

Les données du GIS Sol pour appuyer les politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique

Barrières et stratégies de valorisation

M. P. Martin^(1*), A. Duparque⁽²⁾, A. Bispo⁽¹⁾, N. P.A. Saby⁽¹⁾ et B. Guenet⁽³⁾

1) INRAE, Info&Sols, 45075 Orléans, France

2) Agro-Transfert Ressources et Territoires, 2 chaussée Brunehaut 80200 Estrées-Mons, France

3) Laboratoire de géologie de l'ENS, UMR 8538 CNRS-ENS, IPSL, Université PSL, 75005 Paris, France

* Auteur correspondant : manuel.martin@inrae.fr

RÉSUMÉ

Les sols jouent un rôle prépondérant en matière d'atténuation du changement climatique et d'adaptation des secteurs agricoles et forestiers. L'élaboration de politiques publiques qui viseraient à réduire nos émissions de gaz à effet de serre, à augmenter la fonction de puits des sols vis-à-vis du dioxyde de carbone atmosphérique, et à renforcer nos capacités d'adaptation, notamment en matière d'agriculture ou de sylviculture, repose sur la connaissance et l'existence de données concernant nos sols et leur gestion. Le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (le GIS Sol) pilote quatre grands programmes d'acquisition de la donnée sol, et est responsable de sa gestion, de son traitement et de sa diffusion. Les données du GIS Sol ont été, depuis plusieurs décennies, au cœur d'études mandatées par les pouvoirs publics et de travaux de recherche visant à mieux comprendre et gérer les sols, pour l'atténuation du changement climatique ou pour adapter l'agriculture et la forêt aux perturbations annoncées. Ces données permettent de mieux comprendre et caractériser les rôles passé, présent et futur des sols en lien avec le changement climatique. Le potentiel des données du GIS Sol est toutefois sous-exploité, pour différentes raisons, et notamment la complexité de la donnée sol et son accessibilité. Il semble raisonnable de préconiser un renforcement des efforts pour la faire mieux connaître, notamment auprès des communautés scientifiques qui travaillent sur le changement climatique, par exemple en ciblant certains portails nationaux et internationaux de diffusion de la donnée. Il conviendra également d'améliorer son accessibilité, notamment en clarifiant les aspects juridiques s'y rapportant, et son inter-opérabilité. Ce sont là des conditions pour la réalisation

Comment citer cet article :

Martin M. P., Duparque A., Bispo A., Saby N. P.A. et Guenet B., 2024 - Les données du GIS Sol pour appuyer les politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique : barrières et stratégies de valorisation *Étude et Gestion des Sols*, 31, 91-102

du plein potentiel des programmes du GIS, des programmes en évolution permanente, en matière de recherche et d'appui aux politiques pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique.

Mots-clés

Changement climatique, atténuation, adaptation, gaz à effet de serre, données sol, GIS Sol, COS, CO₂, N₂O, CH₄, agriculture, sylviculture.

SUMMARY

GIS SOL SOIL DATA AS A SUPPORT FOR CLIMATE CHANGE ADAPTATION AND MITIGATION POLICIES:

Barriers and promises

Soils play a key role in climate change mitigation and for the adaptation of the agricultural and forestry sectors. The development of public policies aimed at reducing our greenhouse gas emissions, at increasing the sink function of the soils with respect to atmospheric carbon dioxide, and strengthening our capacities of adaptation, particularly in terms of agriculture or forestry, is primarily based on knowledge of our soils and their management. The Soil Scientific Interest Group (Sol GIS) runs four major soil data acquisition programs and is responsible for their data management, processing and dissemination. Data from the GIS Sol have been, for several decades, at the heart of studies commissioned by the public authorities and research work aimed at better understanding and managing soils, for the mitigation of climate change or to adapt agriculture and the forest to it. These data make it possible to better understand and characterize the past, present and future role of soils in relation to climate change. The potential of the GIS Soil data is however under-exploited, for various reasons, and in particular the complexity of the soil data and its accessibility. We may reasonably recommend a strengthening of efforts to make it better known, particularly among the scientific communities working on climate change, for example by targeting certain national and international data dissemination portals. It will also be necessary to improve its accessibility, in particular by clarifying the related legal aspects, and its interoperability. These are the conditions for realizing the full potential of the ever-evolving GIS programs in research and policy support for climate change mitigation and adaptation.

Key-words

Climate Change, mitigation, adaptation, greenhouse gas, soil data, GIS Sol, COS, CO₂, N₂O, CH₄, agriculture, forestry

RESUMEN

LOS DATOS DEL GIS SOL PARA APOYAR LAS POLÍTICAS DE ATENUACIÓN Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO:

Barreras y estrategias de valorización

Los suelos desempeñan un papel importante en la atenuación del cambio climático y en la adaptación de los sectores agrícola y forestal. La elaboración de políticas públicas que tengan por objeto reducir nuestras emisiones de gases de efecto invernadero, aumentar la función de sumidero de los suelos frente al dióxido de carbono atmosférico y reforzar nuestra capacidad de adaptación, especialmente en materia de agricultura o silvicultura se basa en el conocimiento y la existencia de datos sobre nuestros suelos y su gestión. El Grupo de Interés Científico Suelo (GIS Sol) dirige cuatro grandes programas de adquisición de datos de suelo y es responsable de su gestión, tratamiento y difusión. Los datos del GIS Sol han sido, durante varias décadas, el centro de estudios encargados por las autoridades públicas y de trabajos de investigación para comprender mejor y gestionar los suelos, para la atenuación del cambio climático o para adaptar la agricultura y los bosques a las perturbaciones anunciadas. Estos datos permiten comprender y caracterizar mejor el papel pasado, presente y futuro de los suelos en relación con el cambio climático. Sin embargo, el potencial de los datos del GIS Sol no se aprovecha plenamente por diversas razones, entre ellas la complejidad de los datos de suelo y su accesibilidad. Parece razonable promover un fortalecimiento de los esfuerzos para dar a conocer esta cuestión, en particular entre las comunidades científicas que se ocupan del cambio climático, por ejemplo, centrándose en determinados portales nacionales e internacionales de difusión de datos. Asimismo, deberá mejorarse su accesibilidad, en particular mediante la aclaración de los aspectos jurídicos y su interoperabilidad. Estas son las condiciones para la realización del pleno potencial de los programas del GIS, de los programas en continua evolución, en materia de investigación y de apoyo a las políticas para la atenuación y la adaptación al cambio climático.

Palabras clave

Cambio climático, atenuación, adaptación, Gases de efecto invernadero, datos suelo, GIS Sol, COS, CO₂, N₂O, CH₄, agricultura, silvicultura

1. INTRODUCTION

L'urgence climatique nécessite de réduire drastiquement nos émissions de gaz à effets de serre, pour atténuer le changement climatique et, dans un même temps, de développer des stratégies d'adaptation à ce changement. En matière d'atténuation, pour rester en accord avec les objectifs de la COP21 et sous la barre des 2 degrés de réchauffement en comparaison avec la période préindustrielle, il sera aussi nécessaire de mettre en place des technologies dites « d'émissions négatives », c'est-à-dire des technologies séquestrant plus de carbone qu'elles n'en émettent (Masson-Delmotte *et al.*, 2021). L'utilisation des capacités naturelles des sols à stocker des quantités importantes de carbone sur des temps longs semble être une technologie d'émissions négatives intéressante (Arrouays *et al.*, 2002), parmi d'autres, mais qui nécessite des modifications des pratiques de gestion des sols (Rodrigues *et al.*, 2021). Augmenter l'apport de carbone dans les sols par les plantes en modifiant la gestion des terres semble être la meilleure approche pour y parvenir (Pellerin *et al.*, 2021). Cela ne s'applique toutefois qu'aux terres déjà gérées par l'homme, comme les terres cultivées ou certaines prairies et forêts (Minasny *et al.*, 2017). L'augmentation des retours au sol de biomasse végétale implique soit une modification des allocations de cette biomasse (par exemple la gestion des résidus) soit une augmentation de la production végétale, qui, elle, dépend d'un ensemble de facteurs (comme par exemple la disponibilité des nutriments, de l'eau dans les sols). Les pratiques agricoles nécessaires à l'augmentation de ces biomasses peuvent également générer des émissions de GES additionnelles dont l'effet sur le changement climatique est directement opposé à celui du stockage de carbone dans le sol (Guenet *et al.*, 2021). Le potentiel d'atténuation du changement climatique par le stockage du carbone dans le sol fait partie du portfolio d'un ensemble de solutions à travailler. Il s'intègre, à certains égards, dans la bio-économie, pour laquelle les sols jouent un rôle central en tant que support de la croissance végétale, et qui est amenée à jouer un rôle crucial pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique (Ecuru *et al.*, 2022). Les sols constituent en effet également un allié incontournable en matière d'adaptation au changement climatique. Leurs propriétés (ex : réservoir d'eau, fertilité biologique) conditionnent leur capacité à maintenir leurs fonctions et services écosystémiques (ADEME and I-CARE & Consult, 2016) et, par voie de conséquence, la durabilité des systèmes agricoles et forestiers dans un contexte de changement climatique.

Bien connaître les sols, et la façon dont leurs propriétés varient dans le temps et l'espace, est donc primordial pour alimenter et accompagner les actions visant l'atténuation et l'adaptation au changement climatique. Nous avons besoin de données, par exemple, pour suivre l'évolution des niveaux de carbone organique dans les sols (COS), pour comprendre les déterminants des émissions de GES par les sols et réaliser

des projections. Cela s'applique plus largement aux services écosystémiques des sols générés, en lien avec la gestion des sols et dans un contexte de changement climatique. Les programmes du GIS Sol, dont les plus connus sont la Base de Données Géographique des Sols de France (BDGSF, INRA, 2018), l'Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (IGCS, Laroche, 2013), le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS, Jolivet *et al.*, 2006) et la Base de Données d'Analyses des Terres (BDAT, Saby *et al.*, 2014), fournissent pour cela différents types de données. Ils contribuent ainsi à la connaissance des sols français et servent de socle aux politiques publiques dans le cadre de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique, depuis l'échelle nationale (avec l'emblématique étude française 4 pour mille, Pellerin *et al.*, 2021) jusqu'à des échelles locales (avec par exemple la mise en place d'outils d'aide à la décision à destination des aménageurs, tels qu'ALDO ou Climagri, ADEME 2018, 2020).

Nous dressons ici tout d'abord un bilan de la façon dont ces données alimentent, à différents niveaux, les politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. Nous expliquerons ensuite en quoi, d'après nous, ces données sont sous-exploitées et, enfin, nous présenterons quelques perspectives d'enrichissement et d'utilisation des données dans ce contexte.

2. RICHESSE DES DONNÉES ET APPLICATIONS

Les données du GIS sol ont déjà été largement utilisées pour la recherche, en amont de la construction des politiques publiques mais aussi dans des études mandatées directement par les ministères et les agences. S'agissant des émissions de gaz à effet de serre, et donc des politiques d'atténuation, les données sol sont mobilisables suivant différentes modalités. La première, et peut-être la plus connue, repose sur la connaissance des dynamiques spatio-temporelles du carbone organique des sols (COS). Les variations de COS représentent en effet l'intégration, sur le moyen-long terme, des émissions (que l'on considère par convention négatives lorsque le sol joue le rôle d'un puits, et positives lorsqu'il est source) de CO₂ et, dans certains cas, du CH₄. Les émissions du troisième GES majeur, le protoxyde d'azote, ne peuvent pas être déduites directement de l'observation des variations d'une propriété du sol (par exemple l'azote total). Il est alors nécessaire d'avoir recours à des modèles sol ou sol/plante, qui nécessitent, entre autres, des données sol (par exemple la texture, le pH). C'est là la seconde modalité d'utilisation des données sol pour l'atténuation du changement climatique. Nous verrons que cette seconde modalité, comme variables alimentant les modèles, s'applique également au cas de l'adaptation. Nous donnons dans la suite du paragraphe des exemples de ces différentes modalités d'utilisation des données

sol dans le cadre de l'atténuation et l'adaptation au changement climatique.

2.1 Données sur le carbone Organique des sols

L'une des applications directes des données du GIS porte sur l'état, le suivi et la cartographie des variations spatiales et temporelles du COS, avec deux programmes phares sur cette thématique, que sont le RMQS (Martin *et al.*, 2022) et la BDAT (Saby *et al.*, 2014). La dimension spatiale est un point d'entrée extrêmement important. Comprendre les distributions actuelles spatiales du COS permet en effet de confirmer des résultats expérimentaux concernant les facteurs qui conditionnent la dynamique du COS (*e.g.* l'effet des précipitations, Martin *et al.*, 2011), et de mieux caractériser leurs effets et leurs interactions dans la diversité des systèmes sol-plante, conditionnés notamment par le climat et l'usage des sols. Des jeux de données tels que ceux issus du RMQS, sont par ailleurs utilisés pour produire des niveaux de référence des stocks de COS, par type d'occupation et par découpage administratif, qui sont directement utilisés par le Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA) pour réaliser ses inventaires nationaux d'émission de GES (CITEPA, 2022). Le programme de la BDAT, quant à lui, porte exclusivement sur les sols agricoles et, parmi les produits disponibles, propose des statistiques sur les teneurs en COS, pour différentes entités spatiales de restitution (canton, département, régions agricoles, etc.), mises à disposition sur internet (voir par exemple <http://bdatt.gissol.fr>). Les références produites par ces deux programmes sont directement mobilisables dans le cadre de politiques d'aménagement du territoire: il est par exemple possible de proposer, par zone climatique et grand type de sol, des valeurs cibles de stock de carbone à atteindre en fonction de l'usage de sols (Chen *et al.*, 2019) ou bien de localiser les zones à protéger car présentant des stocks importants ou au contraire présentant des stocks les plus faibles sur lesquelles des changements de pratique sont prioritaires pour améliorer l'état des sols (Martin *et al.*, 2021). Les données du RMQS ont d'ailleurs été mobilisées pour la mise en place d'outils d'aide à la décision, certains étant directement à destination des aménageurs et des gestionnaires des sols (Martin *et al.*, 2022). Ajoutons que malgré les possibles biais statistiques liés au mode de collecte des analyses dont les résultats peuplent la BDAT, ce programme est le seul offrant à date, à l'échelle nationale, un recul temporel de 30 ans concernant les teneurs en COS dans les sols agricoles français.

Ces observations de variations des teneurs ou des stocks de COS sont primordiales pour améliorer notre compréhension de la dynamique du COS, notamment en lien avec les pratiques agricoles en terres cultivées (Curien *et al.*, 2021; Sleutel *et al.*, 2007). Elles permettent également de mieux spécifier les conditions aux limites des modèles utilisés pour orienter les

politiques publiques (Pellerin *et al.*, 2021). À moyen terme, le RMQS fournira des références d'évolution des stocks de carbone, pour la période 2000-2030, de façon plus contrôlée que dans le cas de la BDAT, du fait de la maîtrise du plan d'échantillonnage. Ces valeurs de référence pourront être directement mobilisées pour évaluer l'effet des politiques publiques en matière d'atténuation du changement climatique.

La puissance des programmes du GIS Sol réside également dans leur étroite connexion avec d'autres programmes de recherche qui, à terme, produiront des résultats sur lesquels les politiques pourront s'appuyer. Les travaux sur la qualité de la matière organique en sont un bon exemple. L'évolution du COS dans le sol est déterminée non seulement par les processus de minéralisation et les entrées de matière organique dans les sols, mais aussi par l'état du stock de COS lui-même, qu'il s'agisse de la quantité de COS, mais aussi de sa qualité. La qualité de la matière organique des sols, composée d'une grande variété de molécules, conditionne sa récalcitrance à la minéralisation, donc en partie sa persistance dans les sols (Schmidt *et al.*, 2011), et par conséquent l'évolution des stocks de COS. Ainsi, le stock de COS d'une prairie, composé d'une proportion élevée de matière organique particulaire (MOP)¹, baisse brutalement si les entrées de MO dans le sol diminuent, comme par exemple dans le cas où la prairie est retournée, du fait du caractère labile des MOP. La nature des stocks de COS est un élément que les politiques publiques devront à l'avenir mieux intégrer (Martin *et al.*, 2021). Plusieurs programmes de recherche en cours sur les données RMQS traitent de cet aspect en mobilisant par exemple des techniques spécifiques de pyrolyse (Cécillon *et al.*, 2018; Delahaie, 2023; Kanari *et al.*, 2022) et de fractionnement densimétrique (von Lützwow *et al.*, 2007; Poeplau *et al.*, 2018). Ces informations sur la stabilité du carbone sont particulièrement importantes lors de l'utilisation de modèles.

2.2 Utilisation des données GIS Sol comme support de la modélisation

Les modèles sont indispensables dès lors qu'il s'agit d'estimer des variables non aisément mesurables, notamment aux échelles régionales et nationales, de réaliser des projections, ou encore de tester des hypothèses. De nombreux modèles représentant le système sol ou le système sol/plante sont mobilisés pour les questions d'atténuation ou d'adaptation. Il s'agit notamment d'estimer des émissions de gaz à effet de

¹ MOP : *Matières Organiques Particulaires* : fraction des matières organiques du sol déjà évoluées, mais non encore intimement associées à la matrice minérale du sol et de ce fait peu protégées – contrairement aux fractions de matières organiques plus fines de l'humus, elles sont donc facilement minéralisées si les conditions pédoclimatiques sont favorables. La proportion de ces MOP dans le sol peut être déterminée par fractionnement granulométrique des MOS.

serre tels que le N₂O ou le CH₄ (Hénault *et al.*, 2019 ; Petrescu *et al.*, 2021), les variations de stock de COS dans les sols ou encore la croissance végétale (Pellerin *et al.*, 2021). Nous détaillons ci-dessous dans quelle mesure les modèles utilisés pour ces deux dernières questions peuvent mettre à profit les données du GIS Sol.

2.2.1 Modèles sol de la dynamique du COS

Les modèles numériques sont devenus un outil indispensable à notre compréhension des sols mais également un outil décisionnel majeur en matière de stockage de COS et d'émission des GES en lien avec la gestion du sol. En effet, utilisés correctement, ces modèles peuvent fournir des informations précieuses sur les conséquences de la mise en place de telle ou telle pratique de gestion, ou encore sur l'impact de l'évolution de l'usage des terres.

Ceci est particulièrement vrai en ce qui concerne la dynamique du carbone des sols. La mise en équations de la dynamique du COS n'est pas nouvelle et date des travaux d'Henin et Dupuis en 1945. Depuis, de nombreuses approches ont été développées considérant désormais des approches multi-modèles (Bruni *et al.*, 2022 ; Farina *et al.*, 2017 ; Riggers *et al.*, 2019). Néanmoins tous ces modèles possèdent un certain nombre de conditions aux limites, c'est à dire des caractéristiques non calculées par le modèle mais nécessaires au calcul des changements d'état du système (par exemple les variations du COS). Un exemple classique est la texture du sol qui va affecter la dynamique du COS dans la plupart des modèles connus mais qui n'est ni calculée ni prédite directement par le modèle. Cela s'applique donc aux modèles de dynamique du COS (voir par exemple Martin *et al.*, 2022 pour l'utilisation du taux d'argile, issu des données *GlobalSoilMap* produites par le GIS Sol, en données d'entrée) mais aussi pour des modèles d'émission d'autres GES (Hénault *et al.*, 2019, pour le N₂O et l'utilisation de données de pH tirées du RMQS). L'une des autres conditions aux limites indispensable en matière de modélisation de la dynamique du COS est le stock initial, à partir duquel on calcule les évolutions. Dans un contexte de simulation spatialisée, il faut donc disposer de cartes du COS. Ainsi, l'étude française 4p1000 (Pellerin *et al.*, 2021) a récemment utilisé une carte du COS produite par le GIS Sol (Mulder *et al.*, 2016) à 90 m de résolution, et agrégée à 1 km de résolution. Cette carte a également été intégrée, depuis, à l'exercice international conduit sous l'égide de la FAO visant à spatialiser les stocks de carbone dans les sols à l'échelle mondiale (GSOC map, <http://54.229.242.119/GSOCmap/>).

La méthode ABC'Terre² donne un autre exemple de valorisation des données de deux des principales bases de données du GIS Sol. Composée de cinq modules de calculs (figure 1), elle associe des étapes de traitements de données qui permettent d'alimenter la réalisation du bilan de carbone organique des sols et du bilan de GES. Ces bilans portent sur des maillons élémentaires d'un territoire agricole de grandes

cultures et incluent des cartes des variations de stocks de carbone du sol et des émissions de GES, pour l'ensemble du territoire considéré. Cette méthode est principalement déployée dans le cadre des plans d'actions des PCAET (Plan Climat Air Energie Territorial) des collectivités locales.

Les données du GIS Sol mobilisées alimentent :

- des algorithmes intégrés à l'outil RPG-Explorer³, pour affecter les rotations culturales reconstituées par cet outil à partir des données des RPG, aux types de sol correspondant aux UTS (Unités Typologiques de Sols) des Référentiels Régionaux Pédologiques (programme IGCS, géré par le GIS Sol) associés aux territoires diagnostiqués (étape 1 de la méthode ABC'Terre). Cette affectation se fait via une matrice intégrant les paramètres des sols, tels que la texture, la profondeur, la teneur en cailloux, la teneur en CaCO₃, la présence d'hydromorphie, qui déterminent leur potentiel agronomique de production et leur aptitude ou non à recevoir une culture donnée.
- les algorithmes constitutifs de la méthode d'affectation de teneurs en Carbone organique issues de la BDAT aux types de sols (UTS) des Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP) et qui croisent des critères spatiaux et pédologiques (Scheurer *et al.*, 2020) (étape 2 d'ABC'Terre).
- le modèle AMG (Clivot *et al.*, 2019) mis en œuvre par l'outil Simeos-AMG⁴, qui attend en entrée, les teneurs du sol en Carbone organique, en argile, en CaCO₃, en cailloux, son pH et le C/N des MOS.

La sensibilité des modèles aux conditions limites est très importante et l'utilisation de données de qualité pour contraindre le modèle est une condition indispensable pour obtenir des prédictions exploitables. Le rôle des données du GIS Sol est donc ici majeur.

Les données du COS sont également essentielles, à l'autre bout de la chaîne de modélisation, pour l'évaluation des capacités des modèles à reproduire des observations. En

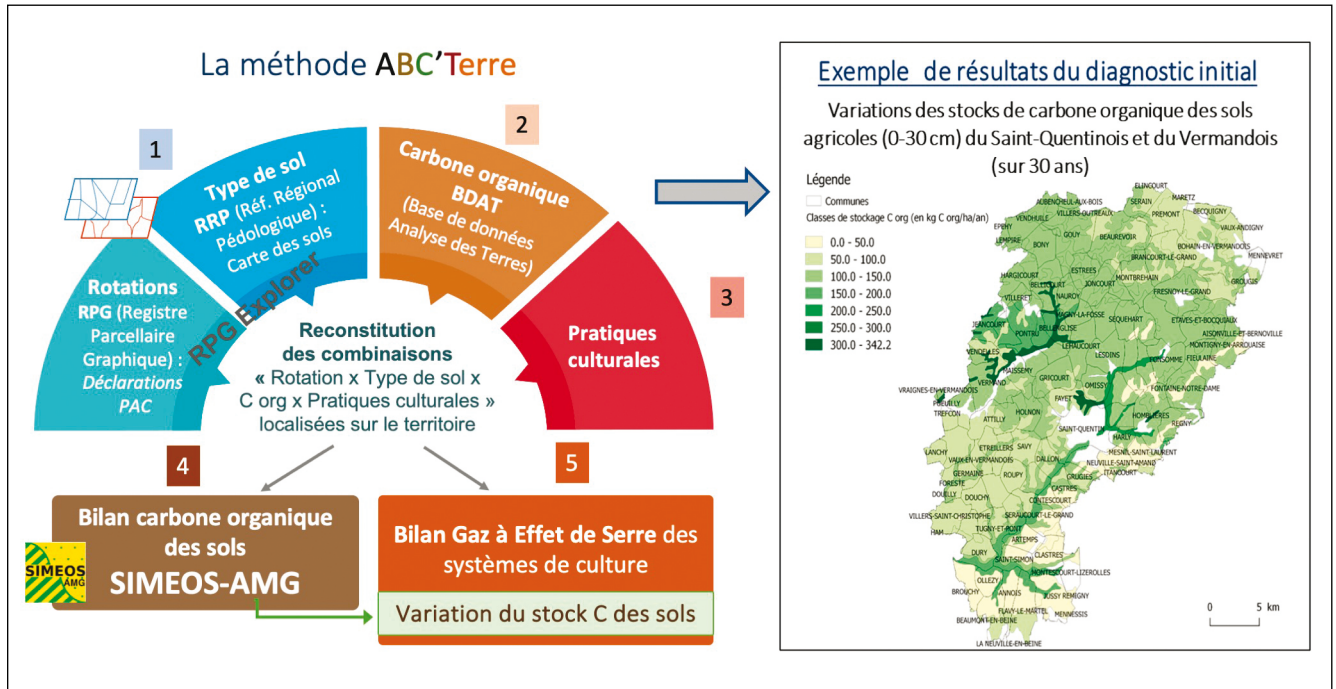
2 ABC'Terre : Atténuation du Bilan de gaz à effet de serre intégrant le Carbone des sols. Méthode et démarche de diagnostic territorial, développées par AgroTransfert-Ressources et Territoires et ses partenaires, dans le cadre de projets financés par l'ADEME entre 2012 et 2020, qui permet d'évaluer le potentiel d'atténuation lié aux systèmes de culture à l'échelle d'un territoire, en tenant compte des caractéristiques du sol et des pratiques des agriculteurs. <https://abcterre.org>

3 RPG-Explorer : Outil de reconstitution de séquences et de rotation des cultures, et, dans le cadre d'ABC'Terre, intégrant l'affectation de ces rotations à des types de Sols (UTS des Référentiels Régionaux Pédologiques). Il est alimenté par les Registres Parcellaires Graphiques issus des déclarations PAC des agriculteurs et pour ce module particulier, par les données des RRP ; il a été développé par AgroPariTech. <https://tice.agroparitech.fr/coursenligne/courses/RPGEXPLORER/>

4 Outil de Simulation d'évolution de l'Etat Organique des Sols en fonction des pédoclimats locaux et des systèmes de culture, intégrant le modèle AMG de l'INRAe de Laon. <http://www.simeos-amg.org/>

Figure 1 : Valorisation de données du GIS Sol par la méthode ABC'Terre : Cinq étapes de calcul, faisant appel aux données des Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP, Etape 1) et à celles de la BDAT (Etape 2), pour générer des diagnostics spatialisés du stockage de C organique dans les sols (exemple pour le Saint-Quentinois-Vermandois, dans l'Aisne) et des émissions de GES, liées aux productions agricoles en grandes cultures.

Figure 1: Using the GIS Sol data within the ABC'Terre method: five calculation steps, using RRP data (Step 1) and BDAT data (Step 2), to generate spatial diagnostics of the storage of Organic C in the soil (example for Saint-Quentinois-Vermandois, in Aisne) and GHG emissions, linked to agricultural production in field crops.



effet, un modèle peut être très performant dans un contexte donné mais beaucoup moins dans d'autres conditions (Mao *et al.*, 2019). Avoir les capacités à évaluer un modèle dans un contexte le plus proche possible de celui dans lequel il est utilisé est indispensable, notamment si la finalité est d'élaborer des politiques publiques.

2.2.2 Modéliser la croissance végétale en lien avec l'adaptation et l'atténuation

L'une des fonctions majeures des sols est d'être le support de la croissance végétale. Or, être en mesure d'évaluer comment la croissance végétale est susceptible de changer dans un contexte de changement climatique est indispensable à plusieurs titres. Cela permet par exemple d'évaluer la résilience des systèmes agricoles et forestiers et donc les possibilités d'adaptation. Cela constitue également une entrée importante pour les aspects d'atténuation, d'une part en lien avec la bioéconomie (Ecuru *et al.*, 2022; Juerges et Hansjürgens, 2018), d'autre part en lien avec les variations attendues des apports de biomasse végétale au sol, ces apports de biomasse étant l'un des premiers facteurs de variation des stocks de COS.

En l'absence de données observées et observables, les modèles de croissance végétale, comme par exemple les modèles de culture, sont utilisés pour simuler, en conditions changeantes, la croissance végétale. Ces modèles requièrent le plus souvent l'utilisation de données pédologiques détaillées pour fonctionner. C'est le cas en particulier du modèle STICS bien connu en France (voir par exemple Launay *et al.*, 2021, avec l'utilisation des données de la BDGSF), du modèle américain Century (Parton *et al.* 1987) ou encore du modèle danois Daisy (Svendsen *et al.*, 1995). Ils utilisent des paramètres sols (teneur en argile, en MO, en CaCO₃, en éléments grossiers, profondeur du sol) qui permettent notamment d'estimer le Réservoir Utile (RU) d'eau du sol et certaines propriétés physiques présidant à la croissance du système racinaire. Certains outils, destinés à des usages de Recherche-Développement utilisent ces mêmes données sol pour estimer des potentiels de rendement sur des territoires régionaux. Ce sont par exemple les données que l'on retrouve dans la matrice agronomique de l'outil RPG-Explorer lorsqu'il est utilisé pour l'affectation de séquences de cultures aux UTS dans la méthode ABC'Terre (teneurs en argile, calcaire et cailloux, Réservoir utilisable maximal, excès d'eau). L'outil

PERSYST développé par INRAE Agronomie Grignon (Guichard *et al.*, 2013) a ainsi été paramétré dans plusieurs régions pour les principales cultures qui s'y rencontrent en combinant une typologie des sols et des zones climatiques régionales et la récolte d'informations statistiques et à dire d'experts sur les rendements agricoles observés. Disposant de la combinaison de ces approches, des porteurs de projets souhaitant valoriser de la biomasse agricole peuvent estimer les productions locales et les flux potentiels de matières à destination d'unités de valorisation à implanter au sein des territoires.

La prise en compte des liens entre sol et croissance végétale pour des outils d'aide à la décision dépasse les enjeux purement liés au changement climatique. Citons toutefois quelques exemples d'utilisation des données sol produites par le GIS Sol dans le cadre d'outils de conseil agro-environnemental. Le premier exemple est celui de l'outil AqYield, intégré à la plateforme Maelia⁵, qui aide à la gestion de l'eau à l'échelle de territoires dans le Sud-ouest de la France. Cet outil utilise des données cartographiées de teneur en argile et de profondeur de sol. Par ailleurs, à l'initiative du RMT Sols et Territoires, le projet TYPTERRRES (Laroche *et al.*, 2020) vise à construire à partir des RRP des typologies agronomiques des sols partagées, à des fins de diagnostic, d'évaluation, de conseil et d'actions agronomiques et agro-environnementales. Les très nombreuses UTS décrites au sein des UCS qui composent un RRP sont ainsi synthétisées en un nombre plus restreint d'unités typologiques. Les données pédologiques pures sont complétées par des paramètres agronomiques disponibles localement, qui rendent plus directement utilisables les bases de données sol géographiques ainsi constituées, pour des applications agricoles, tout en valorisant des informations disponibles sur les sols en régions.

3. SOUS-EXPLOITATION DE CETTE RICHESSE

Si les applications des données GIS Sol, en amont et dans le cadre des politiques d'atténuation et d'adaptation, sont multiples, force est de constater que ces données restent encore sous-exploitées, notamment dans le domaine du climat. Ces données sont connues par la communauté travaillant directement avec le GIS Sol mais semblent assez peu connues d'un certain nombre d'utilisateurs potentiels pour qui les sols sont importants. Par exemple, nos collègues climatologues, pour qui les sols jouent un rôle majeur, ont besoin d'information de qualité pour nourrir

leurs modèles mais n'utilisent que très peu les données du GIS Sol. Ainsi, les simulations réalisées avec le modèle ORCHIDEE, à l'échelle nationale, ne reposent sur aucune donnée sol produite actuellement par le GIS Sol (Lafont *et al.*, 2012).

3.1 Verrous scientifiques et techniques

La première raison de cette sous-exploitation réside sans doute dans la technicité de ces données, qui se rapportent à un objet complexe, le sol. La compréhension des données sol susceptibles d'être mobilisées pour la thématique du changement climatique est de fait compliquée par la diversité des supports et échelles décrits par la données sol (depuis l'échantillon de sol jusqu'au canton ou encore à l'unité de sol), faisant référence à des protocoles d'échantillonnages variés (dans le temps et l'espace), des méthodes d'analyse variées et enfin des données contextuelles, souvent extrêmement utiles pour valoriser utilement les données pédologiques (*e.g.* l'occupation du sol) mais elles aussi extrêmement diverses d'un programme à l'autre. Le support spatial de l'information pédologique ne correspond par ailleurs pas toujours aux supports utiles pour l'élaboration de politiques. Par exemple, à un niveau local, l'échelle de la communauté de communes est particulièrement pertinent en matière d'aménagement. Bourdellot (2020) a démontré que la production d'informations pédologique à ces échelles et à partir des produits du GIS sol était possible mais complexe, et parfois limitée par le manque d'informations pertinentes à cette échelle. Dès lors, l'exploitation des données du GIS Sol requiert le plus souvent l'intervention du personnel des instituts travaillant sur ces programmes, et en premier lieu INRAE, ce qui ralentit considérablement les chaînes de valorisation de ces données.

Les bases de données du GIS Sol, et cela n'est pas propre à la thématique traitée dans cet article, sont également complémentaires, et l'exploitation de ces complémentarités est requise pour certaines applications. Comme évoqué précédemment, la méthode ABC'Terre fait appel aux données combinées des Référentiels Régionaux Pédologiques et de la BDAT : les caractéristiques des sols fournies par les UTS identifiées au niveau de chaque UCS d'un Référentiel Régional Pédologique ne comprennent pas d'information récente sur la distribution statistique des teneurs en carbone organiques requises par le calcul des bilans de carbone des sols. Ces informations sont donc recherchées dans la BDAT, qui les contient, issues d'analyses de terre de parcelles agricoles mais localisées à la maille communale sur une grande partie de la France métropolitaine. Une méthode d'affectation spécifique a donc été développée sur quelques territoires pour assurer l'enrichissement de la description des teneurs en COS de surface des couples UCS/UTS en respectant la cohérence agronomique et pédologique des appariements (Scheurer *et al.*, 2020). L'affectation est fondée ainsi sur deux grands critères : un premier critère géographique d'intersection entre la commune

⁵ MAELIA : Modelling of socio-agro-ecological system for landscape integrated assesment ou « Modèle informatique générique pour évaluer les impacts environnementaux et socio-économiques de modes de gestion des ressources agricoles et naturelles à l'échelle du territoire ». <http://maelia-platform.inra.fr/>

de la parcelle échantillonnée et le contour de l'UCS et un second critère analytique de similitude des teneurs en argile et en calcaire entre l'analyse de terre BDAT et l'UTS de l'UCS intersectée (Figure 2).

Cependant, jusqu'à récemment, tout déploiement de la méthode ABC'Terre sur un territoire agricole requérait l'intervention de l'Unité INRAE InfoSol pour réaliser cette étape de constitution du jeu de données d'entrée des calculs de bilans, car seule cette équipe avait les droits d'accès aux données communales de la BDAT requises pour cette opération, les informations de la BDAT n'étant en effet délivrées publiquement que sous forme de statistiques agrégées à des échelles plus larges comme le canton, en accord avec les laboratoires partenaires.

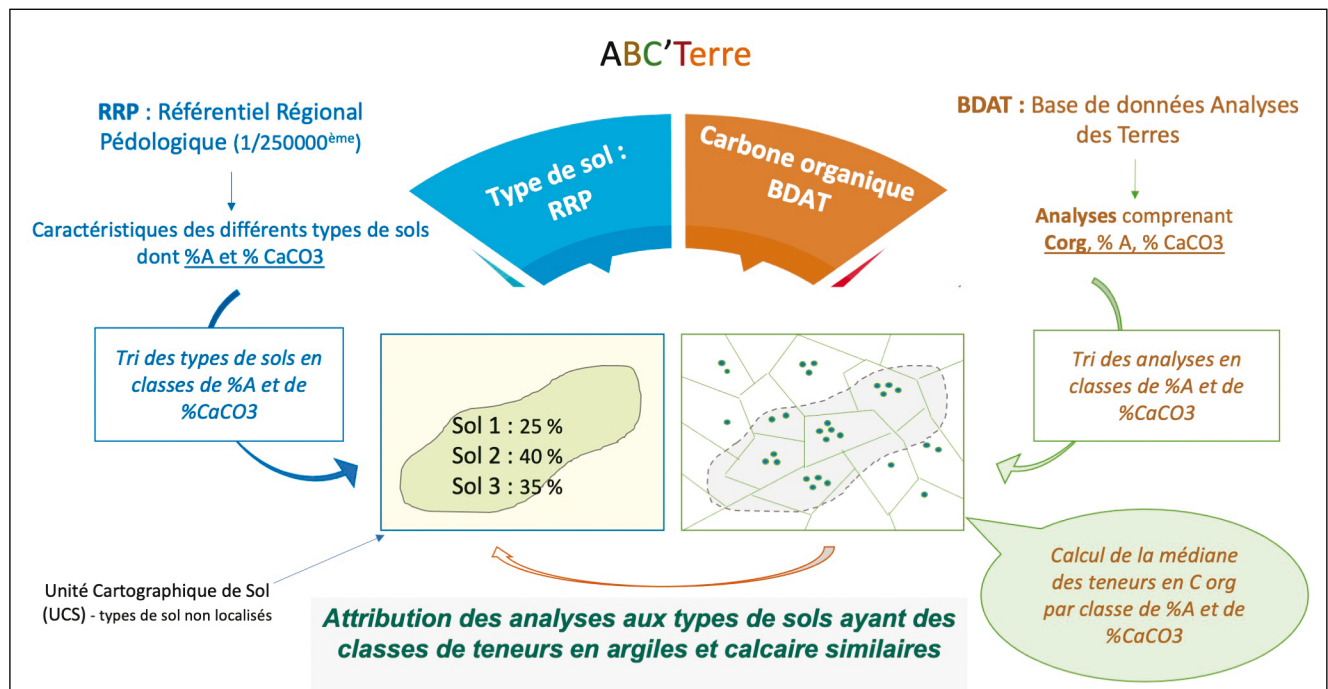
Cette contrainte d'accès aux résultats d'analyses de terre localisée à la communale de la BDAT faisait reposer sur l'équipe Infosol la lourde responsabilité de devoir répondre, dans des délais courts, à toute demande très ciblée associée au déploiement, sur un territoire agricole en France métropolitaine, de la méthode ABC'Terre ou de démarches similaires telles que celle que développe aussi la plateforme Maelia. Cela pouvait donc représenter un frein important à l'utilisation large des données sols mobilisables pour ces diagnostics territoriaux, alors que le contexte de développement des initiatives Bas

Carbone tend à les solliciter de façon croissante. Pour lever ce frein, un travail d'automatisation de la procédure d'affectation a été entrepris par l'unité InfoSol dans le cadre d'un projet IGCS lauréat 2020. Ce projet a permis de proposer une généralisation de la méthode d'affectation Scheurer *et al.* (2020) développée sur un territoire restreint à l'ensemble d'un référentiel pédologique qui couvre un département. Il a également produit des jeux de données prêts à l'emploi décrivant à l'échelle des couples UCS/UTS les distributions statistiques des teneurs en COS pour les référentiels du Grand-Est, du Loiret, de l'Indre, de la Charente-Maritime, de la Vendée, de l'Isère, de l'Oise. D'autres territoires seront progressivement disponibles mais des contraintes persistent sur la disponibilité des données nécessaires et sur les critères d'applicabilité de la méthode (l'algorithme doit être adapté pour les sols non calcaires, comme en Bretagne).

Au-delà de ce travail « à façon » dans le cadre de l'utilisation des données du GIS Sol, reste la problématique d'une mise à disposition plus automatisée de données prêtes à l'emploi. Si des progrès ont été faits sur la mise à disposition de données sur le COS, avec notamment la publication de certains jeux de données sur des entrepôts publics (voir par exemple <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/gissol>), via le site du GIS Sol (www.gissol.fr, mais voir toutefois certaines remarques ci-après concernant le site) ou, pour la BDAT via des applications web

Figure 2 : Affectation de teneurs en C organique issues de la BDAT aux types de sols des RRP, dans le cadre de la méthode ABC'Terre : Schéma de la démarche d'appariement des deux sources de données (Scheurer *et al.*, 2020).

Figure 2: Allocation of organic C contents from the BDAT to RRP soil types, as part of the ABC'Terre method: Diagram of the matching process for the two data sources (Scheurer *et al.*, 2020).



(bdat.gissol.fr), il n'existe actuellement pas d'outils permettant la production d'analyses à façon et qui faciliterait l'utilisation des données sol, pour certaines catégories d'utilisateurs. Il s'agirait par exemple d'outils d'analyse des données en ligne, connectés aux bases de données du GIS Sol, et qui permettraient la visualisation, l'exploration et la production de synthèses par un large public, y compris les pouvoirs publics. Si des solutions techniques existent et ont pour certaines été déjà testées, elles restent à développer et généraliser (ex : <https://traitementinfosol.pages.mia.inra.fr/statistiquesrmqs/>). Elles requièrent cependant des ressources non actuellement disponibles.

3.2 Accéder aux données ?

L'accessibilité des données au plus grand nombre pose d'abord et naturellement des difficultés d'ordre réglementaire notamment sur la propriété et le respect de la vie privée. Outre la combinaison de plusieurs réglementations juridiques, la particularité des programmes du GIS Sol tient à leur composante partenariale forte, où nombreuses sont les données tierces issues du secteur privé. Un équilibre est à trouver entre l'accès, dit « ouvert », promu par les réglementations « open data » et environnementales et les droits des fournisseurs (données à caractère personnel, secret des affaires...) (Rennes *et al.*, 2023). Bien que complexes, dans la mesure où elles doivent être instruites parfois au cas par cas, en fonction de l'utilisateur et de la donnée diffusée, ces questions ne devraient pas être un frein à long terme à un partage des données avec le plus grand nombre, d'autant que d'autres communautés ont réussi à résoudre ces problèmes. Des travaux juridiques sont encore en cours et vont se poursuivre sur ce sujet afin de faciliter l'accès à ces données (Fantappiè *et al.*, 2021).

Pour que des données sol soient utiles au plus grand nombre, il faut qu'elles soient accessibles facilement. Ceci peut sembler une évidence mais, dans le cadre des données du GIS Sol, ce n'est pas toujours le cas. Si le site du GIS Sol reste l'un des principaux points d'entrée pour accéder aux données du GIS, il n'existe pas de version en anglais et tous les jeux de données ne sont pas traduits, ce qui élimine d'emblée toute la population non francophone. Même si les moteurs de recherche permettent de traduire les contenus des sites, c'est un frein non négligeable à la recherche sur la thématique du climat, car pour ne parler que de la recherche française, de nombreux étudiants, post-doctorants et salariés étrangers peuplent nos laboratoires et certaines de nos institutions. Peut-être faut-il également envisager, au-delà du site du GIS Sol, de mettre en ligne ces données sur d'autres sites nationaux, plus connus, comme le géoportail national par exemple.

Un effort devrait également être fait pour contacter, et si besoin former, les communautés d'utilisateurs potentiels afin de leur faire connaître ces données. De nombreux chercheurs s'intéressent à la disponibilité en eau, au climat ou à la production

de biomasse par exemple ont besoin de données sur les sols qui soient de haute qualité afin de contraindre au mieux leurs outils et malheureusement il semblerait que ces communautés ne connaissent pas ou mal l'ensemble des données du GIS sol. Cette affirmation est plus une observation qu'une réelle étude mais il serait intéressant de réaliser une enquête auprès des chercheurs travaillant en lien avec les problématiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique, afin d'estimer leurs niveaux de connaissances concernant ces données, et d'améliorer la diffusion.

En conclusion de cette partie, les données du GIS sol pourraient être comparées à un volcan endormi qui aurait une activité potentielle très importante mais qui ne s'exprime pas, ou trop peu. Il faut donc tout faire pour que s'expriment au maximum les capacités des données du GIS à nous informer sur les sols du territoire. L'investissement accordé par les différents services de l'état pour obtenir ces données est important mais négliger la partie diffusion et accessibilité des données rend ces investissements peu efficaces. Il est donc urgent de mobiliser des moyens humains et financiers supplémentaires et pérennes pour permettre un accès simple et rapide à ces données. Ces moyens humains pourraient notamment traiter des difficultés réglementaires et d'outils d'interrogation pour ainsi permettre une meilleure diffusion des données. Ces travaux doivent être mis en place au sein du GIS Sol et en partenariat avec d'autres membres que sont par exemple l'IGN et le BRGM. Un exemple efficace de diffusion des données et qui pourrait être suivi est le Joint Research Center (JRC) qui produit des données sols entre autres à l'échelle de l'union européenne. Ces données sont disponibles *via* un unique portail suivant un format commun quel que soit le type de données et les équipes du JRC sont très actives pour communiquer autour des nouveaux produits notamment *via* une newsletter et les réseaux sociaux.

4. LE FUTUR DES PROGRAMMES D'ACQUISITION ?

Les grands programmes d'acquisition de données du GIS Sol évoluent. Certains sont matures et ne s'enrichissent plus (par exemple la BDGSF). D'autres, tels que les programmes IGCS, BDAT et RMQS, qui sont indissociables des activités de recherche, en amont pour définir les modalités de l'acquisition des données, et en aval pour produire de nouvelles connaissances *via* l'analyse des données brutes, continuent d'évoluer. Cette évolution se fait grâce à l'acquisition de nouvelles données en nombre et en diversité, le traitement de la donnée, ou encore l'apparition de projets connexes (comme par le passé les projets *GlobalSoilMap* ou encore *Ecomic-RMQS*). Cela s'applique naturellement à la thématique de l'adaptation et de l'atténuation du changement climatique. Nous y anticipons par exemple une meilleure association entre modélisation dynamique statistique

et mécaniste) des variations du COS, dans un but d'amélioration de notre compréhension des déterminants des variations de COS et notre aptitude à réaliser des projections. Les données du RMQS sont centrales sur ce point, et leur utilisation dans cet objectif devrait bénéficier du travail sur les données de gestion, de l'avancement de la deuxième campagne et enfin de la mise en place de programmes majeurs tels que le programme national de recherche et d'équipement prioritaire (PEPR) FairCarboN (<https://faircarbon.wordpress.com/>). Ce programme permettra notamment la valorisation des données de différentes campagnes du RMQS et sera un élément essentiel de la prise en compte de la fonction puits des sols, vis-à-vis des gaz à effet de serre, notamment dans le cadre de la Stratégie Nationale Bas Carbone. Les données IGCS devraient également, à terme, compléter celles de la BDGSF en proposant des informations pédologiques plus précises. Ces dernières pourraient être particulièrement utiles pour améliorer, depuis des échelles relativement locales (e.g. les échelles de la petite région agricole) jusqu'aux nationales, les cartographies numériques du COS, ainsi que les simulations spatialisées des modèles sol et sol/plante. En matière de cartographie numérique des sols, l'utilisation des RRP, qui représentent mieux la distribution spatiale fine des types de sols que la carte actuellement utilisée (i.e. tirée de la BDGSF), aboutira à des prédictions des niveaux de COS plus précises que celles diffusées actuellement par le GIS Sol. Dans cette même logique d'amélioration des produits résultant du traitement des données du GIS Sol, les liens avec d'autres bases de données pourraient être renforcés, à la fois pour mutualiser des efforts en termes de gestion de l'information, mais aussi en matière de recherches de complémentarités avec d'autres jeux de données (e.g. les complémentarités entre le RMQS et LUCAS Soil, qui font l'objet de travaux dans le programme EJP-Soil ou entre le RMQS et la BDAT pour les sols agricoles; les données de télédétection semblent également présenter un fort potentiel en matière d'estimation des teneurs en COS des sols et de forçage des modèles). Enfin, en ce qui concerne les estimations des émissions de N_2O et CH_4 , qui contrairement au CO_2 ne peuvent être directement estimées par l'observation des variations des propriétés du sol, un renforcement des collaborations avec les communautés travaillant sur ce type d'émissions serait utile. Elle permettrait de contribuer plus efficacement aux politiques d'atténuation sur ces aspects.

La BDAT est alimentée depuis sa création par les résultats d'analyses de terre qu'un certain nombre de laboratoires d'analyses, membres du GEMAS, lui ont transmis. La mise en place du RGPD, il y a quelques années, a rompu temporairement cette chaîne d'enrichissement continu de la base le temps de réaliser une étude juridique concertée entre les juristes de INRAE, d'Arvalis et d'Auréa afin de trouver un cadre juridique protégeant les transferts des données anonymisées.

Une voie complémentaire a été suggérée lors des échanges entre les porteurs et les partenaires du projet ABC^{Terre}-2a et les

représentants des Ministères et de l'ADEME : que les analyses de terre et les descriptions de sol réalisées dans le cadre de projets financés par des crédits publics, d'origine nationale ou régionale, en France, soient obligatoirement reversées à la BDAT et IGCS. Une première application de cette proposition a été inscrite dans l'appel à projets « Bons diagnostics Carbone » de l'ADEME, lancé en novembre 2021. Il serait intéressant que cette condition figure dans tous les nouveaux appels à projets nationaux soutenant des caractérisations de sol et des analyses de terre, d'autant que des développements sont en cours pour intégrer ces données plus facilement dans les bases de données nationales.

5. CONCLUSION

Les données du GIS Sol ont été, depuis plusieurs décennies, au cœur d'études mandatées par les pouvoirs publics et de la recherche sur l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, une recherche qui produit les connaissances sur lesquelles peuvent s'appuyer les décideurs publics. Ces données permettent de mieux comprendre et caractériser les rôles passé, présent et futur des sols en lien avec le changement climatique. Le potentiel des données du GIS Sol est toutefois sous-exploité, pour différentes raisons, et notamment la complexité de la donnée sol et son accès. Il semble raisonnable de préconiser un renforcement des efforts pour la faire mieux connaître, notamment auprès des communautés scientifiques et d'autres utilisateurs qui travaillent sur le changement climatique, d'améliorer son accessibilité et son inter-opérabilité. Il est indispensable de systématiser l'application des principes FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*) à la diffusion des données du GIS Sol, entre autres pour les données concernées par les thématiques climatiques. Ce sont les conditions pour la réalisation du plein potentiel des programmes du GIS, des programmes en évolution permanente, en matière de recherche et d'appui aux politiques pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique. Si le GIS Sol a déjà initié cette transition, des programmes tels que l'EJP SOIL et le PEPR FairCarboN devraient permettre d'accélérer la mise en visibilité de ces données, en travaillant à la fois sur les questions juridiques mais également sur les formats d'échange des données et les portails de diffusion. Cela placera la France en bonne position dans les discussions sur la construction d'un espace européen s'intéressant à la santé des sols, à travers notamment l'observatoire européen des sols (EUSO, <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/euso/euso-dashboard>).

REMERCIEMENTS

Nous remercions les tutelles du GIS Sol ainsi que l'ensemble des personnes ayant contribué aux programmes du GIS.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME I-CARE & Consult (2016). Sols et Changement climatique: Impacts et Adaptation. Etat des lieux de la recherche et identification de pistes de recherche. 93 pages.
- ADEME (2018). <https://www.territoires-climat.ademe.fr/actualite/loutil-aldo-pourune-premiere-estimation-de-la-sequestration-carbone-dans-les-sols-etla-biomasse>
- ADEME (2020). <https://www.ademe.fr/expertises/produire-autrement/productionagricole/passer-a-laction/dossier/evaluation-environnementale-agriculture/loutil-climagri>
- Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.-A., Soussana J.-F., Stengel P. (2002). Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? INRA. 332 pages.
- Bourdellot S. (2020). Influence du changement de support géographique de l'information pédologique dans les démarches de cartographie des services écosystémiques des sols (Mémoire Master 2). Parcours Gestion des sols et services écosystémiques, Université Paris-Saclay-AgroParisTech, INRAE Infosol.
- Bruni E., Chenu C., Abramoff R.Z., Baldoni G., Barkusky D., Clivot H., Huang Y., Kätterer T., Pikuła D., Spiegel H., Virto I., Guenet B. (2022). Multi-modelling predictions show high uncertainty of required carbon input changes to reach a 4% target. *European Journal of Soil Science* 73, 1–26. <https://doi.org/10.1111/ejss.13330>
- Cécillon L., Baudin F., Chenu C., Houot S., Jolivet R., Kätterer T., Lutfalla S., Macdonald A., van Oort F., Plante A.F., Savignac F., Soucémariadin L.N., Barré P. (2018). A model based on Rock-Eval thermal analysis to quantify the size of the centennially persistent organic carbon pool in temperate soils. *Biogeosciences* 15, 2835–2849. <https://doi.org/10.5194/bg-15-2835-2018>
- Chen S., Arrouays D., Angers D.A., Chenu C., Barré P., Martin M.P., ... Walter C. (2019). National estimation of soil organic carbon storage potential for arable soils: A data-driven approach coupled with carbon-landscape zones. *Science of the Total Environment*, 666, 355-367. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.249>
- CITEPA (2022). Rapport OMINEA – 19ème édition.
- Clivot H., Mouny J.-C., Duparque A., Dinh J.-L., Denoroy P., Houot S., Vertès F., Trochard R., Bouthier A., Sagot S., Mary B. (2019). Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environmental Modelling & Software* 118, 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.004>
- Curien M., Issanchou A., Degan F., Manneville V., Saby N.P.A., Dupraz P. (2021). Spreading herbivore manure in livestock farms increases soil carbon content, while granivore manure decreases it. *Agron. Sustain. Dev.* 41, 30. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00682-3>
- Delahaie A.A., Barré P., Baudin F., Arrouays D., Bispo A., Boulonne L., Chenu C., Jolivet C., Martin M.P., Ratié C., Saby N.P.A., Savignac F., Cécillon L. (2023). Elemental stoichiometry and Rock-Eval thermal stability of organic matter in French topsoils. *SOIL* 9, 209–229. <https://doi.org/10.5194/soil-9-209-2023>
- Ecuru J., MacRae E., Lang C. (2022). Bioeconomy: game changer for climate action. *Nature* 610, 630–630. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-03405-0>
- Fantappiè M., Peruginelli G., Conti S., Rennes S., van Egmond F., Le Bas C. (2021). Report on the national and EU regulations on agricultural soil data sharing and national monitoring activities. https://ejpsoil.eu/fileadmin/projects/ejpsoil/WP6/EJP_SOIL_D6.2_Report_on_national_and_EU_regulations_on_agricultural_soil_data_sharing.pdf
- Farina R., Marchetti A., Francaviglia R., Napoli R., Di Bene C. (2017). Modeling regional soil C stocks and CO2 emissions under Mediterranean cropping systems and soil types. *Agriculture Ecosystems & Environment* 238, 128–141. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.015>
- Guenet B., Gabrielle B., Chenu C., Arrouays D., Balesdent J., Bernoux M., Bruni E., Caliman J.P., Cardinael R., Chen S., Ciais P., Desbois D., Fouche J., Frank S., Henault C., Lugato E., Naipal V., Nesme T., Obersteiner M., Pellerin S., Powlson D.S., Rasse D.P., Rees F., Soussana J.-F., Su Y., Tian H., Valin H., Zhou F. (2021). Can N2O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage? *Global Change Biology* 27, 237–256. <https://doi.org/10.1111/gcb.15342>
- Guichard L., Ballot R., Glachant C., Aubert C. (2013) PERSYST, un outil d'estimation des PERformances agronomiques de SYSTèmes de culture - Adaptation à l'agriculture biologique en Ile-de-France. *Innovations Agronomiques* 32, 123-138
- Hénault C., Bourennane H., Ayzac A., Ratié C., Saby N.P.A., Cohan J.-P., Eglin T., Gall C.L. (2019). Management of soil pH promotes nitrous oxide reduction and thus mitigates soil emissions of this greenhouse gas. *Sci Rep* 9, 20182. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56694-3>
- Henin S., Dupuis M. (1945). Essai de bilan de la matière organique du sol. *Annales d'Agronomie* 1, 6–27.
- INRA (2018). Base de Données Géographique des Sols de France à 1/1 000 000 version 3.2.8.0, 10/09/1998. <https://doi.org/10.15454/BPN57S>
- Jolivet C., Arrouays D., Boulonne L., Saby N., Avec la collaboration technique de Berché P., Laloua D., Lehmann S., Tientcheu E., Yart G. (2006). Le Réseau de mesures de la Qualité des sols de France (RmQs) - Etat d'avancement et premiers résultats. *Étude et Gestion des Sols* 13, 149–164
- Juerges N., Hansjürgens B. (2018). Soil governance in the transition towards a sustainable bioeconomy – A review. *Journal of Cleaner Production* 170, 1628–1639. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.143>
- Kanari E., Cécillon L., Baudin F., Clivot H., Ferchaud F., Houot S., Levavasseur F., Mary B., Soucémariadin L., Chenu C., Barré P. (2022). A robust initialization method for accurate soil organic carbon simulations. *Biogeosciences* 19, 375–387. <https://doi.org/10.5194/bg-19-375-2022>
- Lafont S., Zhao Y., Calvet J.-C., Peylin P., Ciais P., Maignan F., Weiss M. (2012). Modelling LAI, surface water and carbon fluxes at high-resolution over France: comparison of ISBA-A-gs and ORCHIDEE. *Biogeosciences*, 9, 439–456. <https://doi.org/10.5194/bg-9-439-2012>, 2012.
- Laroche B., Degan F., Koller R., Scheurer O., Bouthier A., Moulin J., Sauter J., Ducommun C., Fort J.-L., Maillat S., Party J.-P., Renouard C., Saby N.P.A., Bertouy B. (2020). TYPTERRES : Vers une typologie agronomique partagée. *Étude et Gestion des Sols* 27, 241–255.
- Laroche B., Richer-de-Forges A.C., Tientcheu Nguenkam M.E., Lehmann S., Helies F., Bardy M., Moreira N., Le Barh C., Fourvel G., Guellier C., Arrouays D. (2013). Le programme IGCS.
- Launay C., Constantin J., Chlebowski F., Houot S., Graux A.-I., Klumpp K., Martin R., Mary B., Pellerin S., Therond O. (2021). Estimating the carbon storage potential and greenhouse gas emissions of French arable cropland using high-resolution modeling. *Global Change Biology* 27, 1645–1661. <https://doi.org/10.1111/gcb.15512>
- Mao Z., Derrien D., Didion M., Liski J., Eglin T., Nicolas M., Jonard M., Saint-André L. (2019). Modeling soil organic carbon dynamics in temperate forests with Yasso07. *Biogeosciences* 16, 1955–1973. <https://doi.org/10.5194/bg-16-1955-2019>
- Martin M.P., Wattenbach M., Smith P., Meersmans J., Jolivet C., Boulonne L., Arrouays D. (2011). Spatial distribution of soil organic carbon stocks in France. *Biogeosciences* 8, 1053–1065. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1053-2011>
- Martin M.P., Arrouays D., Barré P., Boulonne L., Cécillon L., Chen S., Chenu C., Eglin T., Guenet B., Meersmans J., Mulder V.L., Saby N.P.A. (2022). Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols pour l'étude du carbone organique des sols en France métropolitaine. *Avancées scientifiques et applications. Le RMQS pour l'étude du carbone organique des sols. Étude et Gestion des Sols* 29, 327–349.
- Martin M.P., Dimassi B., Román Dobarco M., Guenet B., Arrouays D., Angers D.A., Blache F., Huard F., Soussana J.-F., Pellerin S. (2021). Feasibility of the 4 per 1000 aspirational target for soil carbon: A case study for France. *Global Change Biology* 27, 2458–2477. <https://doi.org/10.1111/gcb.15547>
- Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gommis M.I., Huang M., Leitze K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O.,

- Yu R., Zhou B. (2021). Climate change 2021: The physical science basis summary for policymakers. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1260/095830507781076194>
- Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.-S., Cheng K., Das B.S., Field D.J., Gimona A., Hedley C.B., Hong S.Y., Mandal B., Marchant B.P., Martin M., McConkey B.G., Mulder V.L., O'Rourke S., Richer-de-Forges A.C., Odeh I., Padarian J., Paustian K., Pan G., Poggio L., Savin I., Stolbovov V., Stockmann U., Sulaeman Y., Tsui C.-C., Vågten T.-G., van Wesemael B., Winowiecki L. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- Mulder V.L., Lacoste M., Richer-de-Forges A.C., Martin M.P., Arrouays D. (2016). National versus global modelling the 3D distribution of soil organic carbon in mainland France. *Geoderma* 263, 16–34. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.035>
- Parton W.J., Schimel D.S., Cole C.V., Ojima D.S. (1987). Analysis of Factors Controlling Soil Organic Matter Levels in Great Plains Grasslands. *Soil Science Society of America Journal* 51, 1173–1179. <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100050015x>
- Pellerin S., Bamière L., Savini I., Rechauchère O., Launay C., Martin R., Schiavo M., Angers D., Augusto L., Balesdent J., Basile-Doelsch I., Bellassen V., Cardinael R., Cécillon L., Ceschia E., Chenu C., Constantin J., Daroussin J., Delacote P., Delame N., Gastal F., Gilbert D., Graux A.-I., Guenet B., Houot S., Klumpp K., Letort E., Litrico I., Martin M., Menasseri-Aubry S., Meziere D., Morvan T., Mosnier C., Roger-Estrade J., Saint-André L., Sierra J., Therond O., Viaud V., Grateau R., Le Perchec S. (2021). Stocker du carbone dans les sols français, Matière à débattre et décider. Éditions Quæ.
- Petrescu A.M.R., Qiu C., Ciais P., Thompson R.L., Peylin P., McGrath M.J., Solazzo E., Janssens-Maenhout G., Tubiello F.N., Bergamaschi P., Brunner D., Peters G.P., Höglund-Isaksson L., Regnier P., Lauerwald R., Bastviken D., Tsuruta A., Winiwarter W., Patra P.K., Kuhnert M., Oreggioni G.D., Crippa M., Saunio M., Perugini L., Markkanen T., Aalto T., Groot Zwaartink C.D., Tian H., Yao Y., Wilson C., Conchedda G., Günther D., Leip A., Smith P., Haussaire J.-M., Leppänen A., Manning A.J., McNorton J., Brockmann P., Dolman A.J. (2021). The consolidated European synthesis of CH₄ and N₂O emissions for the European Union and United Kingdom: 1990–2017. *Earth System Science Data* 13, 2307–2362. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2307-2021>
- Poeplau C., Don A., Six J., Kaiser M., Benbi D., Chenu C., Cotrufo M.F., Derrien D., Gioacchini P., Grand S., Gregorich E., Griepentrog M., Gunina A., Haddix M., Kuzyakov Y., Kuehnelt A., Macdonald L.M., Soong J., Trigalet S., Vermeire M.-L., Rovira P., van Wesemael B., Wiesmeier M., Yeasmin S., Yevdokimov I., Nieder R. (2018). Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils - A comprehensive method comparison. *Soil Biol. Biochem.* 125, 10–26. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.06.025>
- Rennes S., Le Bas C., Le Bideau S., Hissel F. (2023). Prendre en compte le statut juridique des données dans les programmes du GIS Sol. *Etude et Gestion des Sols*, 30, 253-262.
- Riggers C., Poeplau C., Don A., Bamminger C., Höper H., Dechow R. (2019). Multi-model ensemble improved the prediction of trends in soil organic carbon stocks in German croplands. *Geoderma* 345, 17–30. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.014>
- Rodrigues L., Hardy B., Huyghebaert B., Fohrafellner J., Fornara D., Barančíková G., Bárcena T.G., De Boever M., Di Bene C., Feizienė D., Kätterer T., Laszlo P., O'Sullivan L., Seitz D., Leifeld J. (2021). Achievable agricultural soil carbon sequestration across Europe from country-specific estimates. *Global Change Biology* 27, 6363–6380. <https://doi.org/10.1111/gcb.15897>
- Saby N., Foucaud Lemerrier B., Arrouays D., Leménager S., Louis B., Millet F., Paroissien J.B., Schellenberger E., Squidant H., Swiderski C., Toutain B., Walter C., Bardy M. (2014). Le programme Base de Données des Analyses de Terre (BDAT) : Bilan de 20 ans de collecte de résultats d'analyses. *Etude et Gestion des Sols* 21, 141–150.
- Scheurer O., Boussetin X., Saby N. (2020). Une méthode pour caractériser les teneurs en carbone organique des types de sol d'un Référentiel Régional Pédologique sur un territoire agricole à partir de la Base de Données des Analyses de Terre. *Etude et Gestion des Sols* 27, 189–207.
- Schmidt M.W.I., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Kleber M., Koegel-Knabner I., Lehmann J., Manning D.A.C., Nannipieri P., Rasse D.P., Weiner S., Trumbore S.E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 478, 49–56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- Sleutel S., De Neve S., Hofman G. (2007). Assessing causes of recent organic carbon losses from cropland soils by means of regional-scaled input balances for the case of Flanders (Belgium). *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 78, 265–278. <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9090-x>
- Svendsen H., Hansen S., Jensen H.E. (1995). Simulation of crop production, water and nitrogen balances in two German agro-ecosystems using the DAISY model. *Ecological Modelling*, Modelling of Geo-Biosphere Processes 81, 197–212. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(94\)00171-D](https://doi.org/10.1016/0304-3800(94)00171-D)
- von Lütow M., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Flessa H., Guggenberger G., Matzner E., Marschner B. (2007). SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry* 39, 2183–2207. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.03.007>