

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

O. Scheurer^(1*), X. Boussetin⁽²⁾ et N. Saby⁽³⁾

1) Institut polytechnique UniLaSalle – 19 rue Pierre Waguet - BP 30313, 60026 Beauvais Cedex, France

2) Agroscope – Route de Duillier 50 - CP 1012, 1260 Nyon 1, Suisse

3) INRAE InfoSol. 45075 Orléans, France

* : Auteur correspondant : olivier.scheurer@unilasalle.fr

RÉSUMÉ

Pour élaborer des plans d'action en faveur du stockage de carbone dans les sols agricoles sur un territoire local, il est nécessaire de s'appuyer sur un diagnostic de la situation actuelle. Celui-ci nécessite en premier lieu d'identifier et localiser les combinaisons « système de culture-type de sol-teneur en carbone organique » sur le territoire. La base de données d'analyses de terre (BDAT) fournit des données actualisées sur les teneurs en carbone organique (Corg), issues de parcelles agricoles et localisées à la maille communale sur une grande partie de la France métropolitaine. Une méthode est proposée pour associer ces analyses aux types de sol (UTS) identifiés au niveau de chaque Unité Cartographique de Sol (UCS) d'un Référentiel Régional Pédologique. L'affectation d'une analyse à une UTS est réalisée à l'aide d'une classification fondée sur deux critères : i) un critère analytique de similitude des teneurs en argile et en calcaire entre l'analyse et l'UTS, ii) un critère géographique d'intersection entre les territoires de la commune de l'analyse et celui de l'UCS concernée. On obtient ainsi une distribution des teneurs en Corg affectée à chaque couple [UTS, UCS]. La méthode a été appliquée dans trois territoires-tests d'environ 35 000 hectares, contrastés du point de vue des sols et des systèmes de production agricole. La classification mise en œuvre rend en compte d'une part faible, mais non négligeable de la variabilité des teneurs en Corg (13 à 34 % dans les trois cas étudiés). Les variations entre classes des teneurs médianes calculées sont cohérentes avec les caractéristiques dominantes des sols et/ou des systèmes de culture correspondantes. Ces résultats confortent la pertinence de la méthode et son potentiel de généralisation.

Comment citer cet article :

Scheurer O., Xavier Boussetin X. et 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

Comment télécharger cet article :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-27/>

Comment consulter/télécharger

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

Mots clés

Sol, carbone organique, analyse de terre, base de données, classification.

SUMMARY**A METHOD TO CHARACTERIZE THE ORGANIC CARBON CONTENT OF SOIL TYPES IN A REGIONAL SOIL REFERENTIAL FROM THE NATIONAL SOIL TESTS DATABASE ON AN AGRICULTURAL TERRITORY**

In order to develop action plans for the storage of carbon in agricultural soils on a local territory, it is necessary to rely on a diagnosis of the current situation. This first requires identifying and locating the "cropping system-soil type -organic carbon content" combinations in the territory. The national soil tests database (BDAT) provides up-to-date data on organic carbon content (Corg), derived from agricultural plots and located at the municipal level over much of metropolitan France. A method is proposed to associate these soil tests with the soil type units (STU) identified at the level of each Soil Mapping Unit (SMU) of the regional soil map at 1/25,000 scale. The assignment of a soil test to a STU is carried out using a classification based on an analytical criterion of similarity of clay and CaCO₃ contents between the test and the STU, and a geographical criterion of intersection between the limits of the municipality of the test and the SMU. This results in a distribution of the Corg values assigned to each [STU, SMU] couple. The method was applied in three test territories of about 35,000 hectares, contrasting in terms of soils and agricultural production systems. The classification implemented reflects a small but not insignificant proportion of the variability in Corg content (13 to 34 % in the three cases studied). The variations of the median Corg contents between classes are consistent with the corresponding dominant characteristics of the soils and/or cropping systems. These results thus support the relevance of the method and its potential for generalisation.

Key-words

Soil, organic carbon, soil test, database, classification.

RESUMEN**UN MÉTODO PARA CARACTERIZAR LOS CONTENIDOS EN CARBONO ORGÁNICO DE TIPOS DE SUELO DE UN REFERENCIAL REGIONAL PEDOLÓGICO EN UN TERRITORIO AGRÍCOLA A PARTIR DE LA BASE DE DATOS DE ANÁLISIS DE TIERRA**

Para elaborar planes de acción a favor del almacenamiento de carbono en los suelos agrícolas en un territorio local, es necesario apoyarse sobre un diagnóstico de la situación actual. Este necesita en primer lugar identificar y localizar las combinaciones «sistema de cultivo – tipo de suelo – contenido en carbono orgánico» sobre el territorio. La base de datos de análisis de tierra (BDAT) presta datos actualizados sobre los contenidos en carbono orgánicos (Corg), procedentes de parcelas agrícolas y localizadas a la malla municipal sobre una gran parte de Francia metropolitana. Se propone un método para asociar estos análisis a los diferentes tipos de suelo (UTS) identificados al nivel de cada Unidad Cartográfica de Suelo (UCS) de un Referencial Regional Pedológico. La afectación de un análisis a una UTS se realiza con ayuda de una clasificación fundada en dos criterios: i) un criterio analítico de semejanza de los contenidos en arcilla y en calcáreo entre el análisis y la UTS, ii) un criterio geográfico de intersección entre los territorios del municipio del análisis y lo de la UCS correspondiente. Se obtiene así una distribución de los contenidos en Corg afectada a cada par [UTS, UCS]. Se aplicó el método en tres territorios-tests de aproximadamente 35000 hectáreas, contrastados del punto de vista de suelos y de sistemas de producción agrícola. La clasificación aplicada da cuenta de una pequeña parte, pero no insignificante, de la variabilidad de los contenidos en Corg (13 a 34 % en los tres casos estudiados). Las variaciones entre clases de contenidos medianos calculados son coherentes con las características dominantes de los suelos y/o de los sistemas de cultivo correspondientes. Estos resultados confirman la pertinencia del método y su potencial de generalización.

Palabras clave

Suelo, carbono orgánico, análisis de tierra, base de datos, clasificación.

Le stockage de carbone dans les sols agricoles pourrait contribuer à l'atténuation du changement climatique (Pellerin *et al.*, 2019). Cette piste d'action a notamment été mise en avant par l'initiative 4 pour 1000 (Minasny *et al.*, 2017 ; Sous-sana *et al.*, 2019), lancée par la France en 2015, lors de la Cop 21. Néanmoins, pour cibler et lancer des actions en faveur du stockage de carbone à l'échelle locale, il est nécessaire d'établir un diagnostic de la situation actuelle.

La méthode ABC Terre¹ a été conçue pour réaliser ce diagnostic à l'échelle d'un territoire. Elle consiste dans un premier temps à simuler l'évolution à long terme des stocks de carbone organique (Corg) dans les agrosystèmes élémentaires identifiés sur le territoire d'étude, à l'aide de l'outil SIMEOS-AMG (Duparque *et al.*, 2011) issu du modèle de calcul de bilan humique AMG (Andriulo *et al.*, 1999 ; Saffih et Mary, 2008 ; Clivot *et al.*, 2019). Chaque agrosystème élémentaire est défini par une combinaison « type de sol, système de culture, teneur en carbone organique actuelle ». Les agrosystèmes étudiés sont limités aux systèmes de cultures annuelles. Les types de sol sont définis dans un objectif de généralité sur la base des UTS² des référentiels régionaux pédologiques (RRP), disponibles sur la quasi-totalité du territoire national (Arrouays *et al.*, 2004 ; Laroche *et al.*, 2014). Il s'agit donc de renseigner une teneur en carbone organique actuelle par UTS, qui corresponde le mieux possible à une valeur centrale de la distribution qu'on observerait pour une combinaison donnée « UTS, système de culture ». Cette teneur en carbone organique actuelle détermine le stock de carbone organique sur la profondeur de prélèvement, donnée d'entrée à laquelle le modèle AMG est particulièrement sensible.

Les bases de données des RRP attribuent à chaque UTS une teneur en carbone organique modale dans l'horizon de surface, mais cette donnée provient souvent d'une expertise basée sur des lots d'analyses anciennes et/ou peu nombreuses pour chaque UTS ; sa représentativité a donc été considérée comme insuffisante. A l'opposé, le programme BDAT fournit des données actualisées et en général nombreuses, issues de parcelles agricoles (Saby *et al.*, 2014), mais celles-ci sont localisées à la maille communale pour des raisons de confidentialité et ne sont donc pas associées explicitement à des types de sol.

Différentes méthodes ont été testées pour distribuer les analyses de la BDAT dans les types de sols au sein d'Unités

Cartographiques de Sol (UCS³). Elles consistent à (i) faire le lien entre les communes et les UCS, (ii) faire le lien entre les analyses et les UTS de chaque UCS ainsi identifiées, ces UTS n'étant cependant pas localisées au sein des UCS.

Une première méthode dite spatiale (Paroissien *et al.*, 2011) a été appliquée dans le Loiret et en Poitou-Charentes (Vigot, 2010 ; Vigot *et al.*, 2013). Le croisement géographique des limites des communes avec celles des UCS permet de calculer la part surfacique théorique de chaque UTS dans chaque commune. On suppose ensuite que cette part surfacique représente la probabilité d'appartenance d'une analyse quelconque de la commune à l'UTS. L'affectation des analyses aux UTS se fait par une série de tirages aléatoires dans les communes, en fonction des probabilités calculées (simulation Monte Carlo). Cette méthode a l'avantage de pouvoir exploiter la totalité des analyses disponibles. Les résultats sont en revanche très sensibles à la taille relative des communes par rapport à celle des UCS et au nombre d'UCS et d'UTS par commune ; la méthode tend à lisser fortement la variabilité des teneurs en carbone de surface entre UTS.

Deux autres méthodes dites analytiques ont été testées (Paroissien *et al.*, 2011 ; Louis et Lemerrier, 2013) : en plus du lien géographique, elles utilisent un ensemble important de variables analysées autres que le carbone (argile, limons, calcaire, CEC, pH) pour affecter une analyse au type de sol le plus proche selon ces variables connexes. L'inconvénient est que le nombre d'analyses pour lesquelles on dispose de toutes ces données est très faible (1 % et 11 % du nombre total d'analyses, respectivement en Bretagne et en Alsace dans les 2 territoires d'application). Il en résulte une réduction importante du nombre d'analyses mobilisables de la BDAT, conduisant à une caractérisation de certaines UTS par un nombre réduit de teneurs en carbone, parfois insuffisant pour limiter le biais induit par l'échantillonnage.

Cet article présente la méthode élaborée dans le cadre des projets ABCTerre et ABCTerre-2A afin de résoudre ces problèmes : les couples [système de culture, UTS] sont reconstitués au niveau spatial de l'UCS et on cherche à attribuer une teneur en C organique à chaque couple [UTS, UCS] en exploitant les analyses de la BDAT. Pour cela, les principes de la méthode analytique sont repris en combinant les critères d'affectation géographique et sémantique mais en s'appuyant sur deux hypothèses pour augmenter le nombre d'analyses exploitées : (i) les variables analytiques utilisées pour l'affectation peuvent être réduites à la teneur en argile et en calcaire, qui

1 ABCTerre : Démarche de calcul d'un bilan de Gaz à effet de Serre intégrant le bilan de carbone organique des sols agricoles à l'échelle de territoires, développée dans le cadre de 2 projets successifs financés par l'ADEME (ABCTerre, AàP REACTIF, 2012-2016 ; ABCTerre-2A, AàP GRAINE, 2017-2020), pilotés par Agrotransfert-RT (www.agro-transfert-rt.org) ; elle vise notamment à aider les collectivités à élaborer le volet agricole de leur plan climat-air-énergie territorial (PCAET)

2 UTS (Unité Typologique de Sol) : type de sol tel que défini dans les Référentiels Régionaux Pédologiques

3 UCS (Unité Cartographique de Sol) : ensemble de plages géographiquement délimitées dans une carte des sols, caractérisées par une composition en UTS spécifique. Une UCS se définit comme une portion de la couverture pédologique -appelée pédopaysage- où les facteurs la pédogénèse sont homogènes (morphologie, lithologie, climat, et dans certains cas occupation du sol), (INRA InfoSol, 2018).

comptent parmi les déterminants principaux du taux annuel de minéralisation du carbone organique des sols cultivés (Clivot *et al.*, 2017 ; Clivot *et al.*, 2019), (ii) le croisement géographique peut s'effectuer après le regroupement des UCS semblables selon des critères agronomiques et pédologiques pour pallier les situations où le nombre d'analyses disponibles par UCS est insuffisant. Les résultats obtenus sur 3 territoires-tests sont analysés pour en tirer des éléments d'évaluation des performances de la méthode.

LES ÉTAPES DE LA MÉTHODE

Principes généraux

Les analyses de la BDAT correspondent à des analyses générées par l'activité agricole pour piloter la fertilité des parcelles. Elles sont extraites de la période décennale la plus récente, au niveau d'unités spatiales pédopaysagères au sein desquelles on présuppose que l'histoire culturelle présente des traits communs. L'unité spatiale considérée est l'UCS. On admet ainsi l'hypothèse qu'au sein d'une UCS, la distribution et les propriétés des sols constituent un ensemble d'atouts et de contraintes agronomiques qui ont déterminé en partie l'évolution passée des systèmes de culture (Sebillotte, 1989). Il en résulte par exemple qu'un même type de sol présent dans deux UCS peut globalement avoir subi des histoires culturelles différentes, donc présenter en moyenne des teneurs en Corg différentes entre UCS. Il n'en demeurera pas moins une variabilité des teneurs en Corg observées pour un type de sol au sein d'une UCS, issue de la diversité des pratiques culturelles au niveau parcellaire.

Les types de sol peuvent correspondre aux UTS du RRP ou à une agrégation d'UTS regroupées sur des critères agronomiques (UTTyterres4 par exemple). La teneur en Corg obtenue pour un type de sol est affectée par défaut à toutes les combinaisons « type de sol X système de culture » qui lui sont associées au sein de l'UCS. Une teneur en Corg est donc affectée à un couple (type de sol, UCS)⁵.

Étapes

L'affectation d'une analyse de la BDAT à une UTS au sein d'une UCS du territoire d'étude est réalisée sur la base de deux critères: i) un **critère géographique** d'intersection entre les territoires de la commune de l'analyse et de l'UCS concernée, ii) un

critère analytique de similitude des teneurs en argile et en calcaire issues de l'analyse et des informations statistiques renseignées dans le RRP pour l'UTS. On admet ainsi que ces dernières sont plus fiables que celles portant sur le carbone organique, bien que la source soit identique, car elles concernent des caractères beaucoup plus stables dans le temps et beaucoup moins influencés par les systèmes de culture. La démarche globale est schématisée dans la *figure 1*. Elle se décompose en 3 étapes:

- Attribution des analyses de la BDAT aux UCS.
- Tri des analyses d'une part et regroupement des UTS d'autre part, en classes de teneurs en argile et en calcaire total, dans chaque UCS.
- Affectation des teneurs en carbone organique des analyses de la BDAT aux UTS dans chaque classe et calcul de la médiane pour chaque couple [UTS, UCS].

Attribution des analyses aux UCS

Pour attribuer les analyses de la BDAT aux UCS, le croisement géographique entre les contours des communes et ceux des UCS est réalisé à l'aide d'un logiciel de Système d'Information Géographique. La règle utilisée ensuite est que toutes les analyses d'une commune sont attribuées à chacune des UCS qu'elle intersecte. De ce fait, une même analyse peut être attribuée à plusieurs UCS.

Préalablement, on a sélectionné dans la BDAT les analyses qui renseignent à la fois la teneur en C organique et les teneurs en argile et en calcaire total⁶ (CaCO₃); celles-ci ne représentent qu'une faible part de l'ensemble des analyses disponibles (de l'ordre de 20 %, variable selon les territoires).

Cette étape est intégralement prise en charge par l'INRAE InfoSol en tant que gestionnaire de la BDAT, car la base de données des analyses localisées au niveau communal est confidentielle. Les analyses de la BDAT fournies in fine comprennent quatre variables: le code de l'UCS, les teneurs en C organique, en argile (analysée ou estimée) et en calcaire total. Dans certains cas, s'il n'y a pas assez d'analyses remplissant ces conditions (teneur en argile manquante), il est possible d'utiliser les analyses – beaucoup plus nombreuses – renseignant la CEC: les teneurs en argile peuvent être estimées à partir de la CEC et de la teneur en C organique, à l'aide d'une fonction de pédotransfert. Celle-ci doit être paramétrée à partir d'un jeu de données issues du territoire d'étude.

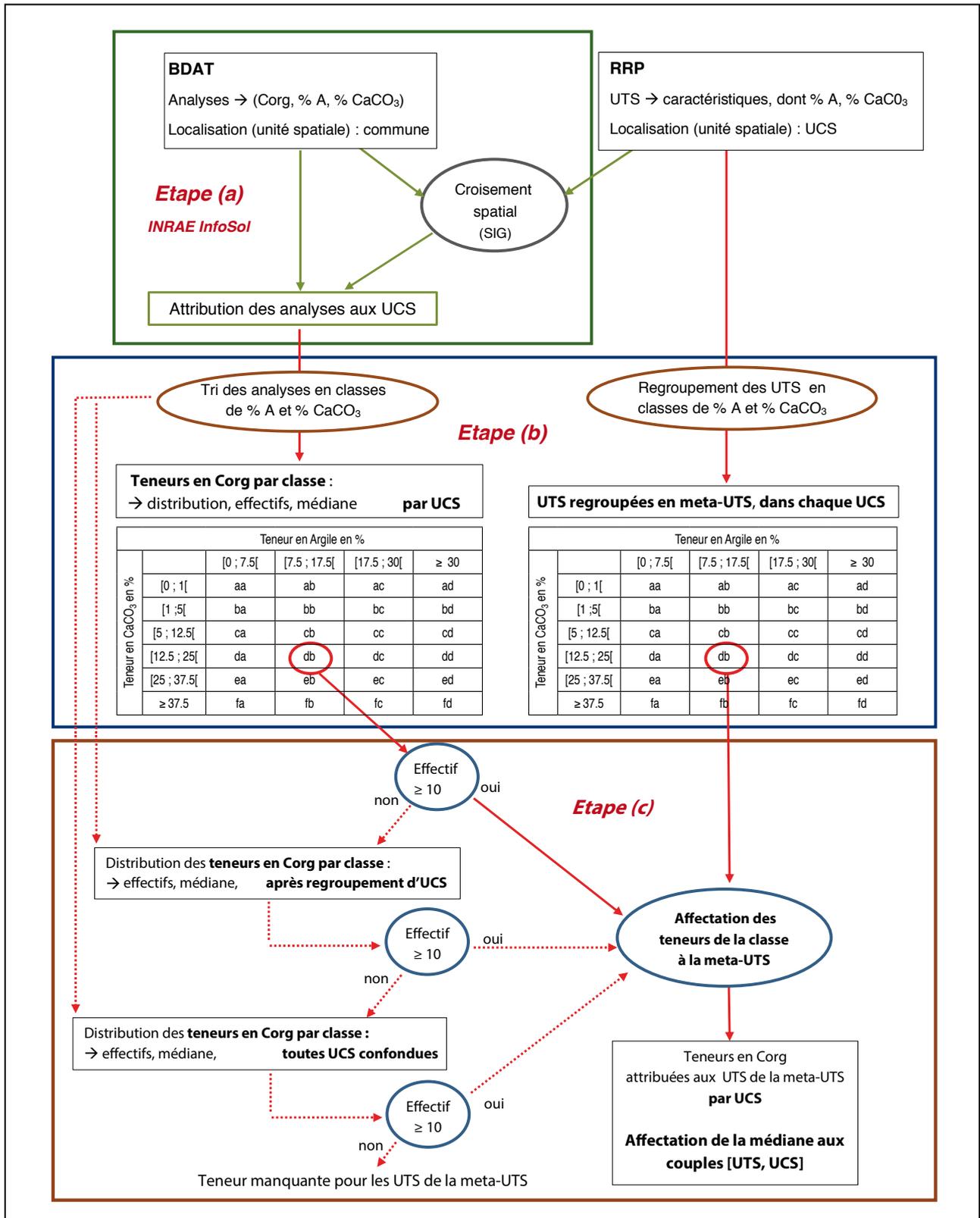
⁴ UTYterres : type de sol défini par regroupement d'UTS semblables selon des critères agronomiques, à partir de la méthode TYPTERRRES (Laroche *et al.*, 2020, à paraître dans EGS)

⁵ Par simplification, on utilisera systématiquement l'abréviation UTS pour désigner les types de sol auxquels on cherche à attribuer une teneur en carbone organique.

⁶ Dans les analyses pour lesquelles le CaCO₃ n'est pas renseigné, on admet que CaCO₃ (%) = 0 si le pH est inférieur à 7.

Figure 1 : Schéma de la démarche en 3 étapes.

Figure 1: Diagram of the 3 step approach.



Tri des analyses et regroupement des UTS en classes de teneurs en argile et en calcaire total : élaboration de méta-UTS

Les UTS sont regroupées en classes de teneur en calcaire total et en argile afin de permettre leur rattachement aux analyses de terre sélectionnées. On admet donc que les groupes d'UTS ainsi constitués sont relativement homogènes du point de vue du taux de minéralisation annuel du carbone organique du sol. Ces groupes d'UTS définis au sein de chaque UCS seront par la suite dénommés « **méta-UTS** ».

En parallèle, les analyses de terre sont triées en fonction des mêmes classes de teneur en argile et en calcaire total. Pour une UCS donnée, chacune des méta-UTS qu'elle contient est ainsi caractérisée par une distribution de teneurs en carbone organique. Le *tableau 1* présente les bornes des classes de teneur en CaCO_3 et en argile utilisées et les codes attribués aux méta-UTS correspondantes. Ces bornes correspondent à des seuils texturaux issus du triangle des textures de l'Aisne pour l'argile et à des seuils dérivés des classes GEPPA⁷ (Baize, 2018) pour le calcaire.

Affectation des teneurs en carbone organique des analyses aux UTS et attribution de la médiane aux couples [UTS, UCS]

On admet l'hypothèse qu'au sein d'une UCS, la distribution des teneurs en carbone organique varie peu entre les UTS d'une même méta-UTS ; ainsi, la variabilité observée résulterait majoritairement de la diversité des histoires culturelles entre parcelles cultivées sur une UTS donnée et secondairement de la variabilité des propriétés des sols regroupés dans la méta-UTS.

A l'opposé, pour une même méta-UTS (même classe de teneurs en argile et calcaire) présente dans plusieurs UCS, les distributions de teneurs en carbone organique pourraient différer entre UCS. Ces différences pourraient s'expliquer par des spé-

cificités de ces UCS susceptibles d'avoir joué sur les teneurs en carbone organique : histoire de leur occupation du sol (retourne-ment de prairies, évolution des systèmes de culture) ou propriétés des UTS qui composent la méta-UTS (hydromorphie, charge en éléments grossiers...).

Conformément à ces hypothèses, l'affectation des teneurs en carbone organique des analyses aux UTS se fait selon la procédure suivante :

- (i) Toutes les analyses de la BDAT associées à une méta-UTS sont affectées à chacune des UTS qui la composent, au niveau de chaque UCS.
- (ii) Chaque couple [UTS, UCS] se voit attribuer la médiane de la distribution des teneurs en carbone organique ainsi obtenue ; on admet *a priori* que cette médiane est représentative si l'effectif des analyses affectées à une méta-UTS est supérieur ou égal à 10.
- (iii) Dans les cas -minoritaires- où l'effectif d'une méta-UTS est insuffisant, on cherche à augmenter le nombre d'analyses exploitables, en regroupant les analyses d'UCS présentant des caractéristiques similaires ; on établit pour cela une classification des UCS sur la base de deux critères : occupation du sol de l'UCS et propriétés des sols. Les **groupes d'UCS** ainsi constitués seront par la suite dénommés « **méta-UCS** ».
- (iv) Si l'effectif reste insuffisant malgré le regroupement fait en (iii), on attribue par défaut la médiane de la teneur en Corg de l'ensemble des analyses du territoire, toutes UCS confondues à la méta-UTS.

Méthodes de classification des UCS en méta-UCS

Sur un territoire local, la classification des UCS a comme objectif de constituer des groupes d'UCS les plus homogènes possible vis-à-vis des facteurs déterminant l'évolution passée des teneurs en C organique dans les sols agricoles. Deux composantes principales sont à prendre en compte : l'histoire de l'occupation du sol d'une part, notamment à travers l'histoire des assolements, différenciés selon le niveau de restitution humique des cultures principales et les propriétés dominantes des sols d'autre part (teneurs en argile et en calcaire, excès d'eau, charge en éléments grossiers, potentialités de production de biomasse en fonction du RUM⁸...).

Cette classification peut être réalisée à dire d'expert. Les groupes peuvent aussi être construits par une méthode statistique de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) ; chaque UCS doit pour cela être caractérisée par des variables quantitatives indicatrices des deux composantes données ci-dessus.

Tableau 1 : Définition des méta-UTS selon leur teneur en calcaire et en argile.

Table 1: Meta-STU definition according to their CaCO_3 and clay content.

		Teneur en Argile en %			
		[0 ; 7.5[	[7.5 ; 17.5[	[17.5 ; 30[	≥ 30
Teneur en CaCO_3 en %	[0 ; 1[	aa	ab	ac	ad
	[1 ; 5[	ba	bb	bc	bd
	[5 ; 12.5[	ca	cb	cc	cd
	[12.5 ; 25[	da	db	dc	dd
	[25 ; 37.5[	ea	eb	ec	ed
	≥ 37.5	fa	fb	fc	fd

7 GEPPA : Groupe d'Etude des Problèmes de Pédologie Appliquée

8 RUM : Réservoir Utilisable Maximal en eau du sol (Baize, 2018), encore couramment appelé « réserve utile » en eau du sol.

Tableau 2 : Caractéristiques des trois territoires-tests.**Table 2:** Test-territories characteristics.

Territoire	Caractéristiques pédologiques	Nombre d'UCS	Nombre d'UTS	Assolement
Tardenois (02)	Plateaux ondulés à dominante de sols limoneux profonds ; sols argileux calcaires caillouteux et sols sablo-limoneux à limono-sableux.	28	77	Betterave, blé, colza, protéagineux
Pays RVGB (68)	Plaines du Rhin et de l'Ill et Piedmont vosgien ; sols alluviaux très variés, calcaires ou non, sableux ou limoneux, plus ou moins caillouteux, parfois hydromorphes, limons calcaires loessiques.	19	58	Maïs grain prédominant, Blé
CdC Thouarsais (79)	Diversité des sols sur 2 ensembles de matériaux parentaux (socle ancien et formations sédimentaires) : limono - sableux, argilo-calcaires caillouteux, argileux et sableux, en partie hydromorphes.	33	26	Blé, colza, protéagineux, tournesol, maïs grain

Tableau 3 : Nombre d'analyses de la BDAT pour les trois territoires-tests.**Table 3:** Number of soil tests per test-territory.

Territoire	Nombre d'analyses selon les variables renseignées		
	Carbone	Carbone, Argile, Calcaire	Carbone, CEC, Calcaire
Tardenois (02)	3 187	295	840
Pays RVGB (68)	2 659	378	2 041
CdC Thouarsais (79)	1 674	47	1 278

MATÉRIEL ET MÉTHODES D'ÉVALUATION

Objectifs généraux

La validation au sens strict de la méthode n'est pas possible faute de jeux de données indépendantes qui permettraient de comparer les teneurs en carbone organique affectées aux UTS à des teneurs observées sur la même période.

A défaut d'une véritable validation, l'objectif est ici d'évaluer les performances de la méthode sur des critères de cohérence agronomique des résultats et de généralité. Pour ce faire, la méthode a été appliquée sur 3 territoires-tests.

Description des territoires-tests

Trois territoires contrastés ont été choisis pour couvrir une diversité de paysages pédologiques et de systèmes de production agricoles : la petite région naturelle du Tardenois dans l'Aisne, le Pays Rhin-Vignoble-Grand Ballon (RVGB) dans le Haut-Rhin et la Communauté de Communes du Thouarsais dans les Deux-Sèvres. Leur surface est comprise entre 30000 et 45000 hectares. Le *tableau 2* en donne les principales caractéristiques pédologiques et agricoles. Le *tableau 3* donne les effectifs des analyses disponibles dans la BDAT.

Application de la méthode

Extraction et tri des analyses

Les analyses ont été extraites de la BDAT, puis triées par classes de teneur en argile et en calcaire comme évoqué ci-dessus. Dans le Thouarsais et en Alsace, la teneur en argile a été estimée pour une majorité des analyses par des fonctions de pédotransfert. Celles-ci ont été paramétrées localement, avec une fonction pour chacun des deux domaines géologiques du Thouarsais (socle et sédimentaire). Dans le Tardenois, seules les analyses renseignant le taux d'argile ont été utilisées.

La construction des fonctions de pédotransfert s'est basée sur un modèle d'estimation de la CEC en fonction des teneurs en argile et en carbone organique, de la forme :

$$CEC = a \cdot \text{Argile} + b \cdot \text{Corg} + c.$$

Les coefficients a, b, et c ont été estimés par régression linéaire multiple à partir d'un jeu de données d'apprentissage (270 à 780 analyses selon les cas). Les fonctions de pédotransfert utilisées sont donc de la forme :

$$\text{Argile} = 1/a \cdot (CEC - b \cdot \text{Corg} - c)$$

Dans tous les cas, la distribution des résidus du modèle n'est pas influencée par la teneur en Corg. Estimé à partir de jeux de données indépendants, le taux d'analyses mal classées selon

Tableau 4 : Facteurs de variation pris en compte dans l'étude de cohérence agronomique des résultats.**Table 4:** Factors taken into account for the results assesment by their agronomic consistency.

Facteur de variation étudié entre classes	Principal effet présumé	Sens de variation attendu
Teneur en argile des sols (strate de surface)	<i>réduction de la vitesse de minéralisation</i>	La teneur en carbone organique du sol est croissante avec les facteurs observés
Teneur en calcaire des sols (strate de surface)	<i>réduction de la vitesse de minéralisation</i>	
Charge en éléments grossiers (strate de surface)	<i>masse de terre fine plus faible induisant une teneur en Corg plus élevée à bilan humique équivalent</i>	
Hydromorphie	<i>réduction de la vitesse de minéralisation</i>	
RUM des sols	<i>production de biomasse plus élevée</i>	
Part du colza, des céréales à paille et/ou du maïs grain dans l'assolement	<i>restitutions humiques par les résidus de culture plus élevées</i>	

leur teneur argile varie de 25 à 30 % selon les territoires, avec une tendance à la surestimation dans le Thouarsais.

Construction des méta-UCS

Dans les 3 territoires-tests, les méta-UCS ont été définies par le croisement de 2 classifications statistiques des UCS : classification selon l'occupation du sol actuelle (on fait ici l'hypothèse que la répartition actuelle des systèmes de culture reflète bien l'héritage du passé culturel du territoire) et classification selon les propriétés des sols. Les sources de données sont respectivement le Registre Parcellaire Graphique⁹ (RPG) pour les surfaces des cultures annuelles au niveau de l'îlot de culture et le RRP pour les propriétés des UTS composant chaque UCS. Ces deux bases de données couvrent la majorité du territoire national.

Classification des UCS selon leur occupation du sol

Trois indicateurs ont été comparés, issus de l'exploitation du RPG sur 3 années successives récentes : la part surfacique des différents types d'exploitations (types définis en fonction de leur assolement), l'assolement moyen sur 3 ans, la part surfacique des différentes séquences de cultures reconstituées sur 3 ans au niveau des îlots de culture (triplets). Ces indicateurs sont générés par UCS avec l'outil RPG Explorer (Levavasseur *et al.*, 2016). Le choix de l'indicateur peut dépendre du contexte local et des données disponibles (typologie des exploitations par exemple).

Classification des UCS selon leur composition en UTS

Dans un premier temps, les UTS du territoire ont été regroupées en fonction de leurs propriétés agronomiques susceptibles d'influencer leur teneur en carbone organique, à travers 5 variables : les teneurs en argile, en éléments grossiers, et en

CaCO₃ dans la strate de surface, le réservoir utilisable maximal et la classe de drainage naturel. Ce regroupement en types a été réalisé à l'aide d'une CAH.

La classification des UCS a été faite en fonction de la part surfacique des types agronomiques ainsi définis, soit à l'aide d'une CAH, soit sur la base du type de sol majoritaire dans les cas les plus simples.

Méthodes pour évaluer la qualité des attributions

Trois méthodes ont été utilisées pour valider les estimations.

Des rapports de corrélation (η^2) ont été calculés (équation (1)) pour estimer dans quelle proportion les classes constituées pour regrouper les analyses de la BDAT par méta-UTS expliquent la variabilité des teneurs en C organique observées.

$$\eta^2 = \frac{Var_{inter}}{Var_{totale}} \quad (1)$$

Avec :

Var_{inter} : variance inter classe,

Var_{totale} : variance totale = variance inter classe + variance intra classe

On compare ainsi le classement des analyses de la BDAT par méta-UTS (toutes UCS confondues) et par couples [méta-UTS, UCS] ou [méta-UTS, méta-UCS]. Compte tenu des hypothèses sous-jacentes de la constitution des classes, on s'attend au classement suivant :

$$\eta^2 \text{ méta}_{UTS} < \eta^2 (\text{méta}_{UTS}, \text{méta}_{UCS}) < \eta^2 (\text{méta}_{UTS}, \text{UCS}) \quad (2)$$

La cohérence agronomique des résultats a été étudiée. On observe pour cela le sens de variation de la teneur médiane en matière organique entre les classes constituées (méta-UTS, classes d'UCS suivant leur histoire culturelle, ou classes d'UCS suivant leur composition en types de sols), en fonction des pro-

⁹ Registre parcellaire graphique : système d'information géographique national identifiant annuellement les parcelles agricoles et les cultures qui y sont pratiquées, à partir des déclarations PAC des agriculteurs.

priétés associées à ces classes. On vérifie ainsi si ce sens de variation est cohérent avec les facteurs agronomiques connus pour influencer la teneur en carbone organique dans les sols cultivés (Meermans *et al.*, 2012 ; Clivot *et al.*, 2019). Le *tableau 4* présente les facteurs pris en compte et leur effet présumé. La part des cultures à restitutions humiques élevées dans l'assolement est un facteur de variation à long terme des teneurs en carbone organique. La part actuelle de ces cultures a été utilisée ici comme indicateur ; on a donc fait l'hypothèse que, dans les territoires-tests étudiés, les UCS les plus céréalières, différenciées par ce critère, le sont depuis suffisamment longtemps pour avoir marqué de façon significative l'état organique des sols (Duparque *et al.*, 2011).

Enfin, pour chaque méta-UTS, les deux teneurs médianes en C organique calculées respectivement au niveau de l'UCS et de la méta-UCS correspondante ont été comparées. L'écart observé permet d'avoir une évaluation de la dégradation des prédictions induite par l'usage des méta-UCS. Pour chaque UCS, la médiane de la méta-UCS associée a été calculée en excluant les analyses de l'UCS du pool utilisé. Cette méthode d'évaluation n'a été mise en œuvre que dans le Tardenois.

RÉSULTATS

Exemple du Tardenois

Les résultats présentés ici ne sont pas exhaustifs ; ils sont donnés à titre d'exemples illustrant les principales étapes de la méthode.

Dans l'exemple de l'UCS 4, l'affectation des analyses de la BDAT aux méta-UTS donne des effectifs considérés *a priori* comme satisfaisants ($n \geq 10$) pour 3 méta-UTS non calcaires qui regroupent plus de 70 % des UTS présentes (*tableau 5*). La distribution des teneurs en carbone organique peut ainsi être analysée à l'aide de graphiques ou de descripteurs statistiques (*figures 2a et 2b* pour les 2 classes dominantes). Elle met bien en évidence l'effet protecteur de l'argile conduisant à des teneurs en carbone globalement plus élevées dans la classe la plus argileuse.

Dans l'UCS 4, les effectifs des analyses sont insuffisants pour caractériser de la même manière une UTS argilo-calcaire (% A > 30, % CaCO₃ E[12.5 ; 25] , $n = 9$).

La classification des UCS en méta-UCS sur la base de leur composition en UTS a permis de constituer 4 groupes :

- UCS 1a -1b – 2a – 2b - 3 : Plateaux limoneux
- UCS 4 – 6 - 7a : Rebords de plateaux et versants, à dominante limono-sableuse, localement limoneux, sableux ou argilo-calcaires
- UCS 11-12 : Bords de plateaux, vallées et versants, à dominante argilo-calcaire

- UCS 13 : Versants et vallées, à dominante limono-sableuse, calcaires

Le regroupement des analyses des UCS 4-6-7a (*tableau 6*) fournit un effectif jugé suffisant pour caractériser l'UTS argilo-calcaire ($n = 16$, *figure 3*). En revanche, le nombre d'analyses affectées à la classe non calcaire très peu argileuse (% A E [0 ; 7.5]) est trop faible pour caractériser les UTS sableuses présentes dans l'UCS 4 ; il est probable que celles-ci soient très majoritairement boisées, donc non concernées par les analyses de terre réalisées à la demande des agriculteurs.

De même, la classification des UCS d'après les systèmes de production présents, du point de vue de leurs restitutions humiques, aboutit à 2 groupes majoritaires :

- UCS « betteravières », avec une nette prédominance des types d'exploitations « betteraviers » (associés à des restitutions moyennes relativement faibles)
- UCS « mixtes », avec une diversité de types, Céréalières, Betteraviers, Eleveurs-polyculteurs (associés à des restitutions moyennes relativement élevées).

La variabilité des médianes obtenues peut ensuite être présentée en fonction des caractéristiques des méta-UTS et des types d'exploitations dominants dans les UCS (*figure 4*). Elle apparaît globalement cohérente avec les variations attendues : (i) pour une même méta-UTS, les médianes sont globalement plus élevées dans les UCS « mixtes » que dans les UCS « betteravières » (ii) pour un même groupe d'UCS, on observe logiquement des médianes d'autant plus élevées que la teneur en argile et/ou en calcaire est élevée. Les médianes sont respectivement très proches des teneurs médianes calculées indépendamment pour des combinaisons « sol x système de culture » équivalentes identifiées en Picardie comme cas-types à partir d'une base de données du laboratoire d'analyse régional (Agrotransfert, Arvalis, 2008 ; Duparque *et al.*, 2011).

Globalement, sur l'ensemble des UCS étudiées dans le Tardenois, l'application de la méthode a permis d'affecter une teneur en carbone organique à la grande majorité des UTS via les méta-UTS, soit directement (21 méta-UTS), soit après regroupement des UCS en méta-UCS (15 méta-UTS). Le *tableau 7* donne le détail des modes d'affectation par UCS. Finalement, le nombre d'UTS non caractérisées reste faible (moins de 10 %).

10 Logiquement, cette tendance ne s'observe pas dans la méta-UTS la plus argileuse (sols argilo-calcaires parfois caillouteux) dans laquelle les rotations betteravières sont quasi absentes, quelle que soit l'UCS concernée.

Tableau 5 : Effectifs de distribution des analyses de la BDAT par classes de teneur en argile et en calcaire ; exemple de l'UCS 4 dans le Tardenois (02).

Table 5: Number of BDAT soil tests by clay and CaCO₃ content classes ; example of SMU 4 in the Tardenois (02).

% CaCO ₃	tx argile			
	[0;7.5[	[7.5; 17.5[	[17.5; 30[	≥30
[0;1[	1	58	75	10
[1;5[	0	6	8	7
[5;12.5[	0	0	5	4
[12.5;25[	0	1	5	9
[25;37.5[	0	0	3	4
≥37.5	0	0	2	1

Tableau 6 : Effectifs de distribution des analyses de la BDAT par classes de teneur en argile et en calcaire ; regroupement des UCS 4 - 6- 7a dans le Tardenois.

Table 6: Number of BDAT soil tests by clay and CaCO₃ content classes ; SMU 4, 6,7a pooled, in the Tardenois (02).

% CaCO ₃	tx argile			
	[0;7.5[	[7.5; 17.5[	[17.5; 30[	≥30
[0;1[	3	94	93	11
[1;5[	0	14	16	9
[5;12.5[	0	4	10	6
[12.5;25[	0	1	9	16
[25;37.5[	0	0	7	4
≥37.5	0	0	12	1

Figures 2a : Distribution des teneurs en carbone organique (g/kg) de la BDAT dans les UTS de la classe calcaire E [0 ; 1[, argile E [7.5; 17.5[de l'UCS 4.

Figure 2a: Organic carbon content distribution (g/kg) from the BDAT in the STUs within the « ab » class (CaCO₃ E [0 ; 1[, clay E [7.5; 17.5[) of the SMU 4.

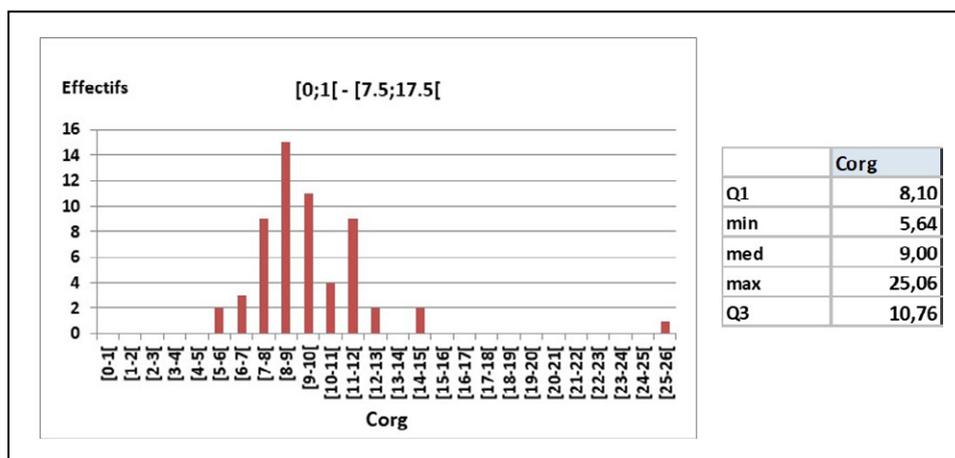


Figure 2b : Distribution des teneurs en carbone organique (g/kg) de la BDAT dans les UTS de la classe calcaire E [0 ; 1[, argile E [17.5 ; 30[de l'UCS 4.

Figure 2b: Organic carbon content distribution (g/kg) from the BDAT in the STUs within the « ac » class (CaCO₃ E [0 ; 1[, clay E [17.5; 30[) of the SMU 4.

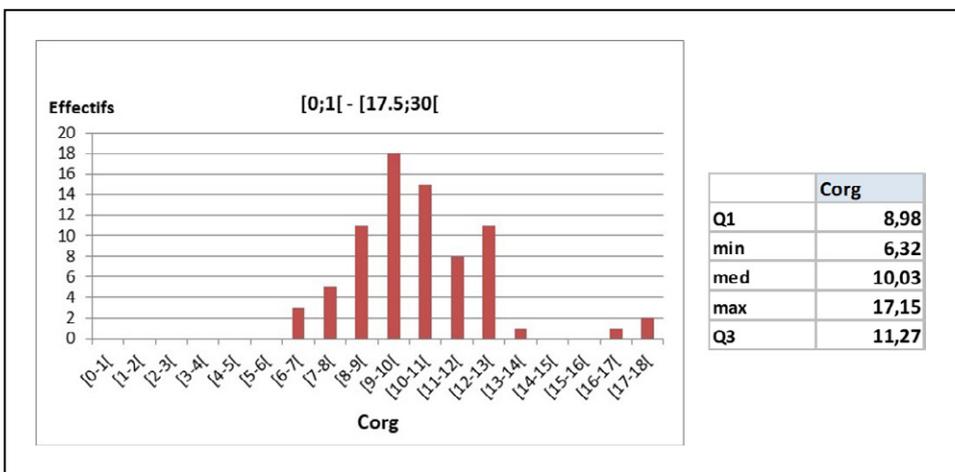


Figure 3 : Distribution des teneurs en carbone organique (g/kg) de la BDAT dans les UTS de la classe calcaire E [12,5 ; 25[et argile ≥ 30 des UCS 4-6-7a.

Figure 3: Organic carbon content distribution (g/kg) from the BDAT in the STUs within the « dd » class (CaCO_3 E [12,5 ; 25[, clay ≥ 30) of the SMUs 4,6,7a.

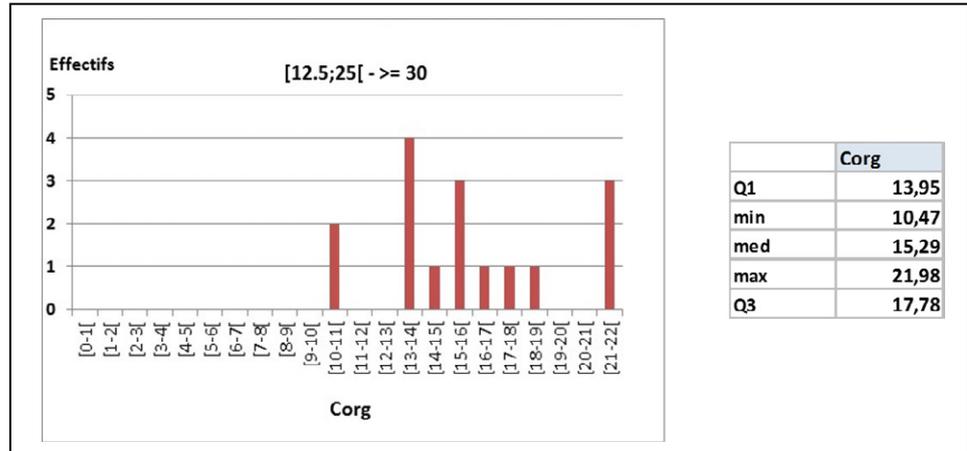


Figure 4 : Médianes des teneurs en carbone organique dans les méta-UTS selon les UCS distinguées en fonction des types d'exploitation qui y prédominent, dans le Tardenois (en vert : UCS « betteravières » - en brun : UCS « mixtes ») ; entre () : nombre d'UCS, dans les cas de points cachés.

Figure 4: Median organic carbon content in the meta-STUs within the SMUs distinguished by predominant farm types in the Tardenois. (green dots : SMU with « Sugar beet » farm type – brown dots : SMU with mixed farm types); into () : number of SMUs, in case of hidden dots.

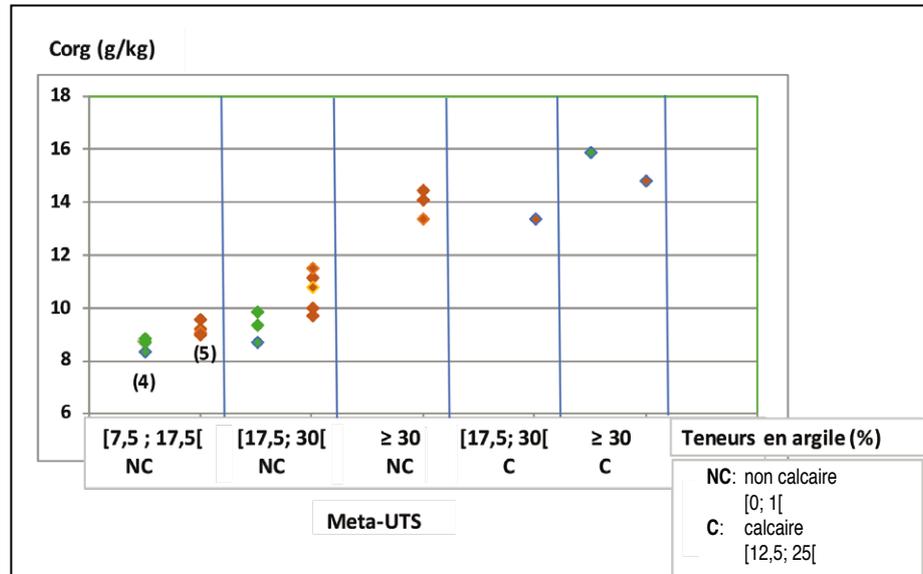


Tableau 7 : Caractérisation des UTS par une teneur en C organique médiane dans les UCS du Tardenois.

Table 7: STU characterization by a median organic carbon content in the Tardenois.

UCS	Nombre d'UTS	Nombre de méta-UTS	Nombre de méta-UTS caractérisées		Nombre d'UTS caractérisées
			au niveau UCS	au niveau méta-UCS	
1a	12	3	1	1	11
1b	12	3	3	0	12
2a	12	2	2	0	12
2b	12	3	0	2	10
3	15	4	1	2	14
4	15	4	2	1	13
6	15	4	2	1	12
7a	15	3	1	1	14
11	12	4	4	0	12
12	12	6	3	3	12
13	16	8	2	4	14

Tableau 8 : Description des classes constituées pour créer les méta-UCS.**Table 8:** Description of classes built to create the meta-SMUs.

Territoire	Type de classe	Indicateur utilisé	Classe d'UCS	Caractéristiques
Tardenois	Sols	Composition des UCS en UTS et propriétés des UTS	1	Sol très dominant: +RUM, +Hydro, -Cx, -CaCO ₃
			2	Sol très dominant: -Argile, -Cx, -CaCO ₃
			3	Sols dominants avec: ++Argile ou ++Cx, ++CaCO ₃ et +Argile (mais 40% de sols : +RUM, +Hydro, -Cx, -CaCO ₃)
	Occupation du sol	Assolement	1	+Betteraves, - Prairies
			2	-Betteraves
			3	+Prairies, -blé
		Triplets	1	+ de triplets colza, + protéagineux, + monoculture de céréales, - betteraves
			2	+ de triplets betteraves, - colza, - protéagineux, - monoculture de céréales
		Typologie	1	-de betteraviers spécialisés
	2		+de betteraviers spécialisés	
Pays RVGB	Sols	Type d'UTS dominant dans l'UCS	1	Sol très dominant: -RUM, -Hydro, +Cx, +CaCO ₃
			(2)	(non représenté sur le territoire)
			3	Sol très dominant: ++Hydro, +CaCO ₃
			4	Sol très dominant: -RU, -Hydro, +Cx, -CaCO ₃
			5	Sol très dominant: +RUM, -Cx, -CaCO ₃
	Occupation du sol	Assolement	1	+maïs
			2	-maïs
		Triplets	1	+ de monoculture de maïs, - de triplets avec maïs et céréales
			2	+ de triplets avec maïs et céréales, - de monoculture de maïs
		Typologie	1	+ de céréaliers, -viticulteurs
2	+viticulteurs, - de céréaliers			
Thouarsais	Sols	Substrat géologique	1	UCS du socle
			2	UCS sédimentaires
	Occupation du sol	Assolement	1	+blé, +tournesol, +colza, +orge, -maïs, -prairies
			2	+ prairies, -blé, -tournesol, -colza
			3	+ vignes
			4	++maïs
		Triplets	1	+ de triplets maïs, (+vigne)
			2	++ de triplets colza, +légumineuses, +tournesol, - maïs, -prairies,
			3	++ prairies, - de triplets tournesol, -colza
			Typologie	1	+céréaliers et + céréaliers diversifiés
2	++ de polyculteurs et + d'éleveurs			

Les signes ++, +, -, précédant les caractéristiques des sols ou de l'occupation du sol indiquent la spécificité de la classe d'UCS par rapport à la moyenne du territoire. Exemples : + RUM = RUM supérieure à la moyenne ; ++ hydro = hydromorphie très supérieure à la moyenne ; - Cx = pierrosité inférieure à la moyenne ; + maïs = fréquence du maïs supérieure à la moyenne.

Tableau 9 : Part de la variabilité de la teneur en C organique expliquée par les méta-UTS et les méta-UCS,
Table 9: Portion of organic C content variability explained by the meta-STUs and meta-SMUs,

Territoire	Méta-UTS	Méta-UTS x UCS	Méta-UTS x Méta-UCS		
			Sols x Assolement	Sols x Triplets	Sols x Typologie
Tardenois					
η^2	17,5 %	34 %	23 %	23 %	24 %
Pays RVGB					
η^2	8 %	13 %	12,5 %	12 %	13 %
Thouarsais					
η^2	24,5 %	24,5 %	25 %	24 %	22 %

RVGB : Rhin vignoble grand Ballon, η^2 : rapport de corrélation,

Tableau 10 : Part de la variabilité de la teneur en C organique expliquée par les méta-UTS et les classes d'UCS, créées selon différents critères : types de sol ou occupation du sol (selon 3 indicateurs)*

Table 10: Portion of organic C content variability explained by the meta-STUs and the SMU classes, created according to different criteria : soil types or land use (based on 3 indicators)*,

Territoire	Méta-UTS	Méta-UTS x UCS	Méta-UTS x classe « types de sol »		Méta-UTS x classe « occupation du sol »	
			Sol	Assolement	Triplets	Typologie
Tardenois						
η^2	17,5 %	34 %	20,5 %	20,5 %	22 %	23 %
Pays RVGB						
η^2	8 %	13 %	12 %	9,5 %	8,5 %	10 %
Thouarsais						
η^2	24,5 %	24,5 %	-	-	-	-

η^2 : rapport de corrélation,

(*) Classes « types de sol » : classes d'UCS basées sur la proportion des types de sols qui les composent ; Classes « occupation du sol » : classes d'UCS basées sur un indicateur de l'occupation du sol par les systèmes de culture (assolement= assolement moyen pluri-annuel, triplets= assolement des séquences de cultures sur 3 ans, typologie= proportions des types d'exploitation définis selon leur assolement).

(*) « Soil types » SMU classes : SMU classes based on the proportion of soil types ; « Land use » SMU classes ; SMU classes based on an indicator of land use by cropping systems (assolement= 3-year average crop proportion, triplets= 3-year crop sequences proportion, typologie= farm types proportion -types according to farm crop proportion-).

Éléments d'évaluation dans les 3 territoires-tests

Discrimination des teneurs en C organique par les méta-UTS et les méta-UCS

Les groupes constitués (méta-UTS et méta-UCS) ont pour but de modéliser partiellement les variations de teneur en C organique des sols. A l'aide des rapports de corrélation, on cherche ici à voir si ces groupes permettent effectivement d'expliquer une partie de la variabilité de la teneur en C organique des analyses de la BDAT. Le *tableau 8* décrit les classes constituées pour créer les méta-UCS dans les 3 territoires tests, selon les différents indi-

cateurs. Les *tableaux 9 et 10* donnent les rapports de corrélation calculés pour chaque classement.

Dans le Tardenois, les méta-UTS (groupes de sols par classes de teneurs en CaCO₃ et argile) permettent d'expliquer 17,5 % de la variabilité totale des teneurs en C organique du sol. Ce taux est nettement amélioré ($\eta^2 = 34 %$) par le croisement de ces classes avec les UCS. Le croisement méta-UTS/méta-UCS est intermédiaire avec des valeurs allant de 23 % à 24 % pour les classes constituées à partir de différents indicateurs à l'aide d'une CAH. Une classification des UCS à dire d'expert donne un résultat équivalent, voire meilleur ($\eta^2 = 26 %$).

En Alsace (Pays RVGB), les méta-UTS n'expliquent qu'une très faible part de la variabilité des teneurs en C organique des

analyses ($\eta^2 = 8\%$). Le fait de croiser les méta-UTS avec les UCS n'augmente que faiblement le rapport de corrélation ($\eta^2 = 13\%$). En revanche les méta-UCS semblent aussi bien modéliser le carbone organique des analyses que les UCS elles-mêmes (η^2 de 12 à 13 %).

Le regroupement des UCS selon leurs profils en types de sols explique à lui seul les variations de C organique aussi bien que les méta-UCS (tableau 10). Les classes d'occupation du sol définies au niveau de l'UCS expliquent donc mal les variations de teneur en C organique, probablement parce qu'elles sont peu contrastées. Dans ce territoire, il semble que la variabilité des teneurs en C organique résulte majoritairement de la diversité des histoires culturelles au niveau parcellaire, ces dernières ayant suivi plus ou moins rapidement la tendance régionale des dernières décennies (retournement de prairies, développement de la culture du maïs).

Le Thouarsais présente un troisième cas de figure : les méta-UTS à elles seules expliquent 24,5 % de la variabilité des teneurs en C organique des sols, ce qui confirme la pertinence de cette modalité de classement. Cependant, la prise en compte des UCS et, a fortiori, des méta-UCS n'améliore pas le rapport de corrélation. Le classement en méta-UTS apparaît très fortement corrélé avec les UCS. De plus, il semblerait que l'histoire de l'occupation des sols soit relativement homogène sur le territoire. Dans ce cas, il serait donc possible de ne pas utiliser ce critère dans la construction des méta-UCS.

Cohérence agronomique des variations de teneurs en C organique entre classes

Classement en méta-UTS

On regarde ici les teneurs en C organique médianes des méta-UTS à l'échelle du territoire.

Dans le Tardenois (tableau 11), la teneur en C organique du sol augmente avec la classe de teneur en argile. C'est aussi globalement le cas avec les classes de teneur en calcaire ; néanmoins, la teneur en C varie peu dans les sols calcaires argileux

Tableau 11 : Teneur médiane en C dans les méta-UTS du Tardenois.

Table 11: Median organic carbon content in the meta-STUs of the Tardenois.

		Classe % Argile			
		a	b	c	d
Classe % CaCO ₃	a	9,01	10,03	13,17	
	b	9,29	12,8	15,745	
	c		13,1	16,2	
	d		13,26	15,91	
	e		12,55	15,4	
	f		16,385		

(colonne d). Une valeur anormalement faible est observée dans une méta-UTS très calcaire (classe « ce »), mais cette médiane n'est basée que sur 10 individus. Ce type de situation « anormale » pourrait signifier l'insuffisance du seuil de 10 analyses admis *a priori* pour le calcul de la médiane. Globalement les groupes semblent donc assez bien discriminés et les résultats agronomiquement cohérents.

Dans le pays RVGB (tableau 12), bien que les méta-UTS ne discriminent pas très bien les teneurs en C organique du sol, les variations de la médiane entre classes de teneur en argile sont assez cohérentes. En revanche, les variations entre classes de teneurs en CaCO₃ ne semblent pas concordantes avec la théorie : on observe une décroissance des valeurs dans les classes les plus calcaires (CaCO₃ > 12,5 %). Ce résultat pourrait toutefois s'expliquer en partie par une spécificité des sols calcaires de la région : une part importante du calcaire serait localisée dans les fractions granulométriques les plus fines (argile et limon fin) dans les sols issus d'alluvions calcaires de la Hardt ou de loess du Piedmont (Mettauer *et al.*, 1982 ; Party *et al.*, 1999 ; Party, 2003) ; il en résulterait une surestimation de la teneur en argiles minéra-

Tableau 12 : Teneur médiane en C dans les méta-UTS du Pays RVGB.

Table 12: Median organic carbon in the meta-STUs of the RVGB.

		Classe % Argile			
		a	b	c	d
Classe % CaCO ₃	a	7,45	10,1	11,6	13,15
	b		12,5	12,9	12,8
	c		12,9	12,8	13,45
	d		11,1	12,3	16,5
	e		11,5	12,8	
	f			10,45	

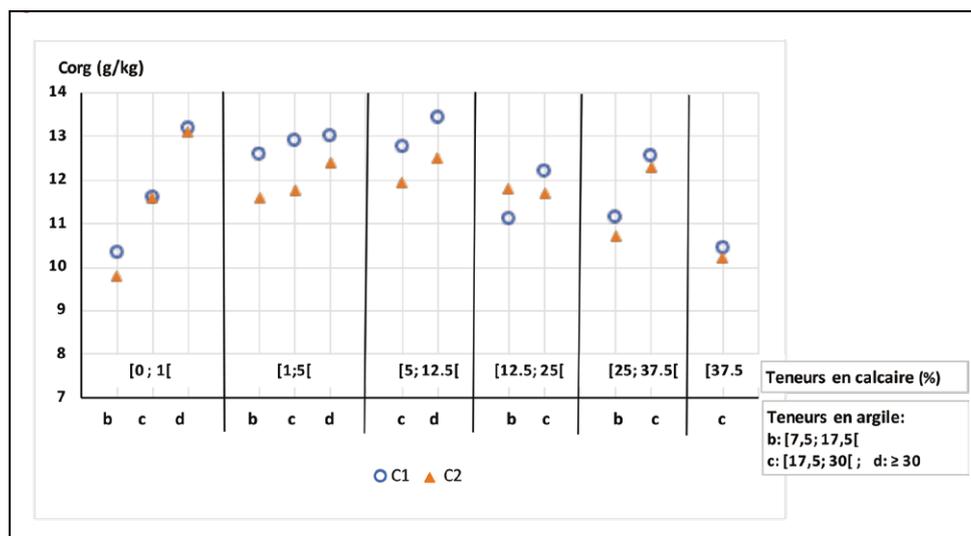
Tableau 13 : Teneur médiane en C dans les méta-UTS du Thouarsais.

Table 13: Median organic carbon content in the STUs of the Thouarsais.

		Classe % Argile			
		a	b	c	d
Classe % CaCO ₃	a	11,6	11,34	12,8	14
	b	9,9	9,9	14,55	16,4
	c		9,3	15,41	16,3
	d				15,4
	e				16,85
	f			17,55	17,4

Figure 5 : Effet du classement des UCS selon l'occupation du sol (C1 = + maïs ; C2= - maïs) sur la teneur médiane en C organique (g/kg) dans différentes méta-UTS (*) du Pays RVGB. (*) Les méta-UTS sont situées dans la même classe d'UCS selon les types de sol (classe 5).

Figure 5 : Effect of SMUs classification by land use (C1 = + maize ; C2= - maize) on the median organic carbon content (g/kg) in some meta-STUs (*) of the RVGB région. (*) All meta-STUs are located in the same SMU class according to soil types (class 5).



logiques et/ou une modification des propriétés de ces dernières qui expliquerait un effet protecteur plus faible sur le Carbone organique. Ce défaut de cohérence pourrait être aussi dû en partie à l'imprécision de la fonction de pédotransfert utilisée pour estimer la teneur en argile d'une partie des analyses.

Dans le Thouarsais (tableau 13), on observe le plus souvent aussi une augmentation de la teneur en C organique avec la classe de teneur en argile. Néanmoins, cette tendance n'est pas observée entre les deux premières classes pour lesquelles les teneurs ne varient pas. L'imprécision de la fonction de pédotransfert est probablement en cause pour les classes aa et ab qui correspondent majoritairement à des sols développés sur le socle car la qualité de la prédiction est moins bonne sur ce domaine que sur le domaine sédimentaire.

Les variations en fonction de la teneur en CaCO_3 semblent aussi globalement cohérentes pour les classes d'argile les plus élevées (classes c et d). Pour les faibles teneurs en argile (classes a et b), les sols non calcaires ont - a contrario - une teneur en C organique supérieure à celle des sols légèrement calcaires. Ceci pourrait s'expliquer par la localisation de ces sols sur le socle ancien, ce qui induit une ambiance physico-chimique spécifique (pH acide notamment) susceptible de limiter la minéralisation des matières organiques, ou d'avoir influencé leur histoire culturale (retournement des prairies plus tardif par exemple).

Classement des UCS en méta-UCS à partir de leur occupation du sol

Dans cette partie, seules les méta-UCS basées sur les triplets de cultures sont étudiées. Les résultats présentés correspondent aux seules situations où l'on peut comparer les médianes de différentes méta-UCS pour une même méta-UTS. Le cas du Thouarsais n'est pas étudié car les croisements méta-UTS x méta-UCS n'apportent pas plus de précision que les méta-UTS seules.

Cas du pays RVGB (figure 5)

Globalement les classes d'occupation du sol, basées sur les triplets de cultures, discriminent assez peu les groupes pour la teneur médiane en C organique, ce qui est logique étant donnée leur faible différenciation par les cultures dominantes. Néanmoins, la classe c1 où la monoculture de maïs est la plus fréquente (au détriment des triplets maïs-céréale) donne des teneurs en C organique supérieures (parfois égales) à celles de la classe c2 dans la plupart des méta-UTS. Ce résultat est cohérent avec le niveau de restitution humique des résidus de culture, plus élevé en maïs grain qu'avec une céréale à paille. Une méta-UTS fait toutefois exception (teneur en calcaire E [12.5 ; 25]), sans qu'il soit possible d'expliquer ce cas contradictoire.

Cas du Tardenois

Les résultats (non présentés ici) sont conformes à ceux présentés plus haut (figure 4) et obtenus à partir d'une classification par les types d'exploitation. Globalement les variations entre classes sont cohérentes, mais peu marquées. La méta-UCS la moins betteravière (c1) donne des teneurs en Corg médianes supérieures ou égales à celles de c2 (moindres restitutions par les résidus de culture dans les rotations betteravières, non compensées par les apports organiques).

Classement des UCS en méta-UCS selon leurs types de sols

Cas du Pays RVGB (figure 6)

Le classement des médianes entre classes d'UCS selon les types de sol montre certaines constantes, observables pour la grande majorité des méta-UTS. Ces tendances sont parfois explicables par les spécificités des sols: les médianes de la classe 5 sont inférieures (ou égales) à celles des autres classes (absence

Figure 6 : Effet du classement des UCS par les types de sol dominants (classes C1, C3, C4, C5, selon *tableau 7*) sur la teneur médiane en C organique (g/kg) dans différentes méta-UTS (*) du Pays RVGB. C1 : caillouteux (calcaires), C3 : hydromorphes, C4 : caillouteux (non calcaires), C5 : non caillouteux, non hydromorphes. (*) Les méta-UTS sont situées dans la même classe d'UCS selon l'occupation du sol (classe 1).

Figure 6: Effect of SMUs classification by dominant soil types (classes C1, C3, C4, C5 in *table 7*) on the median organic carbon content (g/kg) in some meta-STUs (*) of the RVGB région. (*) All meta-STUs are located in the same SMU class according to land use (class 1).

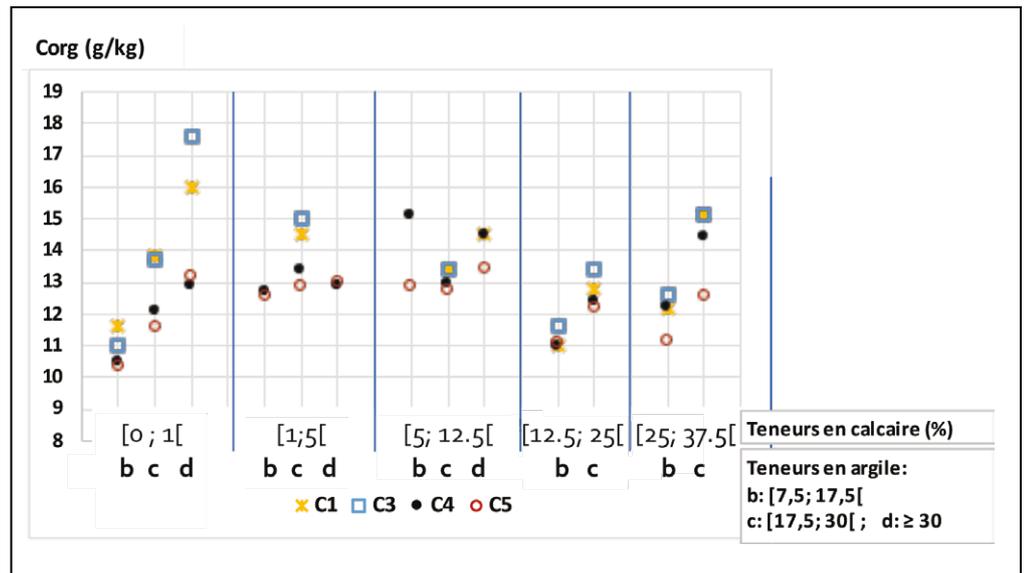
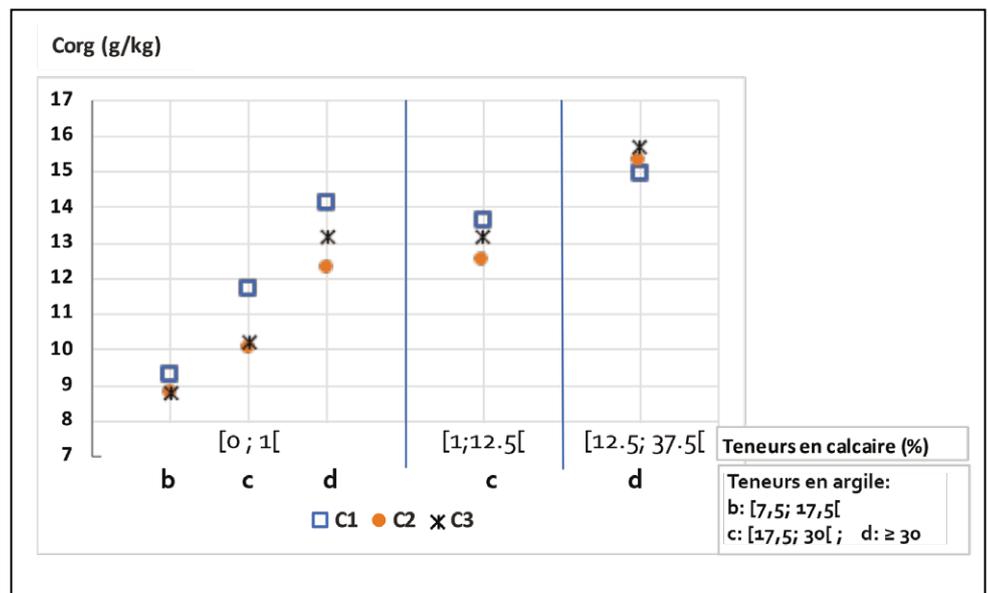


Figure 7 : Effet du classement des UCS par les types de sol (classes C1, C2, C3, selon *tableau 7*) sur la teneur médiane en C organique (g/kg) dans différentes méta-UTS (*) du Tardenois. C1 : hydromorphes, non caillouteux ; C2 : non hydromorphes, non caillouteux ; C3 : hétérogènes, caillouteux ou hydromorphes. (*) Les méta-UTS sont situées dans la même classe d'UCS selon l'occupation du sol (classe 1).

Figure 7: Effect of SMUs classification by soil types (classes C1, C2, C3 in *table 7*) on the median organic carbon content (g/kg) in some meta-STUs (*) of the Tardenois. (*) All meta-STUs are located in the same SMU class according to land use (class 1).



d'hydromorphie et de pierrosité en c5); les médianes de la classe 3 sont presque toujours supérieures (ou égales) à celles des autres classes (effet de l'hydromorphie en c3). Il est en revanche difficile d'expliquer les médianes de la classe 1 toujours supérieures (ou égales) à celles de la classe 4.

Cas du Tardenois (figure 7)

On observe des tendances similaires à celles du Pays RVGB. Pour la majorité des méta-UTS, la teneur médiane en C org est en général plus élevée dans la classe C1 caractérisée par une dominante de sols hydromorphes. De même, les médianes sont en général les plus faibles dans la classe C2, caractérisée par des sols non hydromorphes et non caillouteux.

Comparaison des teneurs médianes en C org dans les méta-UTS selon l'unité de calcul : UCS vs méta-UCS

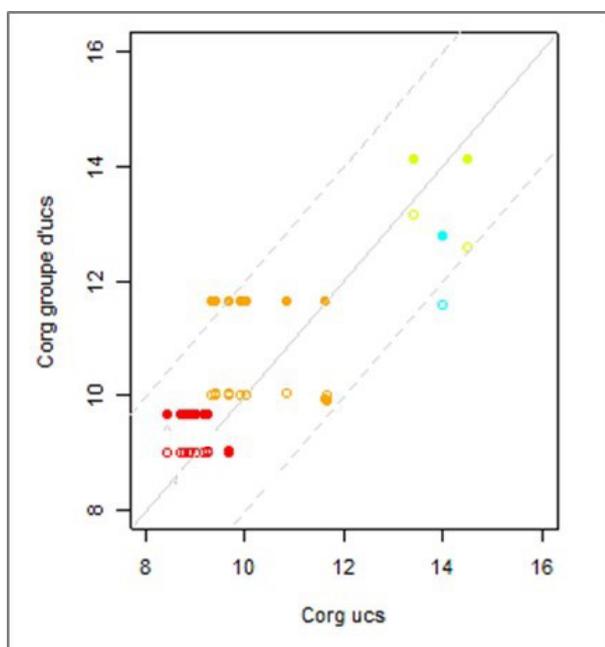
Pour une méta-UTS donnée, l'écart entre médianes calculées respectivement au niveau de l'UCS, de la méta-UCS associée ou de l'ensemble du territoire reste faible, le plus souvent inférieur à 2 g/kg (figure 8).

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

La méthode d'affectation des analyses de la BDAT aux types de sol sur un territoire local s'appuie sur 2 critères de classement : un double critère analytique (teneur en argile et

Figure 8 : Teneur en C org médiane calculée au niveau d'un groupe d'UCS, en fonction de la teneur calculée au niveau de l'UCS (en g/kg), dans différentes méta-UTS du Tardenois. Marqueurs vides : groupe constitué par toutes les UCS du territoire ; marqueurs pleins : groupe constitué par une méta-UCS. Les couleurs représentent les classes de teneur en argile et calcaire selon le *tableau 1* (rouge : ab, orange : ac, vert : ad, bleu : cc).

Figure 8 : Median organic carbon content (g/kg), calculated in a SMU group vs calculated in a corresponding SMU (Tardenois). Open circles : group constituted by all SMUs ; filled circles : group constituted by a meta-SMU. Colors represent classes by clay and CaCO₃ content according to table 1 (red : ab, orange : ac, green : ad, blue : cc).



calcaire) et un critère géographique d'appartenance à une UCS.

Malgré le choix d'un critère analytique simplifié, le nombre d'analyses directement exploitables est parfois insuffisant. La mise au point de fonctions de pédotransfert paramétrées localement pour estimer le taux d'argile en fonction de la CEC et de la teneur en carbone organique permet de s'affranchir de cette limite.

En revanche, le cas des sols très calcaires et comportant une forte proportion de calcaire dans la fraction argileuse pose un problème particulier : suivant le mode de détermination analytique de la teneur en argile (avec ou sans décarbonatation) le taux d'argile d'un même échantillon peut prendre des valeurs très différentes, alors que ce mode de détermination n'est pas renseigné dans la BDAT. Celui-ci étant le plus souvent fixé *a priori* par chaque labo-

ratoire, il faudrait trier les analyses en fonction de leur laboratoire d'origine et du mode de détermination couramment appliqué afin de pouvoir traiter le cas des territoires concernés.

Il subsiste enfin une incertitude sur la localisation réelle de certains groupes d'analyses réalisées à l'initiative d'organismes agricoles (coopératives), référencées sur la commune du commanditaire. L'application de la méthode nécessiterait de pouvoir les repérer puis de les éliminer, au moins dans le cas des territoires très hétérogènes.

L'affectation des analyses au niveau de l'UCS présente plusieurs avantages par rapport aux unités-support couramment utilisées pour exploiter la BDAT que sont le canton ou la petite région agricole. Elle permet : (i) de caractériser assez précisément les types de sol à associer aux analyses de terre, ce qui facilite l'interprétation des résultats, (ii) de prendre en compte – dans une certaine mesure – l'effet des variables autres que A et CaCO₃ sur la teneur en C org estimée, en fonction des caractéristiques dominantes des sols dans l'UCS (hydromorphie, charge en éléments grossiers de la strate de surface), (iii) de prendre en compte – partiellement et indirectement – l'effet de l'histoire culturale de chaque UCS. L'UCS est utilisée ici comme une unité spatiale au sein de laquelle la dynamique des systèmes de culture est relativement homogène, et a pu générer une évolution spécifique de la distribution des teneurs en carbone dans les sols, notamment à travers le niveau des restitutions humiques des successions culturales ou les pratiques d'amendements organiques passés. Les résultats obtenus dans le Tardenois (*figure 4*) sont cohérents avec cette hypothèse : ils montrent d'une part que les UCS de cette petite région peuvent être différenciées en fonction de la combinaison des types d'exploitation qui les occupent et d'autre part que cette différenciation se retrouve dans les distributions des teneurs en carbone organique (résumées par leur médiane).

Ce choix procède d'une approche similaire à celle développée par Mignolet *et al.* (2001 ; 2007) montrant la pertinence des Petites Régions Agricoles (PRA), délimitées il y a plus de 60 ans sur des critères de sols, de climat et de systèmes de production, pour différencier spatialement les dynamiques des systèmes de production et des systèmes de culture sur plusieurs décennies. Les UCS sont en effet des unités spatiales – de taille inférieure – dont les critères de délimitation sont plus ou moins analogues (sols, climat et occupation du sol) ; elles sont par ailleurs constitutives de petites régions naturelles avec lesquelles les PRA présentent en général beaucoup de similitudes.

L'affectation des teneurs en Corg par classes déterminées sur la base des critères analytique et géographique prend en compte une part faible de la variabilité observée (13 à 34 % dans les 3 cas étudiés), mais non négligeable au regard de la multiplicité des déterminants de celle-ci. Le rapport de corrélation le plus faible peut s'expliquer par plusieurs facteurs liés respectivement à la méthode, à la source de données, et aux spécificités du territoire : imprécision de la fonction de pédotransfert utilisée pour estimer le taux d'argile, incertitude sur la localisation de certaines analyses

de ce territoire (voir supra), forte variabilité des histoires culturelles entre parcelles pour un même type de sol au niveau intra-UCS.

Dans les cas minoritaires où le nombre d'analyses est insuffisant pour caractériser une méta-UTS au niveau de l'UCS, le regroupement d'UCS en méta-UCS est opéré selon 2 catégories de critères : propriétés des sols et occupation du sol. Ce choix repose en partie sur l'hypothèse que des descripteurs de l'occupation du sol actuelle, basés sur les données du RPG et traduisant la diversité des systèmes de culture présents dans chaque UCS, sont des indicateurs pertinents pour agréger ou différencier ces UCS en fonction de leurs histoires culturelles dominantes. On peut s'interroger sur sa validité, notamment dans les territoires marqués par le retournement des prairies permanentes. Cette hypothèse se vérifie néanmoins dans deux territoires tests (Tardenois et Pays RVGB) où on observe bien les effets attendus sur les variations de teneurs en carbone organique entre méta-UCS. De plus, Xiao *et al.* (2015) ont montré que les successions de cultures mises en place par les agriculteurs après retournement de prairies permanentes se différencient en fonction des systèmes de production préexistant avant la reconversion (successions à base de maïs et de cultures fourragères dans les systèmes d'élevage herbagers, successions céréalières dans les systèmes mixtes). Par ailleurs, le risque de regrouper par cette méthode des UCS ayant des histoires culturelles très différentes est minimisé par le fait que l'agrégation repose en même temps sur un critère pédologique qui traduit les contraintes du milieu, comme déterminant fort de l'histoire culturelle d'un territoire.

Le choix des indicateurs à utiliser pour regrouper les UCS peut dépendre des spécificités du territoire ; toutefois, les trois indicateurs testés pour l'occupation du sol montrent des performances similaires. La classification en méta-UCS n'est pas toujours nécessaire (exemple du Thouarsais) : la caractérisation des méta-UTS effectuée globalement au niveau du territoire (toutes UCS confondues) peut suffire dans le cas où les classes de teneurs en argile et calcaire définissant les méta-UTS sont fortement corrélées aux critères d'intérêt pour la classification des UCS (charge en cailloux, hydromorphie, successions de cultures dominantes).

Un effectif minimal de 10 analyses a été fixé pour pouvoir caractériser une méta-UTS par sa médiane. Le choix de ce seuil vise à minimiser le nombre d'UTS non-renseignées sur le territoire. Il peut paraître trop faible pour limiter le biais d'échantillonnage d'après l'étude de Servain et Sagot (2014) portant sur les teneurs en phosphore assimilable. Une étude de sensibilité des résultats à des seuils plus élevés serait utile pour compléter l'évaluation de la méthode.

La validation au sens strict des résultats n'a pas été possible ; elle nécessiterait de disposer, sur chaque territoire-test, d'un jeu de données localisées renseignant à la fois le type de sol, la teneur en carbone organique et le système de culture de parcelles agricoles, avec un effectif suffisant pour représenter les principales combinaisons présentes. Néanmoins, la cohérence

agronomique des résultats paraît globalement satisfaisante. Les variations de teneurs observées entre classes (méta-UTS dans les UCS et les méta-UCS) s'expliquent assez bien en fonction des facteurs attendus. Elles mettent en évidence (i) l'effet des propriétés des sols (teneurs plus élevées dans les sols argileux et/ou calcaires, ou hydromorphes ou dans les sols caillouteux), (ii) l'effet du niveau des restitutions humiques des cultures (teneurs plus élevées dans les UCS où les céréales à paille ou le maïs grain sont les plus fréquentes). Ces résultats semblent ainsi conforter la pertinence de la méthode et son potentiel de généralisation dans les territoires d'application de la démarche ABCTerre. Une validation complémentaire consisterait à comparer les teneurs décrites comme modales dans les UTS des RRP aux teneurs modales prédites avec la méthode proposée et à en interpréter les écarts ; cette étude permettrait d'apprécier la plus-value de la méthode.

Il faut enfin souligner que la qualité des résultats restera dépendante de la densité d'analyses exploitables dans la BDAT sur le territoire considéré. C'est en effet l'insuffisance des effectifs pour caractériser certaines situations qui oblige à mobiliser parfois des procédures potentiellement sources d'incertitude (fonction de pédotransfert, agrégation des UCS en méta-UCS). Ceci milite évidemment pour que la BDAT continue d'être alimentée et enrichie.

La méthode fournit une distribution des teneurs en carbone organique associée à chaque couple (UTS, UCS). Par la suite, dans la méthode ABCTerre, seule la médiane de cette distribution est utilisée et attribuée par défaut à tous les couples (UTS, système de culture) identifiés dans l'UCS pour la même UTS. Ce choix constitue une limite importante à la qualité des résultats finaux, dans le cas où les systèmes de cultures concernés résulteraient de dynamiques très différentes. Pour mieux rendre compte de la variabilité induite par la diversité des systèmes de cultures passés au niveau d'une UCS, la simulation de l'évolution à long-terme des stocks de carbone organique devrait idéalement se baser sur la distribution obtenue pour chaque type de sol, plutôt que sur les seules médianes.

Au-delà de la démarche ABCTerre, la méthode pourrait également servir à caractériser les types de sol (UTTyterres par exemple) dans les régions s'étant dotées d'une typologie agronomique. Cette étape faciliterait l'usage de modèles ou d'outils d'aide à la décision agri-environnementaux à l'échelle du territoire, car la teneur en Corg est une donnée d'entrée fréquemment requise dans ces modèles (Koller *et al.*, 2011) en raison de son influence sur le comportement agronomique des sols (stabilité structurale, minéralisation de l'azote, rétention des polluants).

BIBLIOGRAPHIE

- Agrotransfert, Arvalis, 2008 - Exporter des pailles sans risque pour l'état organique des sols. Guide de décision à la parcelle. Plaquette FRCA Picardie – Coopénergie. 9 p + annexes.
- Andriulo A, Mary B, Guéris J., 1999 - Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie*, 19: 365-377.
- 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. et Stengel P., 2004 - Le programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols de France. *Etude et Gestion des Sols* 11 (3), 187-197.
- Baize D., 2018 - Guides des analyses en pédologie. Ed. Quae.
- Clivot, H., Mary, B., Vale, M., Cohan, J.-P., Champolivier, L., Piraux, F., Laurent, F., Justes, E., 2017 - Quantifying *in situ* and modeling net nitrogen mineralization from soil organic matter in arable cropping systems. *Soil Biol. Biochem.* 111, 44–59.
- Clivot H., Mouny J.C., Duparque A., Dinh J.L., Denoroy P., Houot S., Vertes 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.
- Duparque A., Tomis V., Mary B., Boizard H., Damay N., 2011 - Le bilan humique AMG. Pour une démarche de conseil fondée sur des cas-types régionaux. 10^{es} Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse. COMIFER-GEMAS; Reims, 23–24 Novembre 2011 - 19 p.
- INRA InfoSol, 2018 - DONESOL version 3.7. Dictionnaire de données. Doc. Gissol.
- Koller R., Sauter J., Scheurer O., 2011 - La prise en compte des sols dans les outils d'aide à la décision, d'évaluation et les modèles : apports possibles des bases de données sols régionales. 10^{es} Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse. COMIFER-GEMAS; Reims, 23-24 Novembre 2011 (Poster).
- Levasseur F., Martin P., Bouty C., Barbottin A., Bretagnolle V., Therond O., Scheurer O., Piskiewicz N., 2016 - RPG Explorer: a new tool to ease the analysis of agricultural landscape dynamics with the Land Parcel. *Computers and Electronics in Agriculture* 127, 541-552.
- 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., Giroit G., Voltz M. et Bardy M., 2014 - Le programme Inventaire Gestion Conservation des Sols de France: volet Référentiel Régional Pédologique. *Etude et Gestion des Sols* 21, 125.
- Laroche B., Degan F., Koller R., Scheurer O., Bouthier A., Moulin J., Sauter J., Ducommun C., Fort J-L, Maillant S., Party J-P, Renouard C., Saby N.P.A., Bertouy B., 2020 - Vers une typologie agronomique partagée: TYPTERRRES. (accepté dans *Etude et Gestion des Sols*).
- Louis B., Lemerrier B., 2013 - Coupler les bases de données RRP et BDAT pour améliorer la connaissance des sols- Cas du carbone organique. *Rapport UMR SAS INRA/AgroCampus Ouest*, 30 p.
- Meersmans, J., Martin, M.P., De Ridder F., Lacarce E., Wetterlind J., De Baets S., Le Bas C., Louis B. P., Orton T. G., Bispo A., Arrouays D., 2012 - A novel soil organic C model using climate, soil type and management data at the national scale in France. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 873–888.
- Mettauer H., Tual Y., Huck C., Trendel R., 1983 - De la connaissance du comportement physique et mécanique des sols de l'Est de la France. *Agronomie* 3 (2), 141-152.
- Mignolet C., Benoît M., Bornerand C., 2001 - Différenciation du bassin de la Seine selon les dynamiques des systèmes de production agricoles depuis les années 70 - *Cahiers Agricultures*; 10: 377-87
- Mignolet C., Schott C., Benoît M., 2007 - Spatial dynamics of farming practices in the Seine basin: methods for agronomic approaches on a regional scale. *Science of the Total Environment*; 375, 13–32
- Minasny B., Malone B. P., McBratney A. B., Angers D. A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot Vincent, 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. X., Poggio L., Savin I., Stolbovov V., Stockmann U., Sulaeman Y., Tsui C. C., Vagen T. G., van Wesemael B., Winowiecki L., 2017 - Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292; 59–86
- Paroissien J.-B., Saby N., Arrouays D., 2011 - Développement de méthodes d'affectation des analyses de la BDAT vers les Unités Typologiques de Sols. *Rapport interne InfoSol, INRA Orléans*, 8 p.
- Party J.P., Koller R., Burtin M.L., Sauter J., 1999 - Guide des sols d'Alsace – Petite région naturelle Plaine Sud Alsace. *Doc. Région Alsace*, 139 p. + annexes (http://www.araa-agronomie.org/uploads/guide_des_sols/10-Guide%20des%20sols-Plaine-SudAlsace_1999.pdf).
- Party J.P., 2003 - Guide des sols d'Alsace – Petite région naturelle Piedmont haut-rhinois et Ochsenfeld. *Doc. Région Alsace*. 187 p. + annexes (http://www.araa-agronomie.org/uploads/guide_des_sols/12-Guide%20des%20sols-Piedmont68-Ochsenfeld_2004.pdf).
- Pellerin S. et Bamière L. (pilotes scientifiques); 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., Darroussin 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 S., Mézière D., Morvan T., Mosnier C., Roger-Estrade J., Saint-André L., Sierra J., Théron O., Viaud V., Grateau R., Le Perchec S., Savini I., Réchauchère O., 2019 - Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 114 p.
- Saby N., Lemerrier B., Arrouays D., Leménager S., B.P. Louis B.P., Millet F., Paroissien J.-B., Schellenberger E., Squidant H., C. Swiderski(1), B. Toutain(1), C. Walter(2) et M. Bardy(1), 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.
- Saffih-Hdadi, K., Mary, B., 2008 - Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon. *Soil Biol. Biochem.* 40, 594–607
- Sebillotte M., 1989 - Fertilité et systèmes de production. INRA, Paris ISBN: 2-7380-007-03 - 369 p.
- Servain F., Sagot S., 2014 - Evolution des teneurs en éléments fertilisants des sols agricoles: les limites des enquêtes et des statistiques réalisées à partir des bases de données. 12^{es} Journées d'Etude des Sols, 30 juin - 4 juillet 2014, Le Bourget du Lac. 3 p.
- Soussana J.F., Lutfalla S., Ehrhardt F., Rosenstock T., *et al.*, 2019 - Matching policy and science: Rationale for the '4 per 1000 - soils for food security and climate' initiative. *Soil and Tillage research* 188; 3-15
- Vigot M., 2010 - Spatialisation du diagnostic de l'état organique des sols cultivés à l'échelle d'un territoire: exploration d'une méthode basée sur le bilan humique AMG, appliquée dans le département du Loiret. *Mémoire d'ingénieur de l'ENITA Bordeaux*. Lasalle Beauvais. 67 p + annexes
- Vigot M., Scheurer O., Paroissien J.B., Duparque A., Fort J.L., 2013 - Evolution du statut organique des sols cultivés: pourquoi et comment l'évaluer à l'échelle d'un territoire ? Exemples d'application en Poitou Charentes. 11^{es} Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse – COMIFER-GEMAS, Poitiers - 20-21 Nov. 2013 - 8 p.
- Xiao Y., Mignolet C., Mari J.F., Benoît M., 2015. Characterizing historical (1992–2010) transitions between grassland and cropland in mainland France through mining land-cover survey data. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(8): 1511–1523

