



HAL
open science

Diffusion des référentiels régionaux pédologiques sous la forme d'une carte des sols dominants (France métropolitaine - Hors Corse) accessible sur le Géoportail

Alexis Messant, Sébastien Lehmann, Joël Moulin, Philippe Lagacherie, Stéphanie Jalabert, Aurélien Noraz, Blandine Lemercier, Ahmed Chafchafi, Jean-Pascal Mure, Bertrand Laroche, et al.

► To cite this version:

Alexis Messant, Sébastien Lehmann, Joël Moulin, Philippe Lagacherie, Stéphanie Jalabert, et al.. Diffusion des référentiels régionaux pédologiques sous la forme d'une carte des sols dominants (France métropolitaine - Hors Corse) accessible sur le Géoportail. *Étude et Gestion des Sols*, 2021, 28, pp.57-69. hal-03121194

HAL Id: hal-03121194

<https://hal.inrae.fr/hal-03121194>

Submitted on 26 Jan 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.

Diffusion des Référentiels Régionaux Pédologiques sous la forme d'une carte des sols dominants (France métropolitaine hors-Corse) accessible sur le Géoportail

A. Messant⁽¹⁾, S. Lehmann⁽¹⁾, J. Moulin⁽²⁾, P. Lagacherie⁽³⁾, S. Jalabert⁽⁴⁾, A. Noraz⁽⁵⁾, B. Lemerrier⁽⁶⁾, A. Chafchafi⁽⁷⁾, J.-P. Mure⁽⁸⁾, B. Laroche^(1*) et J. Sauter⁽⁹⁾

- 1) Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement - INRAE, US 1106 InfoSol, Orléans, France.
- 2) Chambre d'agriculture de l'Indre, France.
- 3) Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement - INRAE, UMR 1221 LISAH, Montpellier, France.
- 4) Bordeaux Sciences Agro, EA 4592 Géoressources et Environnement (Bdx INP-ENSEGID), France.
- 5) Conservatoire d'espaces naturels Normandie Seine, France.
- 6) UMR SAS, Institut Agro, INRAE, 35000 Rennes, France.
- 7) Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture, France.
- 8) Chambre d'agriculture de l'Isère, France.
- 9) Chambre régionale d'agriculture Grand Est, France.

* Auteur correspondant : bertrand.laroche@inrae.fr

RÉSUMÉ

Cet article présente la méthode employée pour créer la carte des sols dominants de France métropolitaine (hors Corse). Cette carte est produite à partir des Référentiels Régionaux Pédologiques d'échelle 1/250 000 issus du programme Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (IGCS). Elle est publiée en visualisation sur le Géoportail de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). Cette infrastructure, de par sa visibilité nationale, est à même de toucher un large public non-initié à la pédologie et de permettre de porter à connaissance les bases de données sols couvrant la quasi-totalité du territoire métropolitain. Cette première publication de données sol sur le Géoportail constitue une porte d'entrée permettant d'avoir un aperçu des grands types de sols dominants d'un périmètre et d'identifier les organismes contacts dans les territoires pour pouvoir accéder à toute la richesse d'informations disponibles sur les sols. Cette initiative devrait être suivie par la publication d'autres données sur les sols sur le Géoportail.

Mots-clés

Cartographie, sols dominants, sol, base de données, RRP, DoneSol, IGCS, GIS Sol, RMT Sols et Territoires, France.

Comment citer cet article :

Messant A., Lehmann S., Moulin J., Lagacherie P., Jalabert S., Noraz A., Lemerrier B., Chafchafi A., Mure J.-P., Laroche B. et Sauter J., 2021 - Diffusion des Référentiels Régionaux Pédologiques sous la forme d'une carte des sols dominants (France métropolitaine hors-Corse) accessible sur le Géoportail *Etude et Gestion des Sols*, 28, 57-69

Comment télécharger cet article :

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

Comment consulter/télécharger

tous les articles de la revue EGS :

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

SUMMARY**ACCESS TO NATIONAL SIMPLIFIED SOIL MAPS THROUGH THE NATIONAL GEOPORTAL**

The aim of this article is to present the methodology used to create the map of dominant soils in metropolitan France (excluding Corsica). This map has been produced from the Regional Soil Reference at a scale of 1:250,000 from the IGCS programme. It is published for visualization on the Géoportail of the National Institute of Geographic and Forest Information (IGN). This infrastructure, due to its national visibility, is able to reach a large public not familiar with pedology and thus makes it possible to bring a large public's attention to the soils and to all the data available on them. This first publication of soil data on the Géoportail is a gateway to quickly identify the major soil types and their characteristics, but also to find contact points in the territories to access the wealth of soil information. This initiative should be followed by the publication of further soil data through the Géoportail.

Key-words

Cartography, dominant soils, soil, database, RRP, DoneSol, IGCS, GIS Sol, RMT Sols et Territoires, France.

RESUMEN**DIFUSIÓN DE LOS REFERENCIALES REGIONALES PEDOLÓGICOS BAJO FORMA DE UN MAPA DE SUELOS DOMINANTES (FRANCIA METROPOLITANA SALVO CÓRCEGA) ACCESIBLE EN GEOPORTAIL**

Este artículo presenta el método usado para crear el mapa de suelos dominantes de Francia metropolitana (salvo Córcega). Se produjo este mapa a partir de los Referenciales Regionales Pedológicos a escala de 1/250 000 resultante del programa Inventario, Gestión y Conservación de los Suelos (IGCS). Se publica en visualización sobre el Geoportail del Instituto Nacional de la Información Geográfica y Forestal (IGN). Esta infraestructura, por su visibilidad nacional, puede llegar a un amplio público no iniciado a la pedología y permitir llevar a conocimiento las bases de datos de suelos que cubren la casi-totalidad del territorio metropolitano. Esta primera publicación de datos de suelos en Geoportail constituye una puerta de entrada para tener una mirada de los grandes tipos de suelos dominantes en un perímetro e identificar los organismos contactos en los territorios para poder alcanzar la riqueza de las informaciones disponibles sobre los suelos. Esta iniciativa debería ser seguida por la publicación de otros datos sobre los suelos en Geoportail.

Palabras clave

Cartografía, suelos dominantes, suelo, bases de datos, RRP, DoneSol, IGSC, GIS Sol, RMT suelos y territorios, Francia.

INTRODUCTION

Le sol joue un rôle essentiel dans la structure et le fonctionnement des écosystèmes terrestres. Il représente une zone d'échanges entre les différentes composantes du globe à savoir la biosphère, en partie intégrée et recyclée par les organismes du sol, et la lithosphère sous-jacente qui s'altère au contact de l'air et de l'eau pour offrir le matériau parental nécessaire à la genèse des sols (Ducommun et Lucot, 2017). Le sol stocke et fournit ainsi des nutriments et de l'eau pour les plantes et d'autres organismes vivants. Il est le support de la croissance des plantes et de multiples activités humaines. Dans le contexte où la pression sur ces sols est de plus en plus importante (Montanarella *et al.*, 2016), permettre la compréhension et éveiller l'intérêt du grand public à la diversité des sols s'avère une nécessité.

La cartographie systématique des sols de France a débuté en 1967 et a été marquée en 1993 par la mise en place du programme IGCS (Inventaire, Gestion et Conservation des Sols) (Arrouays, 2004). Ce programme a pour ambition d'identifier et de cartographier les sols du territoire national à diverses échelles. Le programme se décline en 3 volets (Laroche *et al.*, 2014) : un volet à l'échelle du 1/250 000 - Référentiel Régional Pédologique ou RRP (InfoSol, 2014), un volet à moyennes échelles - 1/50 000 à 1/100 000, intitulé Connaissance Pédologique de la France ou CPF (Richer-de-Forges *et al.*, 2014) et un volet à des échelles très précises - 1/10 000 à 1/5 000, dit Secteurs de Référence ou SR (Favrot, 1989). Le pilotage scientifique du programme IGCS est assuré par l'unité de service (US) INRAE InfoSol. Il a été mis en œuvre dans les territoires par près d'une trentaine d'acteurs (Chambres d'agriculture, Ecoles supérieures d'agronomie, SAFER, Conservatoire des espaces naturels, Société du canal de Provence, Universités, DRAAF, avec dans certains cas l'intervention de bureaux d'étude experts en pédologie). Toutes les données collectées et synthétisées sont capitalisées dans une structure de base de données nationale : DoneSol (Grolleau *et al.*, 2004, INRAE 2017). A ce jour, la seule information exhaustive sur le territoire métropolitain est la Base de Données Géographique des Sols de France (BDGSF) au 1/1 000 000. Il s'agit d'une des composantes de la Base de Données Géographique des Sols d'Europe (BDGSE). Celle-ci est très utilisée à l'échelle européenne (Voltz *et al.*, 2018). Toutefois, sa résolution spatiale et son contenu sémantique sont fortement limitants quant à ses utilisations possibles (INRA, 1998). Les RRP sont en phase de finalisation avec 92 % du territoire métropolitain couverts à ce jour (Voltz *et al.*, 2018), et constituent un progrès substantiel par rapport à la connaissance cartographique nationale actuelle des sols, notamment en termes de résolution spatiale et de données sémantiques quantifiées.

La diffusion de ces données cartographiques sur les sols et des métadonnées associées est sous la responsabilité des maîtres d'ouvrage de chaque déclinaison du programme IGCS dans les territoires régionaux ou départementaux concernés. Chaque gestionnaire définit le moyen de diffusion de ces don-

nées à travers des plateformes, le plus souvent locales (échelle régionale). Peu d'exemples concernent des initiatives de diffusion et de valorisation s'appuyant sur un outil d'envergure potentiellement nationale. Le constat qui en découle est que les informations sur les sols ne sont pas suffisamment connues, du fait de cet historique basé sur une gestion par région et par des acteurs locaux divers, dont les moyens sont souvent limités pour diffuser cette connaissance. Pourtant, les besoins et attentes des utilisateurs en matière d'accès aux données sols prennent de plus en plus d'ampleur, comme le suggèrent les résultats de l'enquête menée dans le cadre de l'étude sur « Les perspectives d'évolution de la cartographie des sols en France » (Voltz *et al.*, 2018 ; Richer-de-Forges *et al.*, 2019).

En réponse, le Groupement d'Intérêt Scientifique GIS Sol (dont la mission est de coordonner des programmes d'inventaire et de surveillance des sols) et le réseau mixte technologique (RMT) Sols et Territoires (dont la mission est d'accroître et de valoriser la connaissance des sols pour le développement durable des territoires ruraux) ont uni leurs efforts pour produire une carte des grands types de sols en France métropolitaine à partir des RRP. En effet, les RRP représentent actuellement la donnée pédologique cartographique la plus précise disponible sur la quasi-totalité du territoire français. Le but était de faire apparaître pour la première fois des informations sur les sols au 1/250 000 au niveau national, via la plateforme Géoportail (<https://www.geoportail.gouv.fr/>) de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), qui est par ailleurs membre du GIS sol.

De par son audience, ce site permet de toucher un public plus large que les sphères professionnelles agricoles qui connaissent déjà ces données, et de développer de nombreuses applications et actions de sensibilisation. Ce point d'entrée permet d'identifier rapidement les grands types de sols mais aussi d'y trouver les contacts des organismes gestionnaires des bases de données dans les territoires pour pouvoir accéder à toute la richesse d'informations de ces bases de données pédologiques. Le Géoportail rend ainsi visible et accessible la synthèse de dizaines d'années de capitalisation de données scientifiques sur les sols.

LES RÉFÉRENTIELS RÉGIONAUX PÉDOLOGIQUES COMME BASES DE TRAVAIL

Présentation des Référentiels Régionaux Pédologiques

Les Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP), issus du programme IGCS, sont des bases de données géographiques sur les sols documentées et harmonisées. Chaque RRP est une

synthèse des connaissances sur la répartition et la nature des types de sols d'une région ou d'un département. Ils ont pour objectif de déterminer les caractéristiques principales des sols en vue de leur gestion et de leur conservation (INRA InfoSol, 2014). La construction des RRP est définie par un cahier des charges et leur précision spatiale correspond au minimum à celle d'un rendu cartographique à l'échelle de 1/250 000. Ils représentent, sous forme de carte digitalisée, des polygones d'Unités Cartographiques de Sols (UCS) géoréférencés qui regroupent une ou plusieurs Unités Typologiques de Sols (UTS).

Une Unité Cartographique de Sol (UCS) représente une portion du paysage dans laquelle les facteurs de genèse des sols suivants sont homogènes : morphologie, géologie, climat, et pour certains cas, occupation du sol (Bornand *et al.*, 1989). Les limites des UCS, à cette échelle, correspondent le plus souvent soit à des limites topographiques (rupture de pente, courbe de niveau, vallées...), soit à des limites lithologiques ou géomorphologiques. Dans certains cas peuvent également intervenir des limites liées à des dépôts de matériaux éoliens. Leur identifiant permet de faire le lien avec une base sémantique qui décrit leur contenu.

L'Unité Typologique de Sol (UTS) est une portion de la couverture pédologique qui présente les caractères diagnostiques d'une pédogenèse identique et qui présente en tout lieu de l'espace la même succession d'horizons. Un horizon ou un regroupement de plusieurs horizons constitue des strates pour les UTS. Ces strates décrivent et intègrent les variations spatiales des propriétés des horizons pour chaque UTS. Les UTS sont ainsi caractérisées par des variables (attributs) spécifiant la nature et les propriétés des sols (éléments grossiers, texture, pH, etc.) pour chacune de leurs strates. Les UTS sont définies grâce à des observations ponctuelles réalisées par sondages et profils pédologiques. La densité de ces observations détermine la précision sémantique du RRP (INRA InfoSol, 2014 ; AFNOR, 2007).

Les sols variant rapidement dans l'espace, les limites géographiques des UTS ne sont pas représentables à l'échelle 1/250 000. En revanche, le pourcentage relatif de surface occupé par chaque UTS au sein des UCS est estimé et renseigné dans la base de données, ainsi que les modes d'organisation spatiale des UTS au sein des UCS (chaîne, séquence, juxtaposition de sols...).

Les informations géographiques des RRP sont au format vecteur (polygones, points) et les données sémantiques associées sont au format national DoneSol (Grolleau *et al.*, 2004). La structure de la base de données permet une manipulation des informations par des logiciels d'analyses cartographiques (Système d'Information Géographique ou SIG) ce qui permet de les intégrer dans des domaines d'application variés. Les RRP peuvent être mobilisés sur des thématiques environnementales, agricoles, d'aménagement du territoire, etc. (INRA InfoSol, 2014).

Le volet RRP du programme IGCS s'est développé région par région, voire département par département, avec un porteur local qui en est le référent (Lemercier *et al.*, 2017). Vingt-huit partenaires locaux sont répartis sur l'ensemble du territoire français métropolitain et ont chacun la gestion du RRP d'un ou plusieurs départements. Le coordinateur national (INRAE InfoSol) a également en charge la réalisation de certains RRP.

Les RRP sont les éléments de base qui ont permis de constituer la carte des sols de France métropolitaine diffusée via le Géoportail. Le travail a été effectué sur les RRP originaux, étude par étude (un RRP correspondant à une étude). 67 RRP ont ainsi été mobilisés pour ce travail. Des conventions ont été mises en place entre chaque partenaire ayant réalisé le RRP et INRAE pour autoriser la publication de la carte sur le Géoportail.

Etat d'avancement des RRP

Ces dernières années, la constitution des RRP a été le travail de cartographie prioritaire au sein du programme IGCS, avec pour objectif d'obtenir une carte des sols au 1/250 000 de la France entière. Sur le territoire métropolitain, l'ensemble des départements est aujourd'hui engagé dans cette démarche (*figure 1-A*). Les Référentiels Régionaux Pédologiques constituent la donnée cartographique pédologique la plus précise et la plus complète à l'heure actuelle sur le territoire national. La cartographie des sols de la quasi-totalité des départements français (hors outre-mer) est finalisée. Toutefois, les RRP de la Corse, de l'ex-Franche-Comté, de l'Aveyron, de la Haute-Loire et du Cantal sont toujours en cours de constitution.

Les cartes des sols de certains territoires ultramarins sont finalisées à des échelles plus précises, compte-tenu de leur faible emprise géographique (hors Guyane). Les zones cartographiées par l'IRD (Nouvelle Calédonie, Martinique et Wallis-et-Futuna) ont un format sémantique différent de DoneSol : VALSOL (Beaudou et Martret, 2004). Leur migration au format DoneSol est encore à réaliser. Concernant les autres territoires, seul l'ouest de la Guadeloupe est achevé et au format DoneSol. Il reste principalement à finaliser St Pierre-et-Miquelon, la Guyane, Mayotte ; la Polynésie Française, les terres australes et la Réunion (*figure 1-B*).

MÉTHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE POUR LA RÉALISATION DE LA CARTE DES SOLS

La démarche d'élaboration de la représentation nationale de la carte des sols issue des RRP a été conduite par un groupe de travail rassemblant des experts de DoneSol et des pédologues issus des communautés IGCS et RMT Sols et Territoires.

Choix de la variable à représenter : Le Grand Ensemble de Référence ou GER

Extraction et agrégation des GER

Compte-tenu de la diversité des sols présents au sein d'une même UCS d'un RRP (jusqu'à 10 UTS différentes), le choix a été fait de représenter le sol dominant en s'appuyant sur le champ GER (Grand Ensemble de Référence) qui est renseigné dans DoneSol au niveau de l'UTS.

Les GER découlent du Référentiel Pédologique des sols français en vigueur (Baize *et al.*, 2008). Dans cette classification, 35 GER principaux y sont décrits avec leurs variantes (appelées « références ») qui sont au nombre de 110. L'ensemble des GER décrits et leurs variantes associées sont caractérisés par une pédogénèse particulière et des propriétés (morphologiques, physiques et/ou chimiques) qui leur sont propres.

DoneSol reprend ces GER et variantes sous la forme de 154 types de sols distincts (intitulé « GER RP 2008 ») (Dictionnaire de données DoneSol 3.7.). Le contenu du champ « GER RP 2008 » issu de DoneSol a été utilisé pour la sélection des types de sols présents dans la légende de la carte.

Vu le grand nombre de GER décrits dans DoneSol, de points communs entre certains, et de la faible représentativité surfacique d'autres, cette classification a été simplifiée.

Elle a consisté à reprendre, avec quelques modifications, les 35 GER principaux décrits dans le référentiel pédologique français 2008 et de regrouper les 154 « GER RP 2008 » de DoneSol au sein de ces grandes familles en fonction de leur proximité pédogénétique.

Exemple : les GER « LUVISOL TYPIQUE », « LUVISOL DEGRADE », « LUVISOL DERNIQUE », « LUVISOL TRONQUE » et « QUASI-LUVISOL » ont été regroupés dans les « Luvisols ».

Parmi les 35 GER principaux résultants, 2 ont été considérés comme sous-représentés en terme de superficie totale sur l'ensemble des RRP. Ils représentaient moins de 10 km², et ont donc été supprimés. Au final, 33 GER principaux ont été sélectionnés pour symboliser les 33 grands types de sols de la légende de la carte (*cf. figure 5*).

Détermination du sol dominant par UCS

Une carte des sols dominants implique que pour chaque polygone de la carte, un sol dominant est déterminé puis représenté avec une couleur qui corresponde à une sémiologie graphique définie.

Pour chaque RRP, le type de sol dominant d'une UCS est déterminé en recherchant le GER dont la surface est la plus importante. Le pourcentage relatif de surface occupée par chaque UTS au sein de l'UCS permet de calculer la surface occupée par chaque GER au sein de l'UCS. Le regroupement des GER

Figure 1 - A : date de finalisation des Référentiels Régionaux Pédologiques- B : Etat d'avancement des territoires ultra-marins.

Figure1 - A: End date of regional mapping B: State of progress of soil mapping of overseas territories.

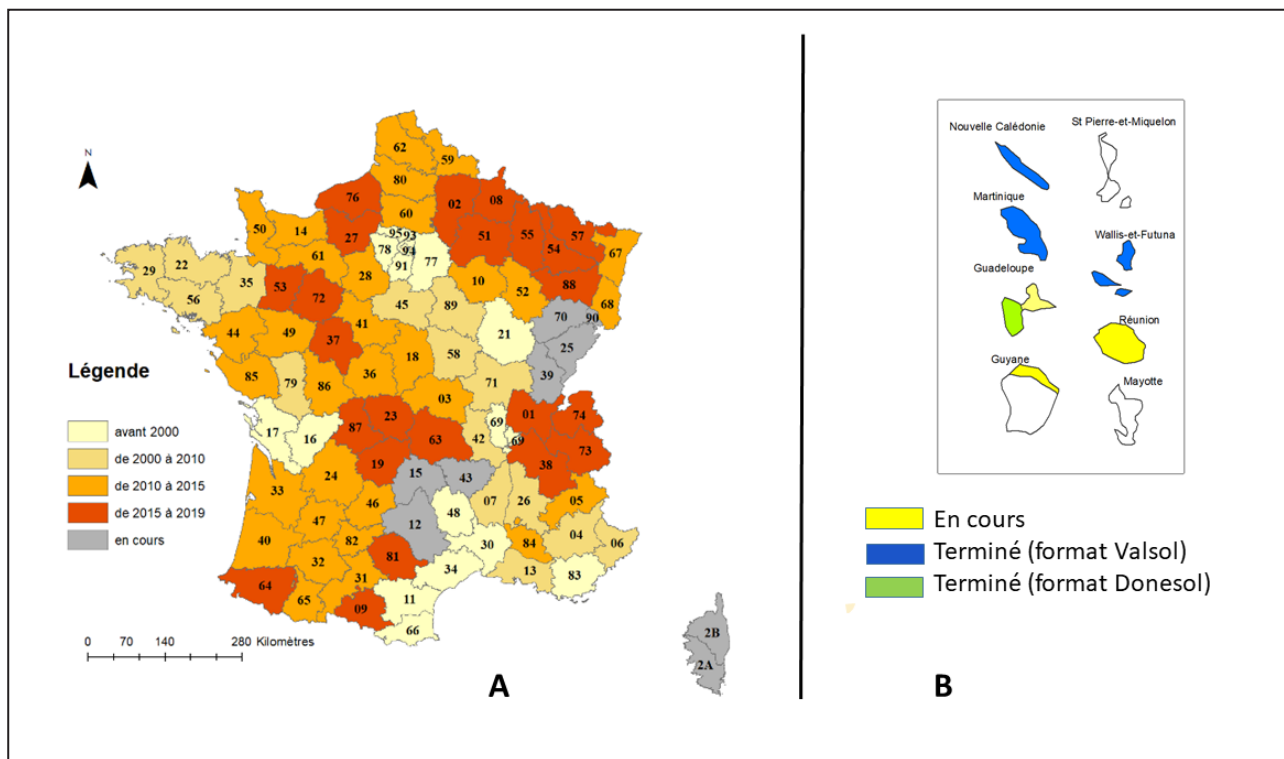


Figure 2 - Exemple de choix du Grand Ensemble de Référence dominant.

Figure 2 - Exemple de choix pour le dominant soil class group.

Type de sols (GER)	%
LUVISOL	50
NEOLUVISOL	30
FLUVIOSOL calcaire	20

→

Type de sol dominant : LUVISOL (50%)

proches effectué précédemment implique donc que les pourcentages de ces derniers sont additionnés. Le GER ayant le pourcentage le plus important est déclaré « dominant » (*figure 2*).

Dans certains cas, au sein d'une UCS, plusieurs GER dominants possèdent des pourcentages relatifs de surface identiques ; on parle alors de GER en « conflit ». La *figure 3* montre que le problème impacte un nombre important d'UCS (environ 629 sur 7 328 soit 8,5 %, ce qui fait 2 423 000 ha environ) au sein des différents RRP disponibles.

Pour éviter des choix aléatoires, la couche graphique et l'information des UCS contiguës ont été utilisées de façon à conserver un maximum de diversité des types de sols. L'autre objectif est d'aider l'auteur ou le gestionnaire des RRP à choisir une représentation des GER en conflit. Dans ce contexte, un outil d'aide à la résolution de ces conflits GER a été développé : l'algorithme ADATSD pour Algorithme de Détermination Automatique du Type de Sol Dominant. Après application de cet algorithme, l'ensemble de ces propositions a été soumis pour validation aux gestionnaires locaux de chacun des RRP.

L'algorithme ADATSD pour Algorithme de Détermination Automatique du Type de Sol Dominant

L'ensemble des traitements a été réalisé avec le logiciel R (R Foundation for Statistical Computing, v3.4.2). Les choix concernant la sémiologie graphique de la carte et la mise en forme des cartes ont été réalisés à l'aide des logiciels SIG (Systèmes d'information Géographiques) : ArcGis 10.7.1 et Qgis 3.2.3.

Fonctionnement de l'algorithme

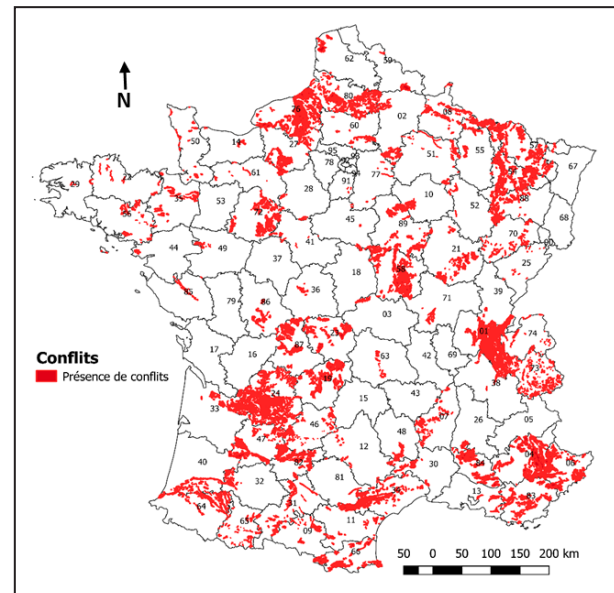
Afin de mettre en œuvre une méthode d'attribution du GER dominant se basant à la fois sur le pourcentage de surface occupée par chaque GER au sein de l'UCS et sur l'étude du voisinage cartographique de chaque UCS, un algorithme a été créé et adapté sur R : l'Algorithme de Détermination Automatique du Type de Sol Dominant (ADATSD).

Cet algorithme fonctionne de la manière suivante :

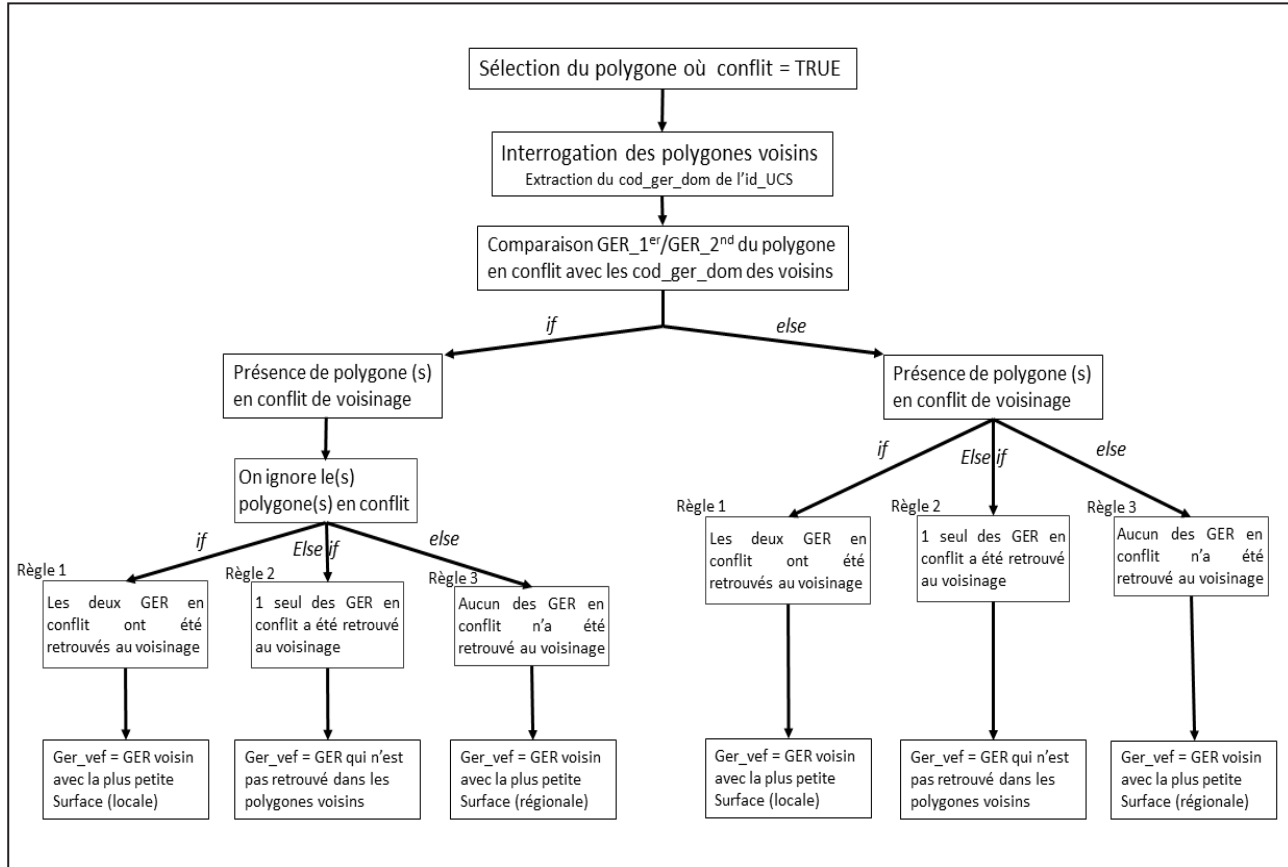
1. Extraction de l'ensemble des données de la base de données DoneSol ;

Figure 3 - Carte des polygones présentant des GER en conflits.

Figure 3 - Map of polygons with conflicting main soil classes.



2. Calcul par UCS du pourcentage de surface occupée par le type de sol (ou GER) en sommant les pourcentages relatifs de surface occupée par les UTS appartenant à un même GER ;
3. Identification des UCS présentant des GER dominants ayant des pourcentages égaux. On parle alors de « conflit » entre plusieurs GER (le plus souvent 2, potentiellement plus).
 - 3.1 Dans le cas où l'UCS ne possède pas de GER en conflit, l'algorithme attribue à l'UCS le GER qui possède le pourcentage le plus important ;
 - 3.2 Dans le cas où l'UCS possède des GER en conflit, l'attribution du GER dominant se fait en fonction d'un arbre de décision (*figure 4*). Par RRP, cet arbre de décision confronte l'ensemble des GER en conflit à 3 règles de décision ayant pour rôle d'étudier le voisinage de chacune de ces UCS et de choisir le GER qui maximisera la visualisation de la diversité pédologique graphiquement sur la carte. Ce choix a été retenu au sein du groupe de travail et la résultante n'est qu'une forme de représentation des sols parmi d'autres possibles. Pour du traitement de données, la recommandation reste d'utiliser l'information complète sur les UTS disponible dans la base initiale des RRP.
 - **1^{re} règle (surface locale)** : Si un polygone présente deux GER dominants en conflit, il est confronté aux polygones contigus. Le GER dominant qui totalise la plus petite surface cumulée entre ces polygones sera choisi comme GER dominant.
 - **2^e règle (GER différent)** : Si un seul des deux GER dominants en conflit domine dans un ou plusieurs polygones voisins, l'autre GER sera choisi comme GER dominant.

Figure 4 - Règles de décision dans l'attribution du GER pour les polygones en conflit.**Figure 4 - The process of decision to choose a main soil class in case of discrepancies.**

- **3^e règle (surface régionale)** : Si aucun des deux GER dominants en conflit n'est dominant dans les polygones voisins, le GER choisi comme dominant sera celui qui totalise la plus petite surface au sein du RRP.

Dans le cas où plusieurs polygones présentent des GER en conflit, il a été choisi de ne pas tenir compte de l'UCS voisine ayant elle-même des GER en conflit. Lorsque le conflit est résolu pour un polygone donné, le GER retenu est alors réintégré dans la boucle de l'algorithme ce qui permet sa prise en compte dans la résolution des polygones en conflit suivants. L'algorithme traite ensuite séquentiellement polygone par polygone, tout en commençant par celui qui a la surface la plus grande, jusqu'à celui qui a la surface la plus petite. Les traiter ainsi permet d'identifier rapidement les GER qui ont le plus gros impact visuel.

4. Intégration des données résultantes dans la couche graphique de la carte.

Validation de l'algorithme

Une fois le type de sol dominant défini par l'algorithme, les partenaires gestionnaires des RRP ont été sollicités pour valider

ou proposer une alternative aux résultats. Les résultats proposés par l'algorithme ont été bien accueillis par les gestionnaires et ont permis de gagner un temps conséquent. La moitié des études (51 %) n'ont pas eu besoin de modifications, 43 % ont eu besoin de peu de modifications (modification sur moins de 5 UCS par RRP) et 6 % ont eu besoin de modifications sur un nombre plus important d'UCS (> 5).

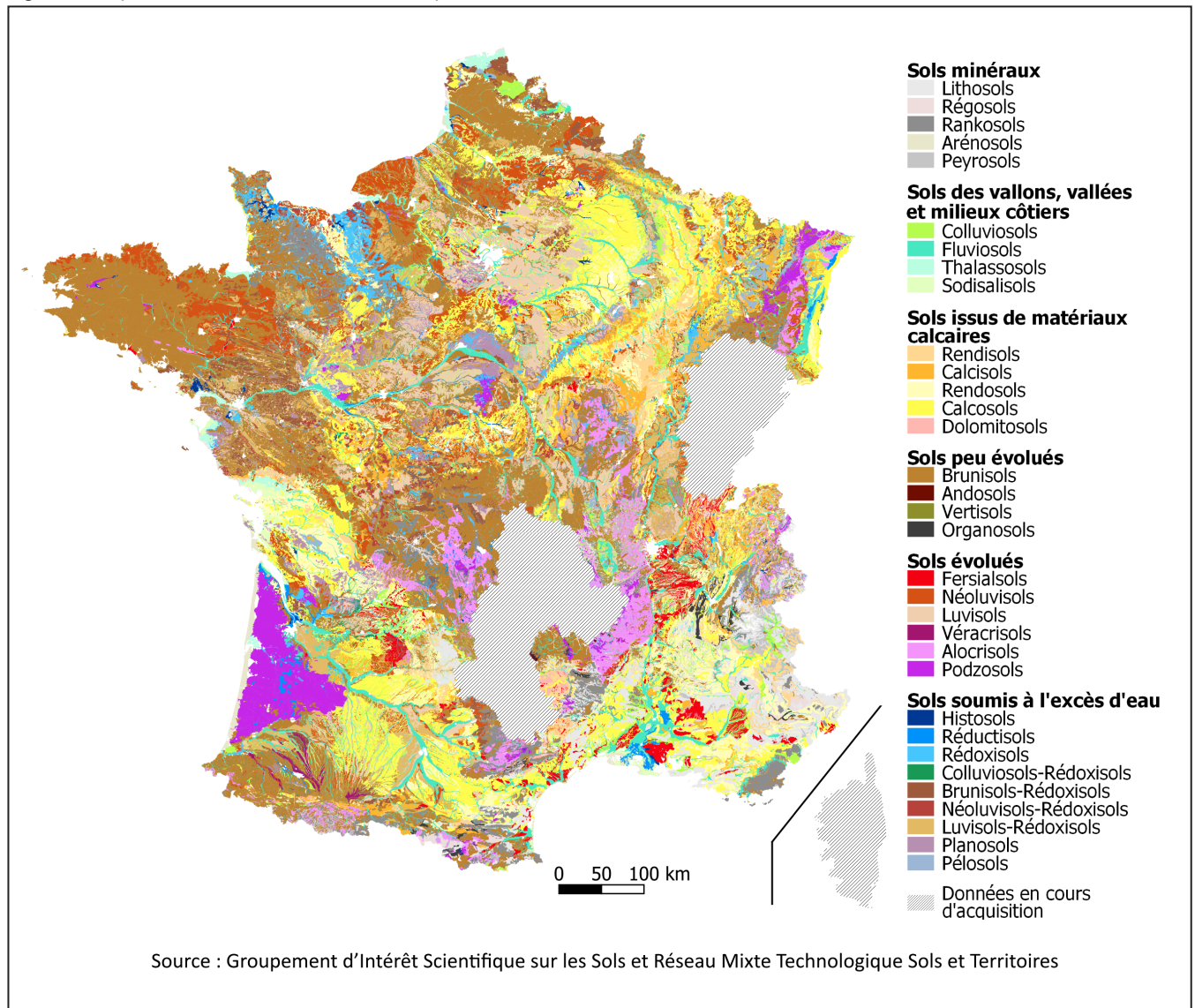
EDITION DE LA CARTE POUR LA PUBLICATION SUR LE GÉOPORTAIL

Publication et mise en forme de la carte des sols dominants sur le Géoportail

Pour permettre une bonne lecture de la carte et de sa légende, un travail de sémiologie graphique a été réalisé pour choisir des couleurs de représentation cohérentes et suffisamment contrastées pour chaque type de sol. Aussi, la légende a été compartimentée en regroupant les différents types de sols

Figure 5 - Carte des types de sols dominants de la visualisation des RRP sur le Géoportail.

Figure 5 - Map of dominant soil classes on the Geoportal.



dans des catégories facilement compréhensibles pour des non-spécialistes en pédologie.

Ces catégories au nombre de 7 sont : Sols minéraux, Sols des vallons, vallées et milieux côtiers, Sols issus de matériaux calcaires, Sols peu évolués, Sols évolués et Sols soumis à l'excès d'eau.

La carte et la légende finalisées (*figure 5*), validées par les différents partenaires, ont été publiées sur le Géoportail en février 2020 : <https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/carte-des-sols>.

La carte est constituée de 171 424 polygones représentant 7 328 UCS. Elle montre la diversité des sols du territoire français métropolitain et permet l'observation des grandes struc-

tures du territoire, majoritairement d'origines lithologique et géomorphologique.

On retrouve notamment les cuestas caractéristiques du bassin parisien (Au nord-est), les massifs montagneux (notamment hercyniens) avec les Massifs vosgien, armoricain et le Massif Central caractérisés par des BRUNISOLS et ALOCRI-SOLS mais aussi des PODZOSOLS. On reconnaît aussi parfaitement le massif forestier des Landes de Gascogne avec une présence très importante de PODZOSOLS. De ce point de vue, cette carte est similaire à la carte des sols dominants issue de la Base de Données Géographique des Sols de France (BDGSF). Toutefois, cette nouvelle carte met en évidence des organi-

sations beaucoup plus complexes et détaillées en s'appuyant sur des données plus précises et basées sur des observations de terrain et non sur un travail essentiellement à dire d'expert comme ce fut le cas pour la BDGSF.

En termes de recouvrement, certains sols apparaissent très souvent en dominants tandis que d'autres sont beaucoup moins représentés. Les BRUNISOLS, en brun clair, sont très présents (environ 20 % du territoire) suivis par les CALCOSOLS, en jaune (environ 11 %). Les RENDOSOLS sont également très visibles, et sont liés sous nos climats à des recarbonatations (ou des « rajeunissements ») liées au travail du sol (cas des « Champagnes ») ou à l'érosion. *A contrario*, certains sols sont très peu représentés, notamment les VERTISOLS (0,01 %).

Cette constatation est cohérente sous nos latitudes, les BRUNISOLS et les CALCOSOLS sont des sols qui se développent sous des climats tempérés, atlantiques ou semi-continentaux, quand la pédogénèse est encore récente. Les RENDOSOLS n'existent que par rajeunissement, dans une ambiance générale où la tendance est à l'acidification. Les VERTISOLS, quant à eux, sont observés davantage en zones climatiques tropicales semi-arides à sub-humides et sous climats méditerranéens (Baize *et al.*, 2008). Ils peuvent toutefois, sous certaines conditions, apparaître au sein du territoire métropolitain de façon très localisée et principalement liée à leur teneur en argiles et à leur minéralogie.

Données associées à la carte – accessibles via les infobulles

La carte et sa légende sont des éléments essentiels pour la visualisation des RRP sur le Géoportail, mais il était également important de vulgariser des définitions pédologiques pour faciliter la compréhension des données.

Le groupe de travail a souhaité que ces éléments informatifs soient accessibles lors de la consultation de la carte via des infobulles. Les informations peuvent être de natures diverses avec, par exemple, des données informatives sur l'UCS sélectionnée issues des bases de données des RRP et des informations d'accessibilité aux données complètes fournies par les gestionnaires des données. Toutefois, cette fonctionnalité est limitée techniquement par la nature même de la table attributaire associée à la couche graphique (1 seul tableau avec 1 ligne par entité de carte). Une autre fonctionnalité pertinente est d'avoir la possibilité de stocker dans les infobulles des liens WEB cliquables.

Les éléments visualisables dans les infobulles sont : le numéro et nom de l'UCS, un lien vers une fiche descriptive de l'UCS, le type de sol dominant (avec pourcentage) accompagné par un lien renvoyant vers un document le présentant, la référence de l'étude (le RRP de rattachement) et son état d'avancement, des informations de contact (responsable technique de l'étude, structure propriétaire de l'étude et un lien WEB de la structure) pour accéder à des données plus détaillées, le cas échéant (figure 6).

Création du fascicule descriptif des familles de types de sols

Pour comprendre la carte des sols dominants à destination du Géoportail, notamment les termes employés, des connaissances basiques en pédologie et en cartographie des sols sont nécessaires. Dans ce contexte, un fascicule descriptif des différentes familles de types de sols a été rédigé (http://gissol.fr/gissol/fiches_geoportail/fiches_descriptives_ger.pdf).

Ce document est accessible dans l'onglet « informations de la couche » du Géoportail, et les infobulles des UCS permettent d'accéder à la fiche page du fascicule dédiée au type de sol dominant de l'UCS sélectionnée. Pour chacun des 33 types de sol, une définition succincte illustrée par une photo d'un profil de sol caractéristique est proposée (exemple, figure 7). Ces définitions sont inspirées du référentiel pédologique (Baize *et al.*, 2008) et ont été rédigées par un comité d'experts pédologues, puis relues par des non-spécialistes pour les rendre abordables par le grand public. Ce fascicule propose également une présentation succincte de ce qu'est un sol et le principe de la cartographie des sols à l'échelle 1/250 000.

Création des fiches descriptives des Unités Cartographiques de Sols – UCS

Le groupe a également souhaité rendre les informations les plus accessibles possibles en apportant des documents associés aux GER et/ou aux UCS. L'idée était de créer un document décrivant de la manière la plus complète possible chacune des 7 328 UCS de la carte et de rendre accessible ce document via des liens dans les infobulles. Ce document est une fiche PDF, produite sous R (Rmarkdown ; Xie *et al.*, 2019) à partir des données enregistrées pour les RRP dans DoneSol, décrivant un certain nombre d'informations : l'UCS (numéro, nom, nombre d'UTS, surface), les UTS qui la composent (nom, pourcentage, type de sols (GER), matériau parental), l'étude (numéro, titre, auteur(s), année, état) et la structure gestionnaire du RRP (coordonnées de contact, logo).

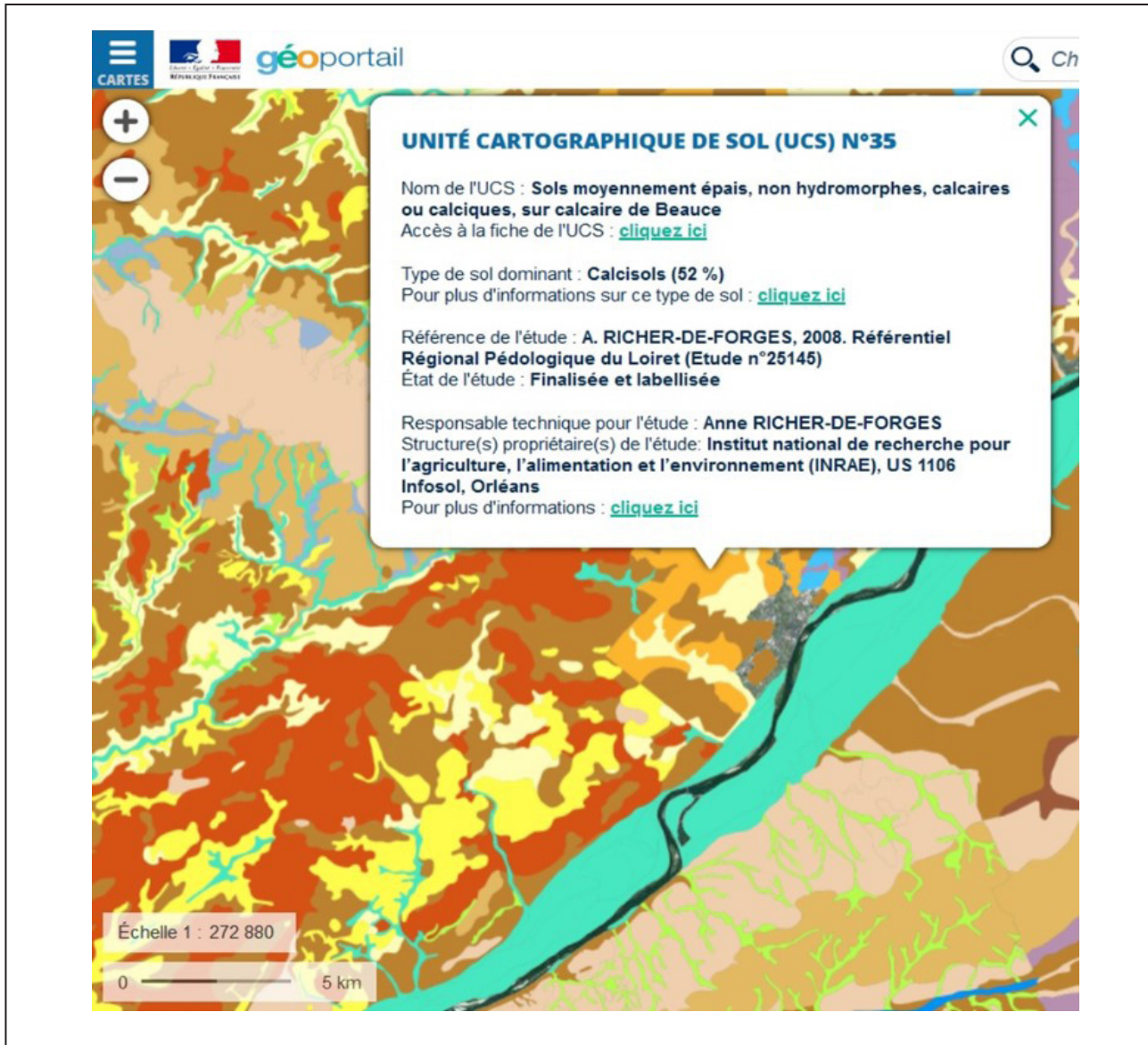
Ces fiches sont automatiquement générées de la manière suivante :

- Extraction des données via DoneSol ;
- Génération du texte grâce aux variables DoneSol et aux coordonnées de contact ;
- Création de graphiques (mini-carte et graphique de type « camembert ») ;
- Mise en forme de l'ensemble ;
- Génération du PDF.

Cette méthode a ainsi permis de produire 7 328 fiches décrivant chacune des UCS présentes sur la carte. Pour chaque UCS sélectionnée, il est possible d'avoir accès à sa fiche caractéristique (exemple, figure 8).

Figure 6 - Exemple d'informations associées au polygone de la carte des sols dominants de France sur le Géoportail (extraction d'images depuis le Géoportail, 02/07/2020).

Figure 6 - Example of information associated with the polygon of the map of dominant soils in France on the Geoportal.



DISCUSSION

Fiabilité de la carte et utilisation de la donnée

La fiabilité attendue de la carte est liée à l'échelle initiale des données représentées (1/250 000) qui correspond à une densité de 1 sondage pour 400 ha et 1 fosse pédologique pour 4 000 ha en moyenne (AFNOR, 2007 ; norme NFX31-560). Toute interprétation des données à un niveau de précision supérieur à celui indiqué est déconseillée sans observation de terrain complémen-

taire. En particulier, la base de données n'ayant pas la précision requise pour une expertise à l'échelle cadastrale, un utilisateur reste responsable de toute transposition à cette échelle. Pour éviter une utilisation non conforme de la donnée, un floutage de la carte a été mis en place à partir de l'échelle 1/136 440 et la couche n'est plus disponible en visualisation à partir de l'échelle 1/34 110, suivant les préconisations du groupe de travail. Il faut ajouter que cette carte synthétique ne représente pas réellement la variabilité décrite dans les RRP initiaux. Elle constitue donc une simplification - certes volontaire - de la complexité des tracés des UCS et des données décrites dans les RRP initiaux. A

Figure 7 - Exemple de fiche descriptive pour les CALCOSOLS.

Figure 7 - Example of a soil type description : CALCOSOL.

CALCOSOLS
Ensemble des SOLS ISSUS DE MATÉRIEAUX CALCAIRES

■ ■ Représentent 10,8 % du territoire métropolitain ■ ■

Les calcosols sont des sols moyennement épais à épais (plus de 35 cm d'épaisseur), développés à partir de matériaux calcaires. Ils sont riches en carbonates de calcium sur toute leur épaisseur, leur pH est donc basique. Ils sont fréquemment argileux, plus ou moins caillouteux, plus ou moins séchants, souvent très perméables. Ils se différencient des calcisols par leur richesse en carbonates.

Exemple d'un calcosol sur craie observé à Ezu-sur-Eure (Eure)

GisSol
GROUPEMENT D'INTERÉTS TERRITORIAUX SOL Sols & Territoires

[Cliquez ici pour accéder au Géoportail](#)

Figure 8 - Exemple d'une fiche descriptive d'UCS (Localisée dans le département du Loiret - étude 25145).

Figure 8 - Example of a soil map unit description.

Description de l'Unité Cartographique de Sol (UCS) numéro 44

Référentiel Régional Pédologique du Loiret

Numéro d'UCS : 44
Nom d'UCS : Sols limono-argileux, non hydromorphes, du Gâtinais calcaire de Puisieux
Composition : cette UCS est composée de 4 Unité(s) Typologique(s) de Sol (UTS)
Surface : 7544 ha

Informations relatives aux Unités Typologiques de Sols (UTS)

- UTS n° 137 : sols limono-argileux puis argilo-limoneux, calcaires, non ou peu graveleux (calcaire), non hydromorphes, sur calcaire du Gâtinais
- Type de sol : CALCOSOLS
- Matériau parental : LIMON SUR CALCAIRE DU GATINAIS
- UTS n° 140 : sols minoes, limono-argileux, calcaires, plus ou moins graveleux (calcaire), non hydromorphes
- Type de sol : RENDOSOLS
- Matériau parental : LIMON SUR CALCAIRE DU GATINAIS
- UTS n° 139 : sols épais, pouvant être faiblement lessivés, limono-argileux, non calcaires, sans éléments grossiers, non hydromorphes
- Type de sol : BRUNISOLS
- Matériau parental : LIMON SUR CALCAIRE DU GATINAIS
- UTS n° 138 : sols limono-argileux, calciques, sans éléments grossiers, non hydromorphes, sur calcaire du Gâtinais
- Type de sol : CALCISOLS
- Matériau parental : LIMON SUR CALCAIRE DU GATINAIS

Informations sur l'étude

Numéro de l'étude : 25145
Titre de l'étude : Référentiel Régional Pédologique du Loiret
Échelle de l'étude : 1/250 000
Auteur(s) de la base sémantique : Anne RICHER-DE-FORGES
Année de création : 2008
État : Finalisé et labellisé

Gestionnaire(s) de l'étude

Responsable technique de l'étude : Anne RICHER-DE-FORGES
Structure(s) propriétaire(s) : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE), US 1106 Infosol, Orléans
Adresse(s) de la/des structure(s) : 2163 Avenue de la Pomme de Pin - CS 40001 ARDON, Orléans, 45075, France
Pour plus d'informations : Cliquez ici

Loiret (40)

n°138 (7%)
n°139 (26%)
n°137 (37%)
n°140 (30%)
Pourcentages de surface des UTS dans l'UCS

INRAE
Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement

[Cliquez ici pour accéder à la carte sur le Géoportail](#)

ce titre, il s'agit bien d'un produit « d'appel » qui invite les personnes intéressées à remonter aux informations originales.

Cette carte est une juxtaposition des différents RRP non harmonisés entre eux. Cela signifie que des effets de bords relatifs aux limites de départements sont potentiellement visibles : non-continuité des contours des UCS, GER différents de part et d'autre de la limite administrative. En effet, même si la création de ces bases de données géographiques est codifiée par un cahier des charges strict, le ou les pédologues en charge de leur constitution demeurent libres dans leur interprétation (choix du type de sol, délimitation des UCS, etc.). Cela conduit localement à des incohérences entre les études et par conséquent entre départements : les types de sols peuvent être différents, de même que les limites des UCS. Une étape ultérieure à ce travail, dans l'attente d'un RRP national harmonisé, pourrait être de mettre en relation les experts locaux afin de trouver un accord d'harmonisation entre les limites régionales ou départementales.

Le groupe de travail a choisi également de maximiser la représentation de la diversité des sols *via* l'outil ADATSD pour aider le public à prendre conscience de la grande variabilité des types de sols sur le territoire mais aussi pour illustrer l'existence de types de sols emblématiques de certaines régions. Ce sont par exemple les VERACRISOLS dans les piémonts des Pyrénées. Ces choix ont eu pour conséquence d'accentuer une hétérogénéité de certains secteurs. Cette carte ne doit pas être considérée comme une carte exhaustive de la diversité des sols de France. L'utilisateur est invité à prendre contact avec les gestionnaires des bases de données pour accéder à toute la richesse des données capitalisées dans DoneSol.

Perspectives

Des mises à jour de cette carte sont prévues à un pas de temps annuel. Elles auront pour objectif de compléter la carte en intégrant les RRP des départements manquants du territoire métropolitain dans un premier temps. Bien entendu, ces mises à jour se feront en fonction du calendrier de finalisation des différents RRP. En parallèle, une harmonisation graphique des Référentiels Régionaux Pédologiques entre eux est en cours, elle permettra de disposer d'une carte harmonisée des sols à 1/250 000 sur l'ensemble du territoire métropolitain et de faire disparaître quelques limites administratives liées au mode de réalisation des RRP par département ou par région.

Dans un second temps, il s'agira d'ajouter les départements ultramarins. Certains de ces territoires sont déjà cartographiés : Nouvelle-Calédonie, Martinique, Wallis-et-Futuna. Cependant, le format de base de données utilisé (VALSOL) est différent que celui utilisé en métropole (DoneSol). Un travail d'harmonisation de ces deux bases de données sera donc nécessaire afin d'avoir la possibilité d'ajouter ces territoires. Certains d'entre eux restent encore inexplorés (forêt guyanaise, St Pierre et Miquelon, Terres australes, Polynésie française...). Il

appartiendra au GIS Sol de définir des priorités les concernant. On pourrait par exemple logiquement penser que, malgré les grandes difficultés logistiques, les enjeux de la forêt guyanaise (biodiversité, stockage de carbone, déforestation...) mériteraient une réflexion approfondie.

Cette première publication sur le Géoportail ouvre également la possibilité de diffuser d'autres données sur les sols comme les cartes thématiques (carbone, réservoir utile en eau, textures, matériau parental, etc.). Ces cartes pourront être issues directement des RRP, ou extraites de la cartographie par modélisation statistique (Voltz *et al.*, 2018), comme, par exemple, les produits de type *GlobalSoilMap* élaborés sur le territoire français (e.g., Mulder *et al.*, 2016 ; Lacoste *et al.*, 2016 ; Chen *et al.*, 2019 ; Roman Dobarco *et al.*, 2019), quitte à en dégrader la résolution spatiale originelle.

Enfin, cette carte publiée sur le Géoportail est un relai vers l'accès aux différents RRP. Toutefois, le fait de devoir s'adresser à plusieurs structures différentes lorsque l'on veut avoir accès à plusieurs RRP complexifie l'accès à ces données, d'autant plus que les modalités d'accès peuvent différer d'une structure à l'autre. Une réflexion entre le GIS Sol et l'ensemble des maîtres d'ouvrage IGCS en région va s'engager, en lien avec le RMT Sols et Territoires pour faciliter l'accès aux données sur les sols contenues dans ces référentiels et harmoniser les pratiques de diffusion.

CONCLUSION

Dans un contexte où les données sols sont de plus en plus demandées, il paraît nécessaire d'ouvrir à une large gamme d'utilisateurs la possibilité de consulter les données élaborées à l'occasion des programmes nationaux de cartographie des sols. Cela permettra une sensibilisation du public aux sols et aux problématiques associées, et ce dans un contexte de changements globaux où la ressource sol va devenir un enjeu majeur.

La publication de la carte des sols dominants, de par son échelle et son degré de précision, est une grande avancée pour informer de l'existence des RRP. Il en va de même pour sa diffusion *via* un outil national, le Géoportail, qui, de par son envergure, est à même de toucher une grande partie des citoyens français. L'élaboration de cette carte a montré la richesse et la pertinence des données sols existantes et a aussi permis de mettre en lumière l'utilité de concevoir des programmes (langage R) pour faciliter le traitement et ainsi mieux valoriser ces données.

Cette première étape devrait être suivie d'autres initiatives pour porter à connaissance des informations sur les sols sur le Géoportail comme la carte des sols des territoires ultramarins coordonnée par l'Institut de recherche pour le développement (IRD) ou encore des cartes thématiques comme la carte du carbone stocké dans les sols, par exemple.

Les RRP doivent être perçus comme un premier palier dans la connaissance des sols sur un territoire. Une cartographie plus précise est possible, s'appuyant sur les données déjà collectées dans le cadre du RRP. La mise en œuvre de cartes des sols précises se limite actuellement à des zones restreintes mais à fort enjeu (environnemental, agronomique, d'aménagement du territoire...) nécessitant de mettre en évidence et de comprendre plus finement l'organisation des sols (Laroche *et al.*, 2019). La réflexion en cours sur l'avenir de la cartographie des sols en France ouvre de nouvelles perspectives concernant l'enrichissement de nos connaissances sur leur distribution spatiale et sur leurs propriétés (Voltz *et al.*, 2018).

REMERCIEMENTS

Nous remercions toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de cette carte et de sa publication : toutes les personnes qui ont participé à enrichir la connaissance sur les sols, les gestionnaires et responsables techniques des différents RRP en régions, les équipes de l'IGN et plus précisément du Géoportail, ainsi que le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. Nous remercions tout particulièrement l'ensemble du groupe de travail du RMT Sols et Territoires, sans qui ce travail n'aurait pu aboutir.

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR, 2007 - Norme française NF X 31-560. Qualité des sols. Cartographie des sols appliquée à toutes les échelles. 15 p.
- Arrouays D., Hardy R., Schnebelen N., Le Bas C., Eimberck M., Roque J., Grolleau E., Pelletier A., Doux J., Lehmann S., Saby N., King D., Jamagne M., Rat D., Stengel P., 2004 - Le programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols de France. *Etude et Gestion des Sols*, 11 (3), pp. 187-197.
- Baize D., Girard M.C., Jabiol B., Rossignol J.P., Eimberck M., Beaudou A., 2008 - Référentiel pédologique. Association française pour l'étude des sols (AFES - Editions Quae. 435 p.
- Beaudou A., Le Martret H., 2004 - MIRURAM/VALSOL : un système d'information et une base de données pour représenter les sols tropicaux et leurs environnements. *Etude et Gestion des Sols*, 11 (3), 271-284. ISSN 1252-5861
- Bornand M., Arrouays D., Jamagne M., Baize D., 1989 - Cadre méthodologique d'une cartographie régionale des sols à l'échelle du 1/250 000. *Science du Sol*. 27(1) : pp.17-20.
- Chen S., Mulder V.L., Martin M.P., Walter C., Lacoste M., Richer-de-Forges A.C., Saby N.P.A., Loiseau T., Hu B., Arrouays D., 2019 - Probability mapping of soil thickness by random survival forest at a national scale. *Geoderma*, 344, 184-194.
- Ducommun C., Lucot E., 2017 - Les cartes et les données pédologiques – des outils au service des territoires. Educagri Editions. 176 p.
- Favrot J.-C., 1989 - Une stratégie d'inventaire cartographique à grande échelle : la méthode des secteurs de référence. *Sciences du Sol*, volume XXVII, n° 4, pp. 351-368.
- Grolleau E., Bargeot L., Chafchafi A., Hardy R., Doux J., Beaudou A., Le Martret H., Lacassin J.-C., Fort J.-L., Falipou P., Arrouays D., 2004 - Le système d'information national sur les données pédologiques spatialisées : DONESOL et les outils associés. *Etude et Gestion des Sols*, 11(3), pp. 255-269.
- INRA, 1998 - Base de Données Géographique des Sols de France à 1/1 000 000, version 1 du 21/12/1998. Inra, Orléans, France.
- INRA InfoSol, 2017 - DoneSol version 3.5.1, Dictionnaire de données, version du 1^{er} mai 2017. *Gis Sol*. 454 p.
- INRA InfoSol, 2014 - Référentiel Régional Pédologique – de la réalisation à la labellisation des bases de données sols au 1/250 000. *Cahier des Clauses Techniques Générales*.
- Lacoste M., Mulder V.L., Richer-de-Forges A.C., Martin M.P., Arrouays D., 2016 - Evaluating large-extent spatial modelling approaches: a case study for soil depth for France. *Geoderma Regional*, 7, pp. 137-152.
- Laroche B., Richer-de-Forges A.C., Leménager S., Arrouays D., Schnebelen N., Eimberck M., Toutain B., Lehmann S., Tientcheu E., Héliès F., Chenu J.-P., Parot S., Desbourdes S., Girot G., Voltz M., Bardy M., 2014 - Le programme Inventaire Gestion Conservation des Sols de France : Volet Référentiel Régional Pédologique. *Etude et Gestion des Sols*, 21, pp. 125-140.
- Laroche B., Richer-de-Forges A.C., Sauter J., Bouthier A., 2019 - 50 ans de cartographie des sols : où trouver les informations sur son sol ? *Perspectives Agricoles*, 465, pp. 43-46.
- Lemerrier B., Laroche B., Armand R., Chafchafi A., Détriché S., Ducommun C., Jalabart S., Lehmann S., 2017 - Le guide d'utilisation des bases de données sol pour la production de cartes thématiques. Editeur : INRA, Unité InfoSol. 110 p.
- Montanarella L., Pennock D.J., McKenzie N.J., Badraoui M., Chude V., Baptista I., Mamo T., Yemefack M., Singh Aulakh M., Yagi K., Young Hong S., Vijarnsorn P., Zhang G.-L., Arrouays D., Black H., Krasilnikov P., Sobocká J., Alegre J., Henriquez C.R., Mendonça-Santos M.L., Taboada M., Espinosa-Victoria D., AlShankiti A., AlaviPanah S.K., Elsheikh E.A.E., Hempel J., Camps Arbestain M., Nachtergaele F., Vargas R., 2016 - World's soils are under threat. *SOIL*, 2, pp. 79-82.
- 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. *Sci. Tot. Env.* 573, 1352-1369.
- Richer-de-Forges A.C., Baffet M., Berger C., Coste S., Courbe C., Jalabert S., Lacassin J.-C., Maillant S., Michel F., Moulin J., Party J.-P., Renouard C., Sauter J., Scheurer O., Verbègue B., Desbourdes S., Héliès F., Lehmann S., Saby N.P.A., Tientcheu E., Jamagne M., Laroche B., Bardy M., Voltz M., 2014 - La cartographie des sols à moyennes échelle en France métropolitaine. *Etude et Gestion des Sols*, 21, pp. 25-36.
- Richer-de-Forges A.C., Arrouays D., Bardy M., Bispo A., Lagacherie P., Laroche B., Lemerrier B., Sauter J., Voltz M., 2019 - Mapping of Soils and Land-Related Environmental attributes in France: analysis of end-users' needs. *Sustainability*, 11, 2940; doi:10.3390/su11102940.
- Roman Dobarco M., Bourennane H., Arrouays D., Saby N.P.A., Cousin I., Martin M.P., 2019 - Uncertainty assessment of GlobalSoilMap soil available water capacity products: a French case study. *Geoderma*. 344, 14-30.
- Voltz M., Arrouays D., Bispo A., Lagacherie P., Laroche B., Lemerrier B., Richer-de-Forges A.C., Sauter J., Schnebelen N., 2018 - La cartographie des sols en France : Etat des lieux et perspectives. INRA, France, 112 p.
- Xie Y., Allaire J.-J., Grolmund G., 2019 - R Markdown: The Definitive Guide.

