphique, réseau d'information comptable agricole) appariés à différents grains géographiques.

### L'intégration des SES dans la démarche de planification territoriale

L'analyse des documents d'objectifs relatifs aux projets de planification, à savoir les projets d'aménagements de développement durable (PADD) du SCoT3 a permis d'établir des liens

---

<sup>3</sup> Les objectifs de planification pris en compte sont : anticiper les conflits d'usage, valoriser le potentiel territorial, limiter les GES, pérenniser les espaces agricoles, sécuriser les ressources eau et sol, identifier les secteurs sensibles, et évaluer et maîtriser les besoins.

entre SES et échelles de planification. Ainsi 13 services écosystémiques des sols ont été définis et expérimentés à l'échelle du SCoT Nantes Saint-Nazaire en Loire-Atlantique (Tableau 1). Il s'agit d'indicateurs quantifiables pour fournir une information objective et transposable à d'autres territoires. L'évaluation de ces indicateurs se base sur des valeurs de référence reconnues pour établir des catégories et faciliter ainsi l'interprétation des résultats du travail de modélisation. Le modèle utilisé est PASIM (Graux et al. 2011), qui simule le fonctionnement d'un agroécosystème prairial en réponse aux conditions pédoclimatiques et de gestion. Ainsi, 18 grands groupes de sols ont été décrits au regard de leurs caractéristiques propres et 3 modes de gestion ont été testés : fauche, pâturage ou gestion mixte, correspondent à des pratiques couramment observées sur le secteur d'étude et qui représentent environ 70 % de l'occupation des surfaces agricoles.

## C.4 RESULTATS OBTENUS

*Positionner les résultats par rapports aux livrables du projet et aux publications, brevets etc. Revisiter l'état de l'art et les enjeux à la fin du projet.*

### C.4.1 L'ÉVALUATION BIOPHYSIQUE DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES

#### Le cadre conceptuel proposé

Le modèle conceptuel développé dans le cadre de *Soilserv* (Fossey et al., 2020) (Figure 4) met en relation les SE des sols agricoles avec les enjeux du développement socio-économique. Il est divisé en trois composantes : (i) la composante scientifique (dans la sphère environnementale) qui considère les propriétés intrinsèques et dynamiques du sol ainsi que les processus ; (ii) la composante sociale (dans la sphère anthropocentrique) qui renvoie à des considérations liées au bien-être humain et aux SE ; (iii) enfin, la composante politique (dans la sphère anthropocentrique), qui fait référence à la gouvernance, comprend des considérations liées aux contraintes territoriales, nationales ou mondiales en matière de politique et de planification. Sur la base de cette structure, le modèle suggère une série d'étapes pour procéder à une évaluation biophysique des services écosystémiques et pour les intégrer dans le processus de planification territoriale. Les résultats de ce cadre de modélisation indiquent quel système agricole permet à la fois la plus grande contribution au bien-être humain, compte tenu des objectifs de la planification territoriale, et les plus faibles impacts environnementaux. L'application de ce modèle opérationnel nécessite trois étapes successives et est illustrée dans Fossey et al. (2020) par un exemple dans lequel deux types de sol et trois types de gestion des terres sont considérés. Les SES peuvent ensuite être cartographiés pour soutenir la prise de décision dans le contexte de la planification territoriale.

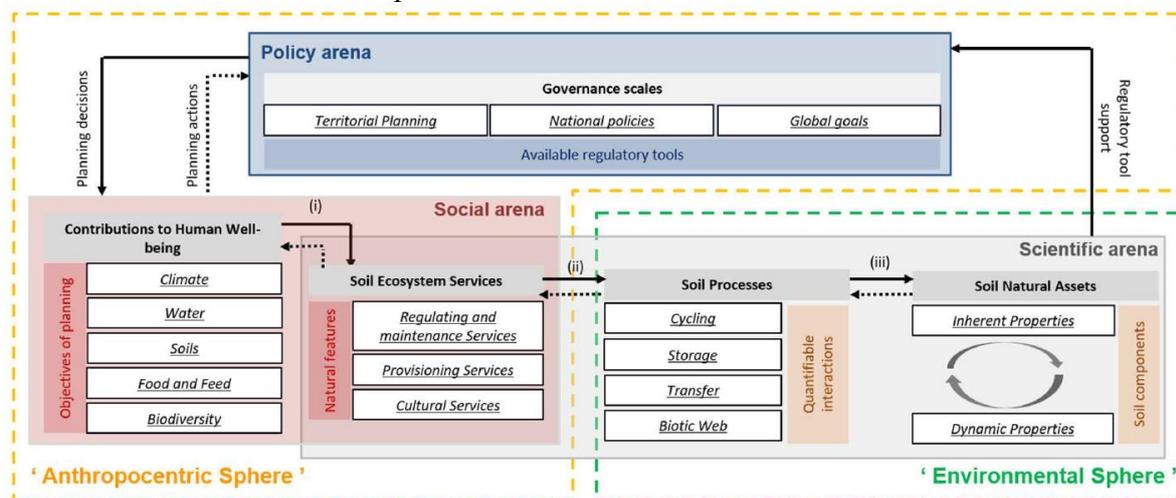


Figure 4 – Le modèle conceptuel reliant les composantes scientifique, sociale et politique de l'évaluation des services écosystémiques des sols (in Fossey et al. 2020)

## La variabilité spatiale et temporelle des SES sur différents territoires

Les services écosystémiques des sols ont été estimés par modélisation sur différents territoires (Tableau 1) de 12 à 1800 km<sup>2</sup> en adaptant le modèle d'évaluation au système de production considéré (cultures annuelles versus prairies), mais en veillant à estimer les différents services écosystémiques de façon homogène à partir des sorties des modèles. L'originalité du travail d'estimation des SES mené dans le cadre de *Soilserv* est de considérer de façon conjointe plusieurs services écosystémiques, dont les interactions peuvent être étudiées, tout en permettant d'analyser l'importance relative de leurs variabilités temporelles (saisonniers, inter-annuelles) et spatiales à différentes échelles (parcelles, exploitations agricoles, petits bassins versants, petites régions agricoles).

Sur le bassin versant de 1200 ha de Naizin (Morbihan), la variabilité temporelle des services écosystémiques des sols, variabilité inter-annuelle en relation avec le climat et les activités agricoles, est importante, et peut parfois être plus importante que la variabilité spatiale, elle-même assez grande dans ce petit bassin versant. Sur ce site où la texture des sols est peu variable, les services dépendent particulièrement de la profondeur du sol et de la teneur en carbone organique du sol. Les services de production, de fourniture d'eau et d'azote dépendent également de la culture considérée. Au regard des services écosystémiques des sols, des groupes de sol peuvent être formés, mais ceux-ci n'apparaissent pas liés à la carte des sols et à la carte d'usages des sols, indiquant que les relations entre propriétés, cartes des sols et services écosystémiques sont complexes.

Sur des territoires plus étendus comme l'Ille-et-Vilaine (Ellili, 2020) ou le territoire de Nantes-St-Nazaire (Fossey et al., 2021), l'importance de la variabilité spatiale des services rendus croît en lien avec la variabilité pédologique plus importante. D'autres propriétés des sols influencent de façon significative les SES, notamment le pH, les caractéristiques texturales et le niveau d'engorgement en eau (Ellili et al., 2021 ; Fossey et al., 2021). Les variabilités spatiale et temporelle des services écosystémiques ne sont pas indépendantes, puisque l'effet de la variabilité inter-annuelle du climat sur les SES peut être tamponné dans le cas de sols profonds à forte réserve hydrique alors que cette variabilité peut induire des variations de SES beaucoup plus importantes dans le cas de sols peu profonds ou sableux.

L'analyse des interactions entre services montre que les services écosystémiques étudiés sont fortement corrélés entre eux à l'exception des services de régulation du climat et de fourniture d'azote à la plante qui présentent de faibles corrélations avec les autres services.

### Les déterminants de la biodiversité des sols

A l'échelle du site de Naizin, les relevés d'abondance et de structure fonctionnelle des différents taxa étudiés montrent que les paramètres qui les influencent sont pour partie communs et pour partie spécifiques. Ainsi, les lombriciens et l'activité-densité des carabes sont positivement influencés par une augmentation de pH et négativement par la compaction du sol, l'hydromorphie influençant spécifiquement l'abondance lombricienne et la diversité des carabes ; a contrario, seuls les lombriciens semblent être influencés par la texture (effet positif d'une texture fine combinée à des éléments grossiers). Les lombriciens et activité-densité des carabes sont aussi fortement influencés par les paramètres agronomiques et notamment ils sont négativement impactés par l'intensification de la rotation culturale sur 6 années induisant une diminution des phases prairiales et une augmentation du nombre de travaux du sol profonds dans la rotation. L'occupation des sols lors du prélèvement ainsi que l'antériorité de la prairie influencent aussi les réponses lombriciennes. Concernant l'effet de la structure paysagère, le premier jeu de données de 2018 suggère un potentiel effet de la proximité immédiate de la prairie sur les larves de taupins, mais pas sur les communautés lombriciennes

; cependant, ces résultats seront affinés par l'intégration des données 2019 (Poggi et al., in prep). Enfin, les mesures d'infiltration indiquent que le service de régulation hydrique est corrélé aux abondances lombriciennes, plus spécifiquement à la catégorie écologique des anéciques.

#### C.4.2 L'INFORMATION PEDOLOGIQUE NECESSAIRE AUX EVALUATIONS BIOPHYSIQUES ET ECONOMIQUES

##### L'amélioration de la résolution spatiale des données d'entrée

Parmi l'ensemble des techniques de désagrégation évaluées pour améliorer la résolution spatiale de l'information pédologique, seule celle qui prend en compte des relations sol/paysage permet d'aboutir à la fois à un changement de format et de support géographique de l'information et à une amélioration substantielle de la qualité des cartes (Ellili et al, 2020 ; Caubet et al 2019 ; Messant A, 2018).

Un cadre d'évaluation indépendant des cartes produites a été proposé sur la base d'attributs du sol qualitatifs d'une part et quantitatifs d'autre part (Ellili et al, 2019). Les jeux de données d'évaluation indépendants constitués ont permis de montrer que les cartes produites par désagrégation spatiale d'unités complexes ont une qualité limitée ( $R^2$ = compris entre 0.41 et 0.65 pour le sable, le pH, et l'argile, inférieur ou égal à 0.28 pour les autres propriétés en Ille-et-Vilaine,  $R^2$ = 0.27 pour l'épaisseur du sol avec DSMART en plaine de Beauce).

##### Le transfert par agrégation spatiale vers les échelles d'intérêt

L'agrégation spatiale des valeurs de carbone organique des sols et du service de de régulation climatique a permis un changement de support géographique sur le site de Naizin, du pixel élémentaire vers la parcelle agricole ou l'exploitation agricole, en explicitant les incertitudes associées (Lamy, 2019). Sur le territoire du Scot Nantes-St-Nazaire, des cas plus complexes d'évaluation de SES, reposant sur plusieurs variables pédologiques, ont été considérés (Bourdellot, 2020). La méthode développée dans cette étude a permis, à partir de données pédologiques existantes, d'évaluer un service écosystémique du sol et les incertitudes associées, et ce à plusieurs échelles de décision : un bassin versant, des communautés de communes et un SCoT. La méthode proposée permet de guider l'acquisition de nouvelles données de terrain afin d'améliorer les estimations des SES aux échelles d'intérêt.

##### L'évaluation microéconométrique de l'effet des propriétés des sols sur les performances des exploitations agricoles

Les travaux de Sodjahin *et al* (2021) et Féménia *et al* (2018, 2019) ont montré qu'il est possible, à partir de la base de données construite dans *Soilserv* associant données comptables et données sur les sols, d'estimer les effets des précédents culturels et de la diversification des systèmes de cultures sur les niveaux de rendements et les utilisations d'intrants des agriculteurs : les caractéristiques des sols impactent significativement les niveaux de rendement, de fertilisation azotée, de désherbage chimique et à un degré moindre d'utilisation de fongicides. Les données « sols » apportent des gains de  $R^2$  de l'ordre de .05 dans des modèles dont les  $R^2$  sont de l'ordre de .60. Elles contribuent donc à accroître significativement la précision des estimations de ces modèles, et ce bien que les données sol utilisées soient peu précises.

Les travaux de Devilliers et Carpentier (2019) et Devilliers (2021) ont permis d'identifier trois types d'itinéraires techniques dans la Marne et les principaux déterminants de leur utilisation, à partir de modèles structurels de choix de technologies latentes définies comme des modèles à chaînes de Markov cachées hétérogènes. Les caractéristiques des sols ont été utilisées *ex post*, pour vérifier que les groupes d'agriculteurs supposés employer des ITK homogènes ne sont

pas des groupes d'exploitations formés à partir des propriétés de leurs sols. De fait, l'examen des données « sols » ne met pas en évidence de différences significatives dans les caractéristiques des sols des exploitations employant les différents ITK identifiés.

#### C.4.3 L'INTEGRATION DE L'EVALUATION DES SES DANS DES CHAINES DE DECISION

##### L'analyse économique de la prise en compte de la qualité des sols et des SES par les agriculteurs

Pour les économistes, la qualité du sol est un capital productif renouvelable sous le contrôle de l'agriculteur. La dégradation de la qualité du sol est potentiellement réversible, et conditionnée par les changements de prix des produits agricoles et de politiques, qui influencent les choix technico-économiques des agriculteurs. La gestion de la qualité des sols par les agriculteurs au cours du temps est analysée théoriquement par un modèle de contrôle optimal, dans lequel la qualité est la capacité du sol à fournir des services écosystémiques intrants. La qualité est supposée décroître avec l'usage d'intrants de synthèse et s'accroître sous l'action de pratiques agricoles coûteuses en travail et équipement.

Issanchou et al. (2019) montrent théoriquement que la dégradation de la qualité des sols est rationnelle sur le plan économique quand l'évolution des rapports de prix est défavorable à la rentabilité de la terre. L'accroissement simultané des prix des productions et des engrais depuis 2006 est susceptible de renverser cette tendance, en favorisant l'investissement dans la qualité du sol par du travail et des équipements, dont le prix n'augmente pas. D'après l'estimation empirique de fonctions de production dans l'Ouest de la France, ni la productivité marginale des engrais, ni celle des pesticides (Bareille & Dupraz, 2020) n'augmentent avec la qualité du sol. Ainsi ces intrants dégradant la qualité sont susceptibles d'être éliminés si leur prix augmente plus vite que celui du travail et des productions. Concernant la fertilisation, Curien et al. (2021) montrent statistiquement que si la baisse de la teneur en matière organique dans les zones d'élevage de plaine est bien imputable à la conversion des prairies permanentes en terres arables, l'épandage de fumier d'herbivores contrecarre cette tendance tandis que les lisiers de granivores l'aggravent.

##### L'intégration des SES dans la planification territoriale

Des travaux de modélisation ont permis de classer les groupes de sols selon leur capacité moyenne à fournir un SES donné sous les conditions de gestion proposées et selon leur sensibilité de fourniture de ce SES en réponse à un changement de gestion. Pour rendre lisible des différences, chaque groupe de sol a été différencié selon quatre catégories de fourniture de SES (classe de valeurs de SES) et de réponse à une variation de mode de gestion (classe de sensibilité des sols) : 1- Fort SES sans potentiel de gain ; 2 - Fort SES avec potentiel de perte ; 3 - Faible SES avec potentiel de gain ; 4 - Faible SES sans potentiel de gain.

La représentation cartographique des SES est un outil complémentaire pour apprécier finement les incidences d'un choix de planification et comparer différents sites d'implantation d'un projet : quel impact aurait l'artificialisation d'un sol pour l'alimentation de la nappe phréatique (par exemple au sein des aires d'alimentation de captages d'eau potable), en fonction de la nature des sols concernés ? Comment les pratiques culturelles influeraient-elles les capacités d'infiltration des sols ?

L'application du projet *SOILSERV* permet donc d'objectiver et d'argumenter les décisions en matière d'aménagement du territoire, à savoir la recherche du meilleur compromis entre développement territorial, bien-être social et préservation des ressources.

## C.5 EXPLOITATION DES RESULTATS

Le projet *Soilserv* a donné lieu à douze articles publiés ou soumis dans des revues scientifiques internationales et à plus de 35 communications scientifiques nationales et internationales. D'autres articles (4) sont en préparation pour être soumis au dernier trimestre 2021.

Un symposium du congrès européen Eurosoil de 2021 a été organisé pour disséminer les résultats et les méthodes mises au point dans ce projet et susciter des collaborations pour la poursuite des travaux. Un numéro spécial de la revue ouverte *Etude et Gestion des Sols* a également été produit pour synthétiser les travaux de recherche menés en France depuis 2016 sur l'évaluation des services écosystémiques dans différents contextes urbains, péri-urbains et agricoles et pour forger une démarche d'évaluation qui soit transversale à ces différents contextes (Eglin et al., 2021).

Par ailleurs, différentes bases de données construites dans les différentes tâches de *Soilserv* ont été produites : (i) bases de données d'estimation des propriétés des sols selon les spécifications du programme international Globalsoilmap ; (ii) bases de données d'évaluation des services écosystémiques des sols sur différents territoires ; (iii) base de données couplant des données économiques et des données sols. Ces bases de données vont être mis à disposition de la communauté scientifique et d'autres utilisateurs et pourront être reprises dans des travaux de recherche ou de planification territoriale. Pour la Bretagne, la diffusion via des webservices est en cours de finalisation sur le visualisateur Sols de Bretagne (<http://geowww.agrocampus-ouest.fr/solsdebretagne/>). Un 'tutoriel' avec le code et explications, organisés en chapitres, est également disponible en ligne (<http://nicolas.saby.pages.mia.inra.fr/Soilserv-dsmart/>).

*Soilserv* a également été un lieu de collaboration avec le monde professionnel, puisque la société SCE, bureau d'étude spécialisée dans les études environnementales, et la collectivité territoriale du pôle métropolitain de Nantes-St-Nazaire, ont été partenaires du projet. Cette collaboration a été centrale pour des points majeurs du projet : la perception des concepts par les acteurs de terrain et leurs attentes en matière de gestion durable des sols, la question de la disponibilité des données, l'évaluation de l'opérationnalité des méthodes d'évaluation des services écosystémiques et la possibilité de les intégrer dans les études réglementaires de planification territoriale. Les bénéfices ont été réciproques pour les acteurs de la recherche et du monde professionnel et permettent d'envisager une transposition plus rapide des méthodes développées dans les études préalables conduites en routine, dont les modalités ont été analysées dans un article conjoint dans la revue professionnelle *Diagonal* en 2021 (Fossey et al., 2021).

En matière de formation, *Soilserv* a bénéficié des contributions scientifiques de 4 thèses et a financé 10 mémoires de fin d'étude de niveau master. Deux formations doctorales ont été organisées en 2019 et 2021 sous l'égide d'Agreenium et avec le soutien des deux écoles doctorales EGAAL de l'Université de Bretagne-Loire et ABIES d'AgroParistech. Cofinancées par *Soilserv*, ces formations doctorales de 3 jours chacune ont été délivrées en anglais et ont touché respectivement 20 et 42 participants essentiellement des doctorants en cours dans diverses disciplines. L'objectif central de ces formations de haut niveau était de présenter les bases conceptuelles et méthodologiques de l'évaluation des services écosystémiques au sein d'espaces agricoles mais aussi péri-urbains, selon une approche pédagogique associant conférences de spécialistes, visite de terrain, travaux pratiques et table ronde.

Enfin, un effort significatif de vulgarisation scientifique a été fourni notamment à travers 5 conférences grand public, mais aussi à travers un dossier de presse de l'INRAE sur la dégradation des sols. De plus, l'évaluation des stocks de carbone dans les sols dans un

territoire (Ellili et al., 2019) et la publication du cadre conceptuel d'évaluation des SES (Fossey et al., 2020) ont été retenus comme des faits marquants du département AgroEcosystem de l'INRAE respectivement en 2019 et en 2020.

## C.6 DISCUSSION

### Le cadre conceptuel d'évaluation des services écosystémiques

En combinant les approches biophysiques et en reliant les termes environnementaux et anthropocentriques, le cadre d'évaluation fournit l'holisme requis dans l'approche des SE, en intégrant de multiples modes (c'est-à-dire hiérarchique, scientifico-technique et collaboratif adaptatif) et échelles (c'est-à-dire production et partage de connaissances verticales et horizontales et intégration des politiques) pour la gouvernance des SE. Parce qu'il est basé sur le sol, le cadre contribue aux connaissances émergentes sur la façon dont les SE fournis par les systèmes agricoles dépendent des caractéristiques intrinsèques et dynamiques du sol en évaluant l'hypothèse vérifiable selon laquelle il existe des combinaisons optimales de type de sol/utilisation des terres qui maximisent les SE du sol.

### Les déterminants de la biodiversité

L'acquisition de données nouvelles sur la biodiversité des sols et leur analyse par fouille de données a permis d'identifier à l'échelle du bassin-versant les paramètres influençant les abondances, biomasses et structures fonctionnelles des organismes fournisseurs de services et disservices écosystémiques. Par ailleurs, pour les communautés lombriciennes, ce travail a confirmé l'importance des paramètres de texture et de pH préalablement identifiés à l'échelle européenne (Rutgers et al., 2021) quelle que soit l'échelle d'investigation. Il a également permis d'identifier l'importance de la densité apparente et de l'état d'hydromorphie, non révélé à l'échelle européenne. Enfin, les paramètres agronomiques influençant les lombriciens ont été affinés à travers l'importance des prairies et du travail du sol (sa fréquence et sa profondeur) dans les rotations culturales (Pérès et al., 2021).

L'identification des principaux facteurs de milieu et de pratiques agissant sur les organismes fournisseurs de services et disservices écosystémiques, est une étape clé pour proposer des leviers permettant le maintien, la restauration ou l'amélioration de cette composante du sol. Parmi ces leviers, l'introduction de prairies (nombre d'années, continuité) dans les rotations ou dans l'organisation paysagère a été identifiée comme ayant un effet important sur les organismes étudiés. Une caractérisation plus fine des itinéraires techniques (type, quantité et fréquences d'apports de phytosanitaires, de fertilisants et/ou d'amendements) apporterait une réelle plus-value pour affiner ces leviers. Par ailleurs, la mise en relation des organismes fournisseurs de services et ceux fournisseurs de disservices serait à approfondir et à pondérer en fonction des services visés (conservation de la biodiversité, régulation des pathogènes, régulation hydrique, production de biomasse).

### L'évaluation biophysique des services écosystémiques

Les travaux menés soulignent la grande difficulté à aborder les services écosystémiques à partir d'observations, y compris dans les sites très riches d'observations : la dynamique des propriétés des sols est lente, trop lente pour servir d'alerte. La modélisation est un outil efficace, cependant limité par les services qu'elle peut prendre en compte. Elargir la gamme de services modélisés serait un enjeu important. L'évaluation des services écosystémiques des sols, se fait en référence à des états passés ou à venir, ils sont dépendants des usages des sols. Les services écosystémiques d'approvisionnement dépendent étroitement du couple sol-culture : la capacité d'un sol à fournir de l'eau et de l'azote pour la production agricole dépend en premier lieu des types de cultures. On ne pourra pas définir de fertilité des sols, sans

considérer la culture elle-même. De même, cette fertilité variera dans le temps, en fonction notamment de conditions climatiques et météorologiques variables. Pour les services de régulation de l'eau et du climat, certaines propriétés sont déterminantes comme la profondeur du sol, la teneur en carbone organique du sol, sans cependant en faire les seules propriétés déterminantes. Ces services de régulation sont une fonction complexe d'un ensemble de propriétés. Les cartes des sols et des usages des sols ne sont donc pas directement utilisables ou superposables, pour estimer les services écosystémiques des sols. Un travail d'extraction des propriétés des sols, puis d'implémentation dans un modèle est la démarche la plus précise, bien qu'elle apparaisse encore très complexe (prise en main des outils de modélisation, constitution des bases de données...). Déployer des outils plus simples de type métamodèle pourrait constituer un compromis. Les propriétés des sols et du milieu sont estimées ici à l'échelle locale et le travail de modélisation pourraient être déployé à d'autres échelles, pourvues d'une information de qualité sur ces propriétés.

### L'amélioration des données d'entrée

Les procédures de désagrégation spatiale d'unités cartographiques complexes ont permis d'améliorer la résolution spatiale des données pédologiques, même si la qualité des résultats reste limitée quand ils sont évalués par des jeux de points. Des évaluations à des niveaux plus agrégés montreraient probablement des degrés de concordance plus élevés entre les estimations et la réalité, mais la difficulté est de disposer de tels jeux de données. Les procédures développées pourraient tout à fait être adaptées à d'autres contextes dans l'avenir. Les résultats montrent que l'outil choisi pour désagréger les unités cartographiques complexes, DSMART, a un potentiel relativement limité pour améliorer la résolution des cartes, à moins de consentir à un effort important pour bâtir les règles de relation sol/paysage. Les alternatives testées ne se sont pas avérées plus performantes. La méthode de statistiques multipoints a été envisagée mais non mise en œuvre au cours du projet faute de temps et surtout de compétences. Elle reste une voie à explorer en parallèle des techniques de krigeage basées sur des données surfaciques (area to point).

### Le couplage avec les données économiques

L'utilisation de données décrivant les sols à une échelle fine s'avère très utile pour la modélisation micro-économétrique des choix de production agricole : en particulier, des résultats originaux ont été obtenus sur la mesure des effets des précédents culturels et des systèmes de cultures sur les niveaux de rendement et d'utilisation d'intrants ainsi que pour l'identification d'ITK latents et de leurs effets. Les données « sols » ont permis de donner des bases statistiques solides à ces résultats en permettant d'améliorer la précision d'estimation et/ou de s'assurer que les effets mesurés sont bien ceux visés.

Les effets estimés des caractéristiques des sols sur les performances et les choix de production agricole, ne rendent cependant qu'imparfaitement compte des SES pour la production agricole. En effet, l'interprétation de ces effets reste difficile. Ces derniers peuvent capter les effets des sols mais également ceux de techniques de production non observées (dans les données disponibles), dont celles relatives au travail du sol. En outre, si les effets estimés sont souvent significatifs d'un point de vue statistique, leurs impacts économiques sont relativement limités. Ceci s'explique en partie par la taille relativement réduite de la zone d'étude, très centrée sur la Champagne crayeuse. L'hétérogénéité limitée des sols au sein de cette zone ne permettait pas la mise en évidence de SES de grande ampleur. De même, les travaux menés ne concernaient que les niveaux de rendement et d'utilisation d'intrants. Or, les caractéristiques des sols ont également des impacts, peut-être plus importants, sur les choix d'assolement des agriculteurs, ce qui est révélateur d'autres types de SES.

Néanmoins, ces résultats suggèrent que les modèles micro-économétriques de choix de production agricole pourraient être substantiellement améliorés par des données « sols » de nouvelle génération, et ce d'autant plus que ces modèles concernent de grandes aires géographiques et, probablement, les choix d'assolement des agriculteurs (en lien avec leurs choix de systèmes de cultures).

### L'analyse économique de la prise en compte des SES par les agriculteurs

L'analyse économique a démontré grâce à des données inter-temporelles que la dégradation des sols et de leurs services écosystémiques n'est pas une fatalité, avec un effet significatif de la diversification des assolements et de la fertilisation organique par exemple. Les causes du redressement du taux de matière organique dans les sols du grand bassin parisien depuis les années 2000, en l'absence d'élevage, seraient intéressantes à explorer. La modélisation économique agronomique intégrée de la matière organique du sol reste néanmoins un défi méthodologique.

### La prise en compte des SES dans la planification territoriale

L'analyse des SES dans la planification territoriale s'inscrit comme une information nouvelle dans une évaluation multicritère déjà complexe. Il reviendra alors aux décideurs, et aux urbanistes qui les conseillent, de les prendre en compte. Le rôle des SES dans les processus de planification reste à définir. 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 »). On peut y voir une confirmation de la reconnaissance croissante des services écosystémiques 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 des projets d'aménagement.

La méthode proposée mobilisant des outils de modélisation dynamique du fonctionnement du sol reste chronophage et peu aisée pour des non-initiés (modèles PASIM et Stics). Une des perspectives de reproductibilité évoquée mais non testée dans le cadre du projet serait d'utiliser des proxys. A travers ces réflexions, il s'agit avant tout d'une acculturation des acteurs de territoire : les indicateurs SES viennent s'inscrire comme une information supplémentaire dans un processus d'évaluation multicritère déjà complexe pour les décideurs.

Fondée sur l'objectif du « moindre impact environnemental », la séquence « éviter, réduire, compenser » est devenue l'instrument réglementaire majeur pour concilier développement et préservation de l'environnement dans les documents d'urbanisme. Ainsi, en complément d'autres outils déjà disponibles, la prise en compte des services écosystémiques peut être un argument pour orienter les choix : d'une part, l'information qualitative proposée permet de comparer les impacts et de justifier le projet de « moindre impact environnemental » au regard des enjeux plus prégnants sur le territoire ; d'autre part, l'information quantitative permettrait d'apporter des données mesurables pour la mise en place, le cas échéant, de mesures compensatoires inhérentes au dernier point de la séquence ERC. A ce titre, l'objectif de Zéro Artificialisation Nette (ZAN) pourrait présenter un terrain d'application intéressant.

## CONCLUSIONS

En conclusion, le projet *Soilserv* était un projet ambitieux et novateur, sur le sujet des services écosystémiques dont le cadre conceptuel et les méthodes d'approche ont fortement évolué depuis le début du projet en lien avec la vigueur de la recherche internationale sur ce thème. *Soilserv* était fondé sur une collaboration multidisciplinaire, qui a supposé l'acquisition d'une culture et d'un vocabulaire communs ayant nécessité en amont de nombreux échanges entre les membres du projet. Il reposait également sur un pari d'arriver à affiner le cadre conceptuel d'évaluation, d'acquérir ou d'améliorer les données permettant une évaluation des services et d'évaluer l'intérêt de ces évaluations dans des processus de décision, au sein d'un même programme. Les résultats conséquents obtenus par le projet s'expliquent notamment par le travail collaboratif étroit qui s'est instauré entre les équipes du projet (9 séminaires ont été organisés réunissant tous les acteurs de *Soilserv*) et a permis des mises au point et des avancées communes.

Le projet confirme aussi l'intérêt d'une évaluation des services écosystémiques des sols qui aille au-delà de l'évaluation classique des fonctions des sols habituellement conduite, car elle permet d'intégrer dans la démarche les attentes actuelles et futures des bénéficiaires des services écosystémiques. Ces travaux ouvrent des perspectives de progrès importants sur la connaissance et la gestion des sols.

## C.7 REFERENCES CITEES (VOIR AUSSI LA LISTE DES PUBLICATIONS DU PROJET)

- Bareille, F., & Dupraz, P. (2020). Productive Capacity of Biodiversity: Crop Diversity and Permanent Grasslands in Northwestern France. *Environmental and Resource Economics*, 77(2), 365-399.
- Brisson, N., Launay, M., Mary, B., Beaudoin, N., 2008. Conceptual basis, formalizations and parametrization of the STICS crop model, *Editions Quae*.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., (1997). "The value of the world's ecosystem services and natural capital." *Nature* 387: 253.
- Curien, M., Issanchou, A., Degan, F., Manneville, V., Saby, N.P. and Dupraz, P., 2021. Spreading herbivore manure in livestock farms increases soil carbon content, while granivore manure decreases it. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(2), pp.1-13.
- EFESE-EA. 2017 - Rapport scientifique de l'étude réalisé par l'INRA-volet « écosystèmes agricoles » de l'Évaluation Française des Ecosystèmes et des Services Écosystémiques, 970 p.
- European Commission. 2020 - Mission area: Soil health and food. [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/research\\_and\\_innovation/funding/documents/ec\\_rtd\\_mission-soil-citizens-summary\\_fr.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/research_and_innovation/funding/documents/ec_rtd_mission-soil-citizens-summary_fr.pdf), consulté le 29 juin 2021
- FAO, 2018. The future of food and agriculture - Alternative pathways to 2050. Rome. 224p
- 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.
- IPBES (2018). "Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services." Retrieved last accessed 05 april 2018, from <https://www.ipbes.net/outcomes>.
- Issanchou, A., Daniel, K., Dupraz, P., & Ropars-Collet, C. (2019). Intertemporal soil management: revisiting the shape of the crop production function. *Journal of Environmental Planning and Management*, 62(11), 1845-1863.
- Kibblewhite, M. g, Ritz, K., Swift, M. j, 2008. Soil health in agricultural systems. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 363, 685–701. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>
- Maes et al. 2016 - An indicator framework for assessing ecosystem services in support of the EU Biodiversity Strategy to 2020. *Ecosystem Services*, vol.17 (14-23).

- Mulder, V.L., Lacoste, M., Richer-de-Forges, A.C., Arrouays, D. 2016 - GlobalSoilMap France: High-resolution spatial modelling the soils of France up to two meter depth. *Science of the Total Environment*. 573, 1352–1369.
- Openshaw, S. & Pumain, D. 1981. Le Problème De L'agrégation Spatiale En Géographie. *L'Espace géographique* 10(1), 15–24.
- Parlement européen – 2021. Résolution du Parlement européen du 28 avril 2021 sur la protection des sols (2021/2548(RSP)), [www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0143\\_FR.pdf](http://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0143_FR.pdf)
- Paroissien JB., Degan F., Perrot C., Philibert A., Saby N.P.A., Martin M., Gouny, L., Dupraz, P. (in review) Évolution des teneurs en carbone organique dans les régions d'élevage en France entre 1990–2014
- Pérès G., Benard Y., Fossey M., Plantegenest M., Walter C. 2021. Key drivers of earthworm community distribution at landscape scale and ecosystem service associated. ICSZ conference, 16-21 August, Italy. Poster presentation
- Phillips, H.R.P., Guerra, C.A., Bartz, M.L.C., Briones, M.J.I., Brown, G., Crowther, T.W., Ferlian, O., Gongalsky, K.B., Hoogen, J. van den, Krebs, J., Orgiazzi, A., Routh, D., ... Eisenhauer, N., 2019. Global distribution of earthworm diversity. *Science* 366, 480–485. <https://doi.org/10.1126/science.aax4851>
- Rutgers, M., Orgiazzi, A., Gardi, C., Römbke, J., Jänsch, S., Keith, A.M., Neilson, R., Boag, B., Schmidt, O., Murchie, A.K., Blackshaw, R.P., Pérès, G., Cluzeau, D., Guernion, M., Briones, M.J.I., Rodeiro, J., Piñeiro, R., Cosín, D.J.D., Sousa, J.P., Suhadolc, M., Kos, I., Krogh, P.-H., Faber, J.H., Mulder, C., Bogte, J.J., Wijnen, H.J. van, Schouten, A.J., Zwart, D. de, 2016. Mapping earthworm communities in Europe. *Appl. Soil Ecol., Soil biodiversity and ecosystem functions across Europe: A transect covering variations in bio-geographical zones, land use and soil properties* 97, 98–111. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.08.015>
- Stephan Gay & Geertrui Louwagie & Frank Sammeth & Tomas Ratering & Brechje Marechal & Paolo Prospero & Ezio Rusco & Jean Terres & Marijn van der Velde & David Baldock & Catherine Bowyer & Tamsin Coope, 2009. "Final Report on the Project 'Sustainable Agriculture and Soil Conservation (SoCo)'," JRC Working Papers JRC51775, Joint Research Centre (Seville site)

## D LISTE DES LIVRABLES

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
36	<b>T1.1</b>	Evaluation multi-échelle des SES sur un site à forte densité d'observation	Bases de données, thèse, publications	Resp. <u>C. Gascuel et A. Jaffrezic</u> (UMR SAS) UMR SAS : C. Bustany, C. Cudennec, P. Durand, G. Peres, D. Michot, S. Menasserri, M. Plantegenest, Z. Thomas, C. Walter UMR IGEPP : M. Plantegenest	Travail de thèse de C. Bustany et bases de données sur l'ORE Aghrys. Etude focalisée sur le site de l'ORE Aghrys
12-24	<b>T.1.2.1</b>	Evaluation de la biodiversité de sols à plusieurs échelles	Données de campagnes de terrain	Resp. <u>G. Peres (UMR SAS) et M. Plantegenest (UMR IGEPP)</u> UMR SAS : C. Bustany, 2 masters (M. Rubio Dorantes, P. Maigning) UMR IGEPP : Y. Laurent, S. Poggi, R. Lecoite, 2 masters (T. Gayard, A. Delaplace)	Plusieurs campagnes de prélèvement ont été réalisées sur des parcelles agricoles du bassin versant de Naizin (3 campagnes en 2018, 1 en 2019) ; en fonction des campagnes, entre 20 et 120 points ont été échantillonnés. Les campagnes ont permis de renseigner la biodiversité des sols, les propriétés physico-chimiques et les usages des sols.
24	T.1.2-2	Evaluation de la biodiversité de sols à plusieurs échelles	Bases de données	Resp. <u>G. Peres (UMR SAS) et M. Plantegenest (UMR IGEPP)</u> UMR SAS : C. Bustany, 2 masters (M. Rubio Dorantes, P. Maigning) UMR IGEPP : Y. Laurent, S. Poggi, R. Lecoite, 2 masters (T. Gayard, A. Delaplace)	A l'issue de chaque campagne, une base de données a été construite et amendée annuellement pour 3 taxa (lombriciens, larves de taupin, carabes) ; cette BDD renseigne différents critères (abondance et biomasse, structure fonctionnelle et structure spécifique). De plus, cette BDD a été complétée par des données de biomasse microbienne et d'infiltration issues d'une campagne de terrain (mars 2018). Cette BDD "biodiversité" est associée aux données physico-chimiques et agronomiques des points échantillonnés
12-36	T.1.2_3	Evaluation de la biodiversité de sols à plusieurs échelles	cartographies	Resp. <u>G. Peres (UMR SAS) et M. Plantegenest (UMR IGEPP)</u> UMR SAS : 1 masters Rubio Dorantes M, UMR IGEPP : S. Poggi, R. Lecoite, 1 master (A. Delaplace)	des cartographies de distribution de différents taxa ont été produites à l'échelle du bassin versant : lombriciens et larves de taupins
12-24-36	T.1.2_4	Evaluation de la biodiversité de sols à plusieurs échelles	modélisation	Resp. <u>G. Peres (UMR SAS) et M. Plantegenest (UMR IGEPP)</u> UMR SAS : 2 masters Rubio Dorantes M, P. Maigning	*Les modèles de distribution de différents taxa (lombriciens, larves de taupins, carabes) ont été créés au regard des propriétés des sols, des usages des sol et des interactions trophiques afin

				UMR IGEPP : S. Poggi, R. Lecointe, 2 masters (T. Gayard, A. Delaplace)	d'identifier : i) les paramètres majeurs influençant les réponses biologiques, ii) l'effet de la proximité prairiale
en cours	T1.2_4	Evaluation de la biodiversité de sols à plusieurs échelles	Publication	Resp. <u>G. Peres (UMR SAS) et M. Plantegenest (UMR IGEPP)</u> UMR IGEPP : S. Poggi, R. Lecointe, 1 master (A. Delaplace)	1 article est en préparation  1 poster au colloque international ICZS
24	T.1.3	Un cadre d'évaluation des SES rendus par les sols agricoles	Publications Fossey et al. 2020 et Eglin et al., 2021	<u>Resp. D. Angers (CRDQ), C. Walter (UMR SAS) : M. Fossey, Angers D, Bustany C, Cudennec C, Durand P, Gascuel-Odoux C, Jaffrezic A, Pérès G, et Walter C</u> SCE : C. Besse	Expertise collective et post-doctorat de M. Fossey Numéro spécial de la revue Etude et Gestion des Sols sur les services écosystémiques
	<b>T2.1</b>	Estimation avec une résolution améliorée des propriétés du sol et des incertitudes associées à partir de jeux de données existants	Bases de données, code R, cartographies, thèse, publications	<u>Resp. : B. Lemerrier (UMR SAS), N. Saby (US Infosol)</u> US Infosol : D. Arrouays, M. Caubet, A Richer de Forges, G. Girot, S. Chen UMR SAS : Y. Ellili, G. Peres, D. Michot, C. Walter	Travail de thèse de Y. Ellili
2017-2020	T 2.1_1	Procédure pour augmenter la résolution spatiale des cartes pédologiques		Idem	Une méthode unique (désagrégation spatiale d'unités complexes) a été testée sur deux sites, la procédure envisagée visant à choisir la méthode la plus adaptée au contexte n'avait plus d'objet. La procédure DSMART est proposée dans le livrable suivant et dans les publications.
Janvier 2021	T2.1_2	Tutoriel R pour l'utilisation de l'algorithme DSMART avec les données françaises IGCS	Code R avec données et exemples	Idem	Tutoriel pour l'utilisation de l'algorithme 'DSMART' de cartographie numérique avec les données IGCS
2018-2021	T2.1_3	Publications sur la désagrégation spatiale des informations sur les sols	Articles, oral présentations	Idem	Articles : : Ellili-Bargaoui et al., 2019; Ellili-Bargaoui et al., 2020 ; Chen et al., 2021 Conférences internationales : Ellili et al., 2018 ; Caubet et al., 2019 ; Ellili et al., 2019
2018 et 2020	T2.1_4	Campagnes de terrain dans la Plaine de Beauce et en Ile-et-Vilaine	Bases de données,	Idem	Pour 145 points en Ile-et-Vilaine et 90 points en Plaine de Beauce, des bases de données spatiales et sémantiques ont été créées regroupant des informations sur la description morphologique des sols et des propriétés physico-chimiques, ainsi que des photographies.
2019-2021	T2.1_5	Prédiction spatiale des propriétés du sol et		Idem	Voir livrables T2.2

		incertitudes associées pour le bassin versant de Naizin			
Abandonné	T2.1_6	Prédiction spatiale des propriétés des sols et incertitudes pour les sites de Pleine-Fougères et Villamblain		Idem	Les deux sites en question ont été abandonnés en cours de projet.
2019-2021	<b>T2.2</b>	Transférer les informations sur le sol à une résolution et un format adéquats	Cartographies, publications	Resp. : <u>M. Martin (US Infosol)</u> US Infosol : N. Saby, D. Arrouays, G. Girot UMR SAS : Y. Ellili, B. Lemerrier, D. Michot, C. Walter	
2019-2021	T2.2_1	Rapport sur la méthodologie de changement d'échelle		Idem	up-scaling : rapports stage M2 E. Lamy, S. Bourdellot.
2019-2020	T2.2_2	Jeux de données de prédiction des propriétés du sol au niveau communal pour la tâche T2.3	Base de données	Idem	Transmis en cours de projet à la tâche 2.3
2019-2020	T2.2_3	Jeux de données de prédiction des propriétés des sols à des échelles sélectionnées pour Naizin, pour Pleine-Fougères et Villamblain	Bases de données	Idem	Fait pour Naizin et le SCOT Nantes Saint-Nazaire. , les autres sites ayant été abandonnés en cours de projet
En préparation	T2.2_4	Publication sur les erreurs de propagation lors du transfert d'échelle		Idem	
2017-2021	<b>T.2.3</b>	Micro-econometric estimation of the impacts of soil properties on agricultural production performances	Bases de données, thèse, publications	Resp. <u>A. Carpentier (UMR SMART)</u> UMR SMART : F. Féménia, Esther Devilliers UMR SAS : B. Lemerrier	Thèse d'Esther Devilliers
	T2.3_1	Mise en forme de la base de données sols communales	Bases de données	Idem	Adaptation des données de la tâche T2.2_2
36	T2.3_2	Rapport sur un outil analytique permettant d'incorporer des informations sur le sol et le climat dans les modèles micro-économétriques	Rapport d'étude	Idem	
48	T2.3_3	Publication on economic value	Articles	idem	

		on soil ecosystem production services			
2017 et 2020	<b>T.3.1</b>	Application à la gestion agricole : analyse microéconomique des facteurs de gestion des sols par les agriculteurs.	Thèse, publications	Resp. <u>P. Dupraz (UMR SMART)</u> UMR SMART : A. Issanchou C. Ropars UMR SAS : S. Menasseri, C. Walter	Thèse d'A. Issanchou puis post-doc d'A. Issanchou
2018-2019	<b>T.3.2</b>	Application à la planification territoriale : prise en compte des services écosystémiques des sols dans les processus de planification	Bases de données, cartographie (SIG), publications, supports de présentation	Resp. <u>C. Besse (SCE)</u> SCE : M. Fossey, C. Von Fischer, C. Besse UMR SMART : P. Dupraz Pôle métropolitain : S. Bois UMR SAS : C. Walter	Travail de post-doc de M. Fossey

## E IMPACT DU PROJET

*Ce rapport rassemble des éléments nécessaires au bilan du projet et plus globalement permettant d'apprécier l'impact du programme à différents niveaux.*

### E.1 INDICATEURS D'IMPACT

#### **Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)**

		<b>Publications multipartenaires</b>	<b>Publications monopartentaires</b>
<b>International</b>	<b>Reuves à comité de lecture</b>	3	8
	<b>Ouvrages ou chapitres d'ouvrage</b>		
	<b>Communications (conférence)</b>	8	18
<b>France</b>	<b>Reuves à comité de lecture</b>	1	
	<b>Ouvrages ou chapitres d'ouvrage</b>	1	
	<b>Communications (conférence)</b>	2	7
<b>Actions de diffusion</b>	<b>Articles vulgarisation</b>	1	1
	<b>Conférences vulgarisation</b>		5
	<b>Autres</b>	Tutoriel d'utilisation d'algorithmes sous forme de livre en ligne	

#### **Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)**

*Ce tableau dénombre et liste les brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet, du savoir faire, des retombées diverses en précisant les partenariats éventuels. Voir en particulier celles annoncées dans l'annexe technique).*

	<b>Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)</b>
<b>Brevets internationaux obtenus</b>	-
<b>Brevet internationaux en cours d'obtention</b>	-
<b>Brevets nationaux obtenus</b>	-

<b>Brevet nationaux en cours d'obtention</b>	-
<b>Licences d'exploitation (obtention / cession)</b>	-
<b>Créations d'entreprises ou essaimage</b>	-
<b>Nouveaux projets collaboratifs</b>	2021 – Projet européen de l'EJP SOIL - SERENA
<b>Colloques scientifiques</b>	Session <i>Soil ecosystem assessment: biophysical assessment and economical valuation</i> au colloque européen EUROSIL, août 2021
<b>Autres (préciser)</b>	Organisation de deux écoles doctorales en 2018 et 2021 : <i>Assessment of soil ecosystem services in agricultural and periurban areas</i>

## E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Les articles/ouvrages/communications multi-partenaires sont précédés d'une \*.

Les conférences invitées sont précédées d'un #

### E.2.1 ARTICLES DANS DES REVUES INTERNATIONALES A COMITE DE LECTURE

#### Articles publiés ou acceptés

BAREILLE, F. AND DUPRAZ, P., 2020. Productive Capacity of Biodiversity: Crop Diversity and Permanent Grasslands in Northwestern France. *ENVIRONMENTAL AND RESOURCE ECONOMICS*, 77(2), pp.365-399.

CHEN, SC, RICHER-DE-FORGES, AC, MULDER, VL, MARTELET, G, LOISEAU, T, LEHMANN, S, ARROUAYS, D. 2021. Digital mapping of the soil thickness of loess deposits over a calcareous bedrock in central France. *Catena*, 198, 10.1016/j.catena.2020.105062

\*CURIEN, M., ISSANCHOU, A., DEGAN, F., MANNEVILLE, V., SABY, N.P. AND DUPRAZ, P., 2021. Spreading herbivore manure in livestock farms increases soil carbon content, while granivore manure decreases it. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(2), pp.1-13. doi : 10.1007/s13593-021-00682-3

ELLILI Y., C. WALTER, B. LEMERCIER, D. MICHOT, P. PICHELIN 2019 - Mapping soil organic carbon stock change by soil monitoring and digital soil mapping at the landscape scale. *Geoderma*, 351(1-8), <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.005>

\* ELLILI BARGAOUI Y. , WALTER C, MICHOT D., SABY N., VINCENT S., LEMERCIER B. 2019 - Validation of digital maps derived from spatial disaggregation of legacy soil maps. *Geoderma*, 356, pp.113-907, <https://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113907>

\* FOSSEY M, ANGERS D, BUSTANY C, CUDENNEC C, DURAND P, GASCUEL-ODOUX C, JAFFREZIC A, PÉRÈS G, BESSE C AND WALTER C (2020) - A Framework to Consider Soil Ecosystem Services in Territorial Planning. *Front. Environ. Sci.* 8:28. doi: 10.3389/fenvs.2020.00028

ELLILI-BARGAOUI Y. MALONE B., MICHOT D., MINASNY B., VINCENT S., WALTER C., LEMERCIER B. 2020 - Comparing three approaches of spatial disaggregation of legacy soil maps based on the Disaggregation and Harmonisation of Soil Map Units Through Resampled Classification Trees (DSMART) algorithm. *SOIL*, 6, 371-388, <https://doi.org/10.5194/soil-6-371-2020>

ELLILI-BARGAOUI Y., WALTER C., MICHOT D., LEMERCIER B., 2020 - Mapping soil properties at multiple depths from disaggregated legacy soil maps in the Brittany region, France,

ELLILI-BARGAOU Y, WALTER C., LEMERCIER 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.

ISSANCHOU, A., DANIEL, K., DUPRAZ, P. AND ROPARS-COLLET, C., 2018. Intertemporal soil management: revisiting the shape of the crop production function. *Journal of Environmental Planning and Management*, 62(11), pp.1845-1863.

### Articles en révision ou soumis avant juin 2021

SODJAHIN, I., FEMENIA, F., KOUTCHADÉ, O.P. AND CARPENTIER, A., 2021. Estimation of pre crop and cropping system effects based on farm accountancy data. Submitted to the *European Review of Agricultural Economics*.

### Articles en préparation

DEVILLIERS, E., CARPENTIER, A., 202#. Addressing regressor endogeneity in endogenous regime switching models: a double control function approach. To be submitted in *Economic Letters*

DEVILLIERS, E., CARPENTIER, A., O.P. KOUTCHADE, 202#. Crop production models with latent crop management practice choices : uncovering low-input practices in French wheat production. To be submitted in the *American Journal of Agricultural Economics*

TABAUD L., WALTER C., BLANCFENE C., GASCUEL C., LEMERCIER B., PICHELIN P., MICHOT D. 202#. Uncertainties in measurements of organic carbon and nitrogen stocks in agricultural soils. To be submitted in *Soils*

### E.2.2 OUVRAGE OU CHAPITRES D'OUVRAGE

### E.2.3 CONFERENCES INTERNATIONALES

\*ANGERS D., WALTER C. Les services écosystémiques rendus par les sols. *Colloque de l'Association québécoise de Science du Sol (AQSSS), 18 septembre 2015, Université Laval, Québec.*\*\*

BAREILLE, F., DUPRAZ, P. Biodiversity Productive Capacity in Mixed Farms of North-West France: A Multi-Output Primal System, 2016. *149th EAAE Seminar 'Structural change in agri-food chains: new relations between farm sector, food industry and retail sector', Rennes, (2016-10-27 - 2016-10-28),*

BAREILLE, F., DUPRAZ, P. Biodiversity Productive Capacity in Mixed Farms of North-West France: A Multi-Output Primal System, 2017. *15th EAAE Congress "Towards sustainable agri-food system: balancing between markets and society", Parma, (2017-08-29 - 2017-09-01).*

\*CAUBET M., MESSANT A., GIROT G., LEMERCIER B., MARTELET G., WALTER C., ARROUAYS D., RICHER-DE-FORGES A., SABY N.P.A, *Mapping of soils and there properties using legacy soil data, GSM-DSM conference, 12-15 march 2019, Santiago del Chili, Chili*

DEVILLIERS, E., CARPENTIER, A., 2019. Recovering cropping management practices specific production functions: clustering and latent approaches. *Selected presentation at the AES Annual Conference, University of Warwick, April 15th to 17th 2019.*

DEVILLIERS, E., CARPENTIER, A., 2019. Recovering cropping management practices specific production functions: clustering and latent approaches. *Selected presentation at the 8th PhD workshop of the European Association of Agricultural Economists, Uppsala, June 10th to 12th, 2019.*

DEVILLIERS, E., MÖHRING, N., FINGER, R., 2020. Estimation of production functions in low- and high-input farming systems. *Selected presentation at the Triennial Congress of European Association of Agricultural Economists, Prague, 2020 (postponed to July 2021).*

DEVILLIERS, E., MÖHRING, N., FINGER, R., 2020. Estimation of production functions in low- and high-input farming systems. *Selected presentation at the AES Annual Conference, University of Leuven, April 15th to 17th 2020.*

ELLILI Y. ., C. WALTER, D. MICHOT, P. PICHELIN, B. LEMERCIER. 2017 Assessment of soil ecosystem services at landscape scale by direct soil monitoring and modelling. *Pedometrics Conference, Wageningen, Netherlands. 26 June-July 1<sup>st</sup> 2017*\*\* (hal-03161129)

ELLILI Y., WALTER C., MICHOT D., LEMERCIER B. 2018 - Validation of regional soil property maps derived from spatial disaggregation of legacy soil maps. *European Geophysical union, Vienna, 9th April to 13th April, 2018*

ELLILI Y., C. WALTER, D. MICHOT, AND B. LEMERCIER. 2019 - How does digital soil information source affect soil ecosystem services assessment? *EGU General Assembly 2019, Geophysical Research Abstracts, Vol. 21, EGU2019-13803, 2019*  
<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/EGU2019-13803.pdf>

\* ELLILI Y, C. WALTER, D. MICHOT, N. SABY, S. VINCENT, B. LEMERCIER 2019 - Validation of digital maps derived from spatial disaggregation of legacy soil maps. *Pedometrics 2019, June 2-6 2019, University of Guelph, Canada\**

FEMENIA, F., CARPENTIER, A., GOHIN, A. AND SODJAHIN, I., 2021. Estimation of crop rotation effects based on farm accountancy data. *Selected presentation at the Triennial Congress of European Association of Agricultural Economists, Prague, July, 2020 (postponed to July 2021).*

FEMENIA, F., CARPENTIER, A., GOHIN, A. AND SODJAHIN, I., 2019. Estimation of crop rotation effects based on farm accountancy data. *Selected presentation at the 8<sup>th</sup> PhD workshop of the European Association of Agricultural Economists, Uppsala, June 10-12, 2019.*

FEMENIA, F., CARPENTIER, A., GOHIN, A. AND SODJAHIN, I., 2019. Estimation of crop rotation effects based on farm accountancy data. *Selected presentation at the European Conference on Crop Diversification ECCD, Budapest, September 18-21, 2019.*

FEMENIA, F., CARPENTIER, A., GOHIN, A. AND SODJAHIN, I., 2018. Using farm accountancy data to estimate crop rotation effects. *Selected presentation at the Triennial Congress of International Conference of Agricultural Economists ICAE, Vancouver, July 28 to August 2, 2018.*

\*FOSSEY M; BUSTANY C., ANGERS D., DUPAS R., DURAND P., GASCUEL C., JAFFREZIC A., PERES G., WAROT G., BOIS S., WALTER C.. 2018 - Agricultural systems as ecosystem service providers: from conceptual framework to operational tools in territory planning. *Ecosystem services partnership European Conference, San Sebastian, Espagne, 6-8 octobre 2018, \*\**

ISSANCHOU, A., DANIEL, K., DUPRAZ, P., 2018. Soil resources and the profitability and sustainability of farms: An empirical bioeconomic model. *12èmes journées de recherches en sciences sociales INRA SFER CIRAD ONIRIS à Nantes les 13 et 14 Décembre.*

MICHOT D., Y FOUAD, P PICHELIN, V VIAUD, I SOLTANI, C WALTER. 2017 - Soil organic carbon content assessment in a heterogeneous landscape: comparison of digital soil mapping and visible and near Infrared spectroscopy approaches. *EGU General Assembly Conference Abstracts 19, 18802*

\*PÉRÈS G., BENARD Y., FOSSEY M., PLANTEGENEST M., WALTER C., 2021. Key drivers of earthworm community distribution at landscape scale and ecosystem service associated. *ICSZ (International Conference Soil Zoology), Bolzano, Italy, 16-21 August 2021 (poster)*

SODJAHIN, I., FEMENIA, F., KOUTCHADÉ, O.P. AND CARPENTIER, A., 2021. Estimation of crop rotation effects with 'observed' crop sequence acreages. *Selected presentation at the Triennial Congress of European Association of Agricultural Economists, Prague, July, 2020 (postponed to July 2021).*

TABAUD, L., WALTER, C., BLANCFENE, C., GASCUEL, C., LEMERCIER, B., MICHOT, D., AND PICHELIN, P.: Assessment of nitrogen and organic carbon stocks in agricultural soils: uncertainties and significance of temporal evolution, *EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-10588, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-10588>, 2021.*

\*WALTER C. ET AL. (ensemble des participants de *Soilserv*). 2017. *SOILSERV* Multiscale assessment of soil ecosystem services in agroecosystems. *2<sup>nd</sup> Global Soil Security Conference, 5-6 december 2016, Paris*

\*WALTER C., D. ANGERS, S. BOIS, A. CARPENTIER, P. DUPRAZ, C. GASCUEL, A. JAFFREZIC, B. LEMERCIER, M. MARTIN, G. PERES, M. PLANTEGENEST, N. SABY, G. WAROT. 2016 - *Soilserv*: a multidisciplinary research project on soil ecosystem services assessment and integration in decision-making process. *Global Soil Security International Symposium, Paris, 5-6 December 2016\**

\*WALTER C., D. ANGERS, Y. ELLILI, M. FOSSEY, B. LEMERCIER, D. MICHOT, N. SABY & G. WAROT. 2019 - Assessment of soil ecosystem services for territorial planning. *Wageningen Soil Conference, Understanding soil functions, 27-30 August 2019, \*\**

#### E.2.4 ARTICLES DANS DES REVUES NATIONALES A COMITE DE LECTURE

\*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*

#### E.2.5 CHAPITRE D'OUVRAGES NATIONAUX

#EGLIN T., COUSIN I., WALTER C. 2021 – Fonctions du Sol et services écosystémiques. *Numéro spécial de la revue Etude et Gestion des Sols, volume 28. 226 p. [https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2021/05/2021\\_05\\_19\\_Fonctions\\_Services-V2-web-150dpi.pdf](https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2021/05/2021_05_19_Fonctions_Services-V2-web-150dpi.pdf)*

#### E.2.6 CONFERENCES NATIONALES

\*#ANGERS D., CHENU C., WALTER C. 2016 – Séance de l'Académie d'Agriculture de France : « Stocker du carbone dans les sols pour lutter contre le changement climatique », Paris, 7 décembre 2016

- BAREILLE, F., DUPRAZ, P. 2016 - Biodiversity Productive Capacity in Mixed Farms of North-West France: A Multi-Output Primal System, 2017. *Présenté aux 31èmes Journées de Microéconomie Appliquées (JMA), Le Mans, (2017-06-08 - 2017-06-09),*
- BAREILLE, F., DUPRAZ, P. 2016 - Biodiversity Productive Capacity in Mixed Farms of North-West France: A Multi-Output Primal System, 2016. *10èmes Journées de recherches en sciences sociales (JRSS) , Paris, (2016-12-08 - 2016-12-09)*
- DEVILLIERS, E., CARPENTIER, A., 2019 - Recovering cropping management practices specific production functions: clustering and latent approaches. *Selected presentation at the 6th FAERE Annual Conference, Rennes, August 29th to 30th, 2019.*
- ELLILI-BARGAOUI Y., WALTER C., MICHOT D., LEMERCIER B.. 2017 -Evaluation et cartographie des services écosystémiques des sols à l'échelle du paysage. *Payotte : modélisation de paysages agricoles pour l'analyse et la simulation de processus, Oct 2017, Paris, France. (hal-03161038)*
- FEMENIA, F., CARPENTIER, A., GOHIN, A. AND SODJAHIN, I., 2019. Estimation of crop rotation effects based on farm accountancy data. *Selected presentation at the 6th annual conference of the French Association of Environmental and Resource Economists FAERE, Rennes, August 29-30, 2019.*
- FEMENIA, F., CARPENTIER, A., GOHIN, A. AND SODJAHIN, I., 2018. Using farm accountancy data to estimate crop rotation effects. *Selected presentation at the Journées de Recherche en Sciences Sociales JRSS, Nantes, December 12-13, 2018.*
- \*FOSSEY M., WALTER C., DURAND P., GASCUEL C., ANGERS D., JAFFREZIC A., PERES G., DUPAS R. BUSTANY C., WAROT G., BOIS S. 2018 – Les services écosystémiques des sols : de l'approche conceptuelle aux outils de planification territoriale. *Journées de l'étude des sols de l'Association Française pour l'Etude des Sols, Rouen, 9-12 juillet 2018.\*\**
- TABAUD, L., WALTER, C., BLANCFENE, C., GASCUEL, C., LEMERCIER, B., MICHOT, D., AND PICHELIN, P.: Quelles incertitudes sur la mesure des stocks de Corg et de N dans les sols agricoles ?, *15èmes Journées d'étude des Sols, Montpellier, 21-25 juin 2021*  
<https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2021/06/Actes-des-Journees-des-sols-2021-1.pdf>

## E.2.7 ARTICLES DE VULGARISATION

- \*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.*
- INRAE. 2020 Dossier de presse « La dégradation des sols agricoles est-elle irréversible ? » in « Les sols, essentiels pour la planète/ Sols, territoires, aménagement foncier et usages (Société et territoires) »  
<https://www.inrae.fr/actualites/sols-territoires-amenagement-foncier-usages>
- Saby N., Caubet M., Giraul G., Messant A. 2021 - Tutoriel pour l'utilisation de l'algorithme 'DSMART' de cartographie numérique avec les données IGCS.  
<http://nicolas.saby.pages.mia.inra.fr/Soilserv-dsmart/index.html>. doi:[hal-03273255](https://doi.org/10.31233/osf.io/zt7q5)

## E.2.8 CONFERENCES DE VULGARISATION

- DUPRAZ P., 2018. Liens entre pratiques agricoles et teneur en carbone organique des sols dans les systèmes en polyculture-élevage (résultats du stage de Morgan Curien, 2018). *1ères Journée Scientifique du GIS Avenir Elevages à Paris le 19 Décembre.*

FOSSEY M. 2018 . Présentation *Soilserv* du projet lors des journées ateliers sur les services écosystémiques des sols, *Institut Régional du Développement Durable (IRD2)*, 20 avril 2018, Caen

#WALTER C – 2017 – Les services rendus par les sols à l’humanité. *Conférence à l’Université Bretagne Sud organisée par Bretagne Vivante*. 8 février 2017

#WALTER C. 2018 – Les sols français sont-ils menacés ? Etat des connaissances et principales menaces identifiées. *Conférence invitée à l’UMR LIED (Laboratoire interdisciplinaire des Energies de Demain), Université Paris VII Diderot, le 18 décembre 2018, Paris*

#WALTER C. 2019 – « Et les sols agricoles dans tout cela ? Questionner la qualité des sols et les pratiques agricoles ». *Participation à la table ronde avec la députée AL Petel et un conseiller de gestion foncière (Gerard Leras, AGTER) lors du colloque national « Zéro Artificialisation Nette », Nantes, 17 juin 2019*

### E.2.9 THESES

ELLILI Y. (2019) – Evaluation biophysique des services écosystémiques des sols cultivés - Adaptation de l’information pédologique pour la modélisation dynamique du fonctionnement des sols. *Thèse Agrocampus Ouest – Université Bretagne-Loire. Ecole doctorale EGAAL*

DEVILLIERS E., 2021. Modélisation micro-économétrique des choix de pratiques de production et des utilisations d’intrants chimiques des agriculteurs : une approche par les fonctions de production latentes. *Thèse de doctorat en sciences économiques délivré par Agrocampus Ouest sous le label de l’Université Européenne de Bretagne. Ecole doctorale EDGE, Rennes. Soutenance prévue le 3 Septembre 2021.*

ISSANCHOU A. 2017. Soil quality management by farmers: profitability and sustainability issues for agricultural farms. *Thèse de doctorat en sciences économiques délivré par Agrocampus Ouest sous le label de l’Université Européenne de Bretagne. Ecole doctorale EDGE, Rennes.*

### E.2.10 MEMOIRES D’ETUDIANTS

10 mémoires d’étudiants de niveaux M1, M2 et ingénieurs (voir liste en annexe 1)

## E.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

*La liste des éléments de valorisation inventorie les retombées (autres que les publications) décomptées dans le deuxième tableau de la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. On détaillera notamment :*

**E.3.1 BREVETS NATIONAUX ET INTERNATIONAUX, LICENCES, ET AUTRES ELEMENTS DE PROPRIETE INTELLECTUELLE CONSECUTIFS AU PROJET.**

**E.3.2 LOGICIELS ET TOUT AUTRE PROTOTYPE**

**E.3.3 ACTIONS DE NORMALISATION**

WP3 – Contribution à la synthèse pilotée par l’ADEME sur l’évaluation des services écosystémiques dans les contextes agricoles, urbains et péri-urbains. Colloque de synthèse prévue à l’automne 2021 en amont d’une éventuelle démarche de normalisation.

**E.3.4 BASES DE DONNEES ET SYSTEMES D’INFORMATION GEOGRAPHIQUES**

SCE – INRAE – 2020 - Base de données sur l’évaluation des services écosystémiques des sols dans les systèmes prairiaux du territoire de Nantes- St Nazaire

### E.3.5 NOUVEAUX PROJETS

SERENA: Soil Ecosystem services and soil threats modelling and mapping. Projet européen associant 37 partenaires soumis à l'*European Joint Project Soil* en réponse à l'appel d'offres "SE1/INDICATORS2 - Modelling soil functions and soil threats for mapping soil functions and ecosystem services", juin 2021: coordination d'un WP et de 2 tâches.

### E.3.6 CONTRIBUTION A DES PROJETS ET OUVERTURE INTERNATIONALE

WP1 – Collaboration avec l'INRA 0874 UREP (UMR Ecosystème Prairial) de Clermont Ferrand pour l'évaluation des services écosystémiques de sols sous prairies permanentes

WP3 - Collaboration avec le projet MUSE (équipes CEREMA et IFFSTAR) pour la prise en compte des services écosystémiques dans la planification territoriale sur le terrain d'étude commun de Nantes-Métropole.

WP1 et WP3 – Contributions en tant qu'expert au projet européen « SMS - Soil Mission Support: Towards a European research and innovation roadmap on soils and land management » , Horizon 2020, accepté en novembre 2020.

### E.3.7 ORGANISATION DE COLLOQUES OU DE SYMPOSIUMS

\*WALTER C., ANGERS D., TERRIBILE F. Organisation d'une session au congrès EUROSOIL, août 2021 intitulée : Soil Ecosystem Services: Putting Theory Into Practice.

### E.3.8 FORMATIONS CONTINUES ET FORMATIONS DOCTORALES

WALTER C., BAVEYE P. 2018 – Ecosystem services assessment in agricultural and peri urban areas. *Under the supervision of Agreenium and ABIES and EGAAL doctoral schools. Paris, June 19-21th 2018 (20 participants dont 14 doctorants )*

WALTER C., MONTAGNE D. 2021 - Ecosystem services assessment in agricultural and peri urban areas. *Under the supervision of Agreenium and ABIES and EGAAL doctoral schools. On line. 2-4<sup>th</sup> March 2021 (42 participants dont 36 doctorants)*

## E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Ce tableau dresse le bilan du projet en termes de recrutement de personnels non permanents sur CDD ou assimilé.

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. antérieure,	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
Affichard Manu	M	Affichard.manu@yahoo.fr	Mai 2021	Licence professionnelle	France	0	INRAE Rennes	Assistant-ingénieur	3,5	15/06/2018	CDI	Enseignement et recherche publique	Enseignant en lycée agricole	non	expérience en métrologie
Bustany Céline	F	Celine.Bustany@inrae.fr	Décembre 2020	Ingénieure agronome Montpellier Supagro	France	0	INRAE Rennes	Doctorante	36	30/10/2020	Recherche d'emploi				
Devilliers Esther	F	<a href="mailto:Esther.devilliers@inrae.fr">Esther.devilliers@inrae.fr</a>	Juin 2021	Ingénieure de l'ENSAI	France	0	INRAE Rennes	Doctorante	33,5	02/09/2020	CDD	Enseignement et recherche publique	ATER	non	Recrutement favorisé par l'expérience acquise dans <i>Soilserv</i>
Ellili Yosra	F	Yosra.ELLI@unilasalle.fr	Mai 2021	Ingénieure agronome Agrocampus Ouest et INA Tunis	France et hors UE	0	INRAE Rennes	Doctorante	36	31/10/2019	CDI	Enseignement supérieur privé	Maître de conférences	non	Recrutement favorisé par l'expérience acquise dans <i>Soilserv</i>
Fossey Maxime	M	Maxime.fossey@inrae.fr	Avril 2021	Doctorat de l'Institut National de la Recherche Scientifique - INRS du Québec	France puis hors UE	10	INRAE Rennes	Post-doctorant	24	31/12/2019	CDI	Institut technique professionnel	Chef de projet évaluation environnementale	non	Recrutement favorisé par l'expérience acquise dans <i>Soilserv</i>
Issanchou Alice	F	a.issanchou@gmail.com	Juin 2021	Doctorat en Sciences économiques	France	0	INRAE Rennes	Ingénieure de recherche	2	31/07/2019	CDD	Enseignement et recherche publique	chercheuse	oui	Recrutement favorisé par l'expérience acquise dans <i>Soilserv</i>
Manon Caubet	F	manon.caubet@inrae.fr	Juin 2021	Ingénieur agronome	France	0.5	INRAE Infosol	Ingénieur d'Etudes	6		CDD	INRAE	data scientist	non	Recrutement favorisé par l'expérience acquise dans <i>Soilserv</i>

## F ANNEXE 1 : LISTE DES MEMOIRES D'ETUDIANTS ET DES RAPPORTS INTERNES

- Bourdellot S. 2020 - Influence du changement de support géographique de l'information pédologique dans les démarches de cartographie des services écosystémiques des sols, *Mémoire de fin d'étude Parcours Gestion des sols et services écosystémiques, Université Paris-Saclay-AgroParistech, INRAE Centre Val-de-Loire, unité InfoSol, 41p*
- Curien M. (2018) – Liens entre pratiques agricoles et teneur en carbone organique des sols dans les systèmes de polyculture-élevage. *Mémoire de fin d'étude Parcours Gestion des sols et services écosystémiques, Université Paris-Saclay-AgroParistech, ACTA, 51 p*
- Delaplace A. 2019. Etude de l'influence du paysage sur des niveaux d'infestation de populations de bio-agresseurs en système de polyculture-élevage. *Mémoire de fin d'étude Master Biodiversité Ecologie Evolution, Parcours modélisation en écologie de l'Université Rennes 1, INRA UMR IGEPP, 26p.*
- Ellili Yosra. 2016 – Cartographie des services écosystémiques. *Spécialisation Génie de l'Environnement, option SEH, Agrocampus Ouest.*
- Gayraud T. 2018 - Influence de la pédologie et des pratiques agricoles sur les communautés de coléoptères carabidés et le biocontrôle de ravageurs et d'auxiliaires. *Mémoire de fin d'étude Ingénieur Agronome, Génie de l'Environnement, INRA UMR IGEPP, (pdf 4)*
- Lamy E. 2019. Prise en compte des incertitudes dans le changement de support géographique de l'information pédologique : application au carbone organique dans le bassin versant de Naizin (56). *Mémoire de fin d'études Master Sciences de l'eau ; Hydrosystèmes et Bassins Versants : diagnostic et risque environnemental de l'Université François Rabelais de Tours. Infosol Orléans, 26 p (pdf211-2019-Lamy-RapportM2.pdf)*
- Messant A. 2018 Prédications de propriétés de sol à l'aide d'un algorithme de désagrégation d'unités cartographique de sol. *Mémoire de fin d'études Master Géosciences, Planètes, Ressources et Environnement, Spécialité Sol, Eau, Environnement de l'Université de Lorraine. Infosol Orléans, 26 p (pdf210-2018-Messant-RapportM2.pdf)*
- Magnin P. 2020. Influences de l'environnement et des pratiques agricoles sur la biodiversité des sols et les services écosystémiques à l'échelle d'un Bassin Versant. *Mémoire de fin d'étude de Master AGROGER (AGROécologie et Gestion des REssources), Université de Bordeaux, INRA UMR SAS, 69p*
- Rubio Dorantes M. 2018 – Identification des variables agro-environnementales influençant, à l'échelle d'un Bassin Versant, les communautés lombriciennes et les services et dis-services écosystémiques associés. *Mémoire de Master Sciences de l'Eau, Université de Rennes 1, UMR SAS, 29p*
- Tabaud L. 2020 – Evaluation des services écosystémiques fournis par les sols par mesure directe. *Mémoire du master 2 Sciences de l'Eau. Université de Rennes 1, Agrocampus Ouest*