

Une fonction de pédotransfert pour estimer la fraction argileuse après décarbonatation pour les sols calcaires de France métropolitaine

R. Tscheiller^(1*), C. Le Bas⁽²⁾, L. Soucémariadin⁽³⁾, A. Bouthier⁽¹⁾, S. Sagot⁽⁴⁾,
et F. Servain⁽⁴⁾

1) Arvalis Institut du Végétal, 110 chemin de la Côte Vieille 31450 Baziège, France

2) INRAE, unité Info&Sols, F-45075 Orléans, France

3) Acta Les Instituts Techniques Agricoles, 149 rue de Bercy 75595 Paris Cedex 12, France

4) Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherche (LDAR), Pôle du Griffon 180 rue Pierre-Gilles de Gennes 02007 Barenton-Bugny - Laon cedex, France

* Auteur correspondant : r.tscheiller@arvalis.fr - christine.le-bas@inrae.fr

RÉSUMÉ

Cet article présente l'élaboration et la validation d'une fonction de pédotransfert (FPT) par Arvalis et ses partenaires, destinée à estimer la teneur en argile minéralogique (après décarbonatation) des sols calcaires en France métropolitaine. Cette FPT est cruciale car de nombreux modèles agronomiques nécessitent cette donnée, souvent indisponible en routine, qui se distingue de l'argile mesurée sans décarbonatation. Nous décrivons la construction de la fonction, qui utilise la teneur en argile sans décarbonatation et la teneur en calcaire total pour prédire l'argile minéralogique. La performance de la fonction obtenue est ensuite rigoureusement évaluée sur deux jeux de données de validation distincts (dont un mobilisant la base de données DoneSol) à l'aide d'indicateurs statistiques comme l'écart quadratique moyen et l'efficacité. Les résultats confirment que cette nouvelle FPT est performante et pertinente, ouvrant la voie à une meilleure intégration des sols carbonatés dans les outils d'aide à la décision agronomique.

Mots-clés

Fonction de pédotransfert, argile granulométrique, argile minéralogique, calcaire, outil d'aide à la décision, France

Comment citer cet article :

Tscheiller R., Le Bas C., Soucémariadin L., Bouthier A., Sagot S., et Servain F., 2026 - Une fonction de pédotransfert pour estimer la fraction argileuse après décarbonatation pour les sols calcaires de France métropolitaine *Étude et Gestion des Sols*, 33, 231-239

SUMMARY**A PEDOTRANSFER FUNCTION TO ESTIMATE CLAY CONTENT AFTER CARBONATE DISSOLUTION IN CALCAREOUS SOILS IN MAINLAND FRANCE**

This paper presents the development and validation of a pedotransfer function (PTF) by Arvalis and its partners, designed to estimate the mineralogical clay content (after carbonate dissolution) of calcareous soils in mainland France. This PTF is crucial because many agronomic models require this data, which is often unavailable in routine practice and differs from clay measured without carbonate dissolution. We describe the construction of the function, which uses the clay content measured without carbonate dissolution and the total carbonate content to predict mineralogical clay. The performance of the function we obtained is then rigorously evaluated using two separate validation datasets (one of which uses the DoneSol database) and statistical indicators such as mean square error and efficiency. The results confirm that this new PTF is effective and relevant, paving the way for better integration of carbonate-rich soils into agronomic decision-making tools.

Key-words

Pedotransfer function, granulometric clay, mineralogical clay, carbonate, decision support tool, France

RESUMEN**UNA FUNCIÓN DE PEDOTRANSFERENCIA PARA ESTIMAR EL CONTENIDO DE ARCILLA DESCARBONATO EN LOS SUELOS CALCAREOS DE LA FRANCIA METROPOLITANA**

Este artículo presenta el desarrollo y la validación de una función de pedotransferencia (FPT) por Arvalis y sus socios, destinada a estimar el contenido de arcilla mineralógica (tras la descarbonatación) de los suelos calcáreos de Francia metropolitana. Esta FPT es fundamental, ya que numerosos modelos agronómicos requieren esta información, que a menudo no está disponible en la práctica rutinaria y difiere del contenido de arcilla medida sin descarbonatación. Se describe la construcción de la función, que utiliza el contenido de arcilla sin descarbonatación y el contenido total de carbonato para predecir la arcilla mineralógica. El desempeño de la función obtenida se evalúa posteriormente de manera rigurosa mediante dos conjuntos de datos independientes de validación (uno de los cuales utiliza la base de datos nacional DoneSol), empleando indicadores estadísticos como el error cuadrático medio y la eficiencia. Los resultados confirman que esta nueva FPT es eficaz y pertinente, y abre el camino hacia una mejor integración de los suelos calcáreos en las herramientas de apoyo agronómicas.

Palabras clave

Función de pedotransferencia, arcilla granulométrica, arcilla mineralógica, caliza, herramienta de apoyo agronómica, Francia

1. INTRODUCTION

L'analyse granulométrique de la terre fine (fraction de l'échantillon de taille inférieure à 2 mm), pratiquée par les laboratoires d'analyse de terre à des fins de recherche ou de conseil, permet de déterminer la répartition des particules minérales d'un échantillon de sol dans différentes fractions de taille variable. Le nombre de fractions et leurs limites granulométriques peuvent varier selon les analyses : habituellement, en France, entre 3 et 8 fractions sont mesurées, et classiquement les particules inférieures à 2 μm constituent la fraction appelée argile, alors que les limons se situent entre 2 et 50 μm et les sables entre 50 μm et 2 mm. Cependant, dans les sols calcaires, la terre fine se compose également de particules de calcaire plus ou moins fines. Dans ces sols, les analyses granulométriques sont réalisées soit sans supprimer les particules calcaires (analyse sans décarbonatation), soit en les éliminant par attaque à l'acide chlorhydrique (analyse après décarbonatation ; Lucke *et al.*, 2015). Baize (2000) recommande de toujours réaliser l'analyse sans décarbonatation pour l'interprétation des propriétés physiques des sols. Historiquement, ce sont les analyses sans décarbonatation qui sont majoritairement réalisées.

Cependant, un certain nombre de modèles agronomiques demandent en données d'entrée la teneur en argile après décarbonatation, appelée teneur en argile minéralogique, majoritairement constituée de phyllosilicates, ou encore parfois « argile vraie » (Mary *et al.*, 1999 ; Beaudoin *et al.*, 2023). Par exemple, l'estimation de la minéralisation potentielle de l'azote organique est plus précise en distinguant l'effet de la teneur en argile après décarbonatation de celui du calcaire total. Or, la teneur en argile après décarbonatation étant peu disponible, l'utilisation de ces modèles agronomiques est limitée dans les sols calcaires en raison de l'indisponibilité de cette donnée d'entrée. Il n'existe que peu de fonctions d'estimation de la teneur en argile après décarbonatation qui permettraient de lever cette difficulté. Les fonctions existantes ont essentiellement été établies à des échelles locales. Par exemple, Beaudoin *et al.* (2007) ont déterminé une fonction d'estimation de la teneur en argile après décarbonatation à partir de la teneur en argile sans décarbonatation et de la teneur en calcaire total sur deux parcelles dans l'Aisne, donc avec une très faible représentativité à l'échelle nationale. Des travaux, réalisés sur de nombreux sites répartis sur l'ensemble de la France métropolitaine par Arvalis et des organismes partenaires, ont permis d'établir une fonction de pédotransfert valide sur un grand nombre d'horizons de sols calcaires, suffisamment précise et simple de mise en œuvre. Les principaux résultats sont présentés dans cet article.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Construction de la fonction de pédotransfert Arvalis

2.1.1. Jeu de données d'entraînement

Un jeu de données a été constitué à partir d'analyses d'horizons pédologiques provenant de profils prélevés dans des parcelles expérimentales associées à des essais menés par Arvalis, Terres Inovia, GEVES, Syngenta, Maisadour et Euralis (appelé jeu de données Arvalis dans la suite de l'article). Ce jeu, comportant 115 horizons caractérisés par leurs analyses granulométriques sans et après décarbonatation, leur teneur en calcaire total, leur teneur en éléments grossiers et la nature de leur substrat calcaire (craie, calcaire dur, marne), a été utilisé pour établir la fonction de pédotransfert. Les horizons, prélevés dans des sols de France métropolitaine, proviennent de 39 profils et sont tous compris entre 0 et 160 cm de profondeur (Figure 1).

Les analyses granulométriques ont été effectuées dans le même laboratoire, AUREA (anciennement SAS), avec la méthode de la pipette selon la norme NF X31-107, sans et après décarbonatation pour chaque échantillon. La détermination de la teneur en calcaire total (ou plus exactement en carbonates totaux, ci-après dénommée teneur en CaCO_3) a été réalisée selon la norme NF ISO 10693. La teneur volumique en éléments grossiers de l'horizon pédologique dans lequel a été prélevé l'échantillon, a été estimée par observation visuelle de la proportion de surface occupée par ces éléments sur une face verticale de l'horizon, à l'aide de grilles de référence lors de la description des profils pédologiques.

Afin de s'assurer d'avoir un jeu d'entraînement homogène avec les jeux de données de validation, les résultats des analyses granulométriques sont exprimés de telle manière que la somme des fractions minérales non décarbonatées est égale à 100 % pour les analyses sans décarbonatation ; et que la somme des fractions minérales et de la teneur en CaCO_3 est égale à 100 % pour les analyses après décarbonatation.

2.1.2. Développement de la fonction de pédotransfert

Pour ce jeu d'entraînement, seules les analyses ayant une teneur en CaCO_3 de plus de 5 % sont retenues (99 horizons), considérant que les teneurs plus faibles se situent dans la plage d'incertitude de l'analyse. Pour faciliter le développement d'une équation, les données ont été agrégées en classe de teneur en CaCO_3 . Deux solutions ont été testées, par classe de 10 et de 20 % d'amplitude (Tableau 1).

La valeur moyenne du rapport argile sans décarbonatation (A_{SD}) sur argile après décarbonatation (A_{AD}) est calculée pour chacune des classes, puis une relation quadratique est établie

Figure 1 : Répartition géographique par département des horizons sélectionnés dans les jeux de données Arvalis (entraînement) et DoneSol (validation)

Figure 1: Geographic location of the soil profiles forming the training set (latitude, longitude) and of the pedological horizons forming DoneSol validation set (by department)

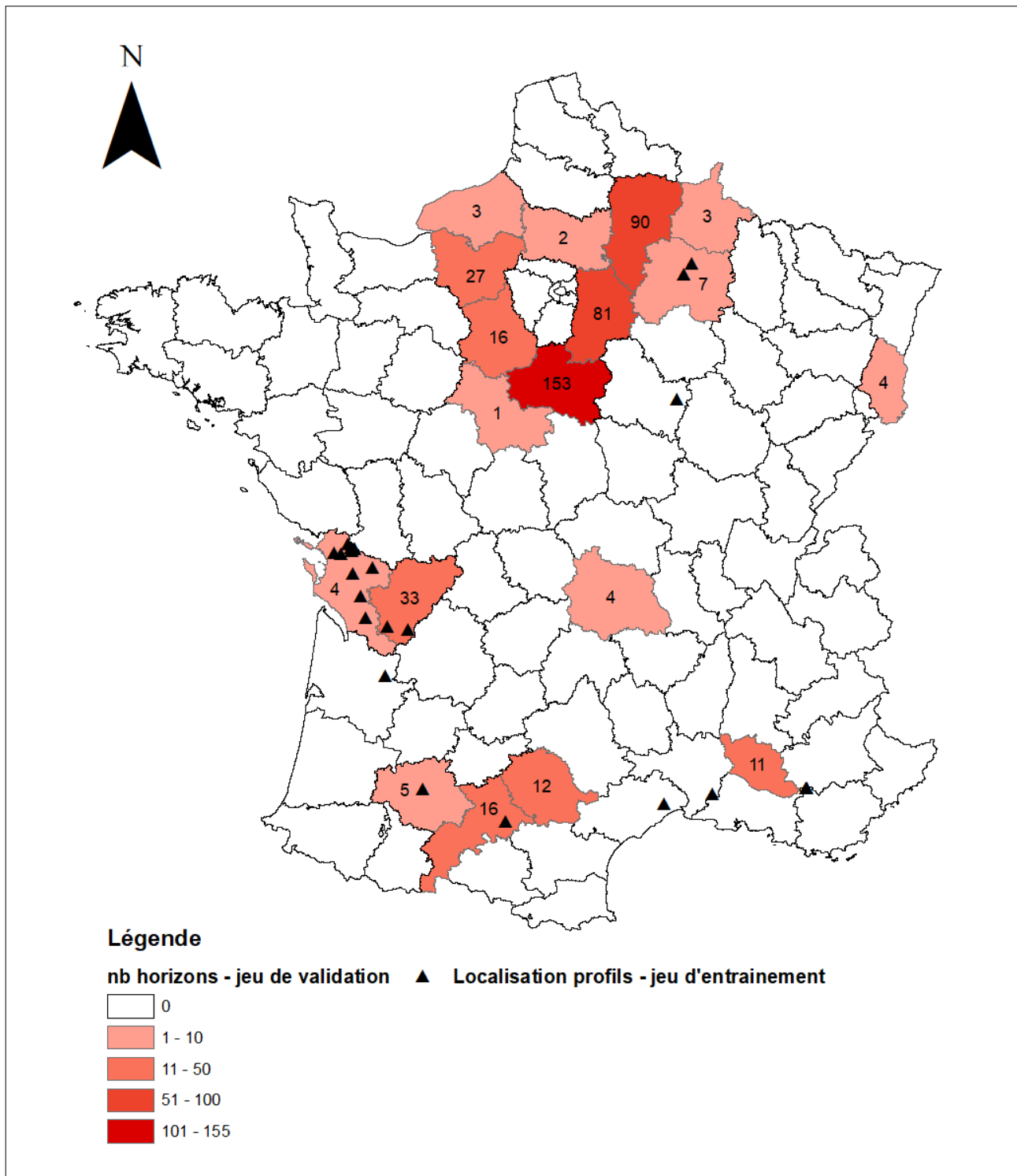


Tableau 1 : Nombre d'horizons par classes de teneur en CaCO_3 pour le jeu d'entraînement Arvalis et les jeux de validation AUREA et DoneSol**Table 1:** Number of horizons by classes of CaCO_3 content for the Arvalis training dataset, AUREA and DoneSol validation datasets

	Classe de teneur en CaCO_3	Nombre d'échantillons concernés dans le jeu d'entraînement Arvalis	Nombre d'échantillons concernés dans le jeu de validation AUREA	Nombre d'échantillons concernés dans le jeu de validation DoneSol
Méthode 1 : classes de CaCO_3 d'une amplitude de 10 %	0-10 %	8	29	44
	10-20 %	12	47	112
	20-30 %	12	46	86
	30-40 %	14	43	91
	40-50 %	10	20	48
	50-60 %	14	19	37
	60-70 %	14	16	25
	70-80 %	9	23	20
	80-90 %	6	18	6
	90-100 %	0	16	3
Méthode 2 : classes de CaCO_3 d'une amplitude de 20 %	0-20 %	20	76	156
	20-40 %	26	89	177
	40-60 %	24	39	85
	60-80 %	23	39	45
	80-100 %	6	34	9

entre ces valeurs moyennes et les teneurs en CaCO_3 médianes de chaque classe.

La teneur en éléments grossiers et la nature du substrat calcaire n'ont pas été retenues dans un souci de simplification de la fonction, ces données étant rarement renseignées ou connues des utilisateurs potentiels de la fonction.

2.2. Validation de la fonction de pédotransfert Arvalis

2.2.1. Jeu de données AUREA

Un jeu de données fourni par le laboratoire AUREA a été utilisé pour réaliser une première validation de la fonction de pédotransfert. Il est constitué de 277 horizons de surface travaillés (entre 0-20 ou 0-30 cm de profondeur), caractérisés par leurs analyses granulométriques sans et après décarbonatation, et leur teneur en CaCO_3 (supérieure à 5 %), réalisées avec les mêmes méthodes d'analyse que le jeu d'entraînement (Tableau 1). Les échantillons proviennent de 24 départements

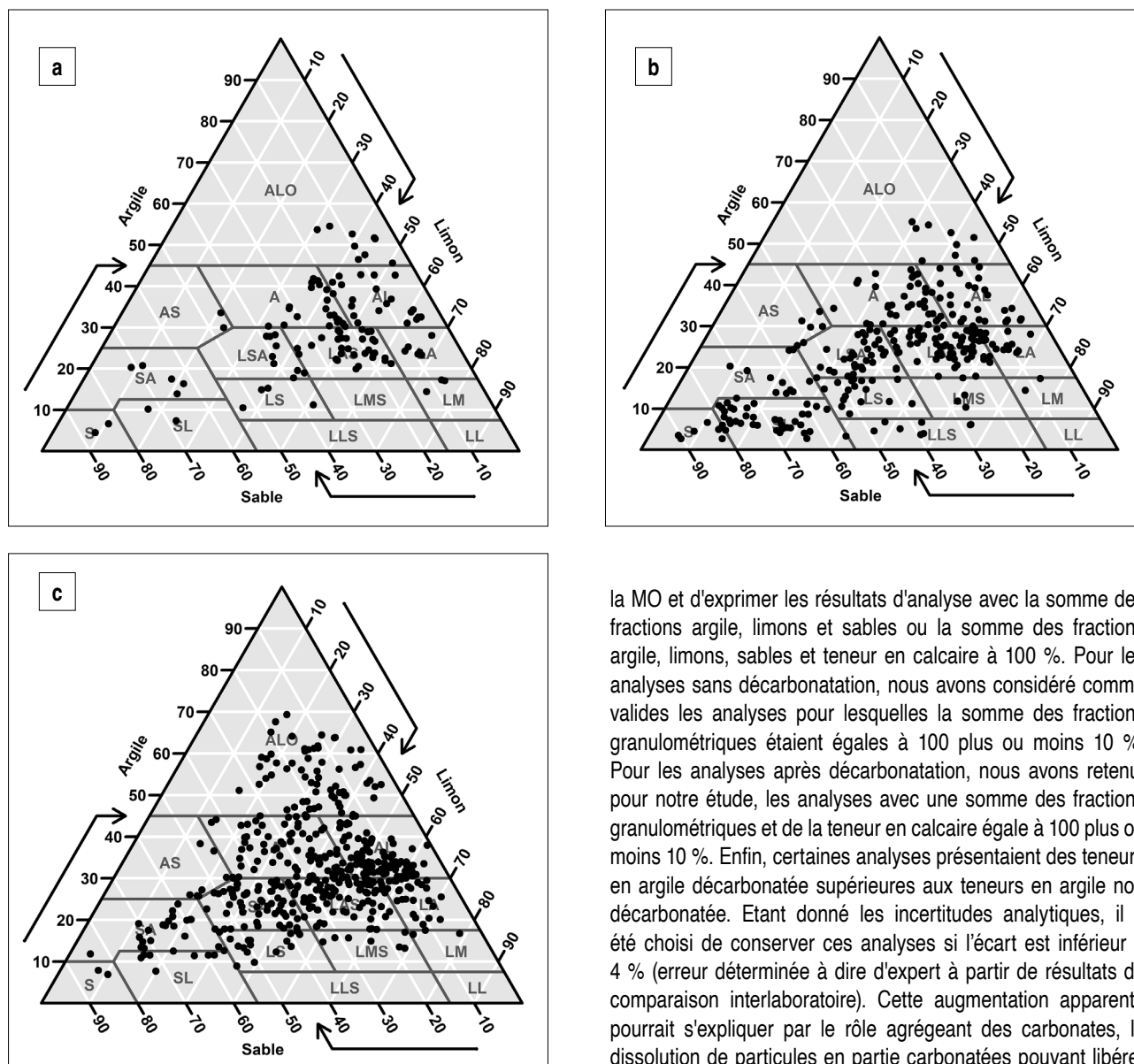
du territoire métropolitain, dont plus de la moitié provenant de Charente-Maritime, du Loiret et de l'Essonne. Les résultats des analyses granulométriques ont été normalisés pour que la somme des fractions minérales, ou la somme des fractions minérales et de la teneur en CaCO_3 , soit égale à 100 %, conformément à la méthode appliquée au jeu d'entraînement.

2.2.2. Jeu de données DoneSol

Ce jeu de données de validation provient de la base de données du système d'information national sur les sols DoneSol (Grolleau *et al.*, 2004). Seuls les horizons dont la limite inférieure moyenne est inférieure ou égale à 120 cm et pour lesquels deux analyses granulométriques respectivement sans et après décarbonatation sont disponibles ont été sélectionnés dans une première étape. Le seuil de 120 cm a été choisi car, d'une part, peu d'horizons plus profonds ont été utilisés durant la construction de la fonction de pédotransfert Arvalis et, d'autre part, il est peu probable d'avoir besoin de mobiliser des horizons plus profonds dans le cadre de l'utilisation d'OAD et de modèles de conseil agronomique dans un contexte agricole. Une validation et une

Figure 2 : Répartition dans le triangle des textures de l'Aisne des analyses granulométriques sans décarbonatation pour (a) le jeu d'entraînement Arvalis, (b) le jeu de validation Auréa, (c) le jeu de validation DoneSol

Figure 2: Distribution of the texture analysis for (a) training dataset, (b) Aurea validation dataset, (c) DoneSol validation dataset



homogénéisation des analyses granulométriques ont ensuite été réalisées. En effet, la base de données DoneSol capitalise des données de différentes sources, issues de différents laboratoires d'analyses, et leur description est hétérogène. Par exemple, bien que pour toute analyse granulométrique, la matière organique (MO) soit systématiquement éliminée, celle-ci peut être réintégrée ou non dans l'expression du résultat. Les valeurs peuvent donc être exprimées par rapport à la totalité de l'échantillon, ou bien rapportées à la fraction minérale uniquement. Nous avons choisi de ne pas prendre en compte

la MO et d'exprimer les résultats d'analyse avec la somme des fractions argile, limons et sables ou la somme des fractions argile, limons, sables et teneur en calcaire à 100 %. Pour les analyses sans décarbonatation, nous avons considéré comme valides les analyses pour lesquelles la somme des fractions granulométriques étaient égales à 100 plus ou moins 10 %. Pour les analyses après décarbonatation, nous avons retenu, pour notre étude, les analyses avec une somme des fractions granulométriques et de la teneur en calcaire égale à 100 plus ou moins 10 %. Enfin, certaines analyses présentaient des teneurs en argile décarbonatée supérieures aux teneurs en argile non décarbonatée. Étant donné les incertitudes analytiques, il a été choisi de conserver ces analyses si l'écart est inférieur à 4 % (erreur déterminée à dire d'expert à partir de résultats de comparaison interlaboratoire). Cette augmentation apparente pourrait s'expliquer par le rôle agrégeant des carbonates, la dissolution de particules en partie carbonatées pouvant libérer des argiles initialement agrégées de façon plus grossière (Francis *et al.*, 1995).

Le jeu de données de validation DoneSol est constitué de 472 horizons avec une distribution géographique assez hétérogène (Figure 1). Cependant, les grands ensembles calcaires sont représentés.

La répartition des textures (granulométrie sans décarbonatation) des horizons sélectionnés couvre une large partie du triangle des textures (Figure 2c). Seules les analyses avec une teneur en CaCO_3 supérieure à 5 % sont retenues, toutes les gammes de teneur en calcaire étant par ailleurs représentées (Tableau 1).

2.3. Critères d'évaluation de la fonction de pédotransfert

Trois indicateurs statistiques ont été utilisés pour évaluer la fonction de pédotransfert Arvalis. Tout d'abord, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE ; *équation 1*) permet de mesurer l'adéquation entre observations et prédictions.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N}} \quad (\text{équation 1})$$

Où Y est la valeur observée et $\hat{Y}$ la valeur prédite.

Le biais (*équation 2*) permet d'analyser plus finement l'erreur de prédiction.

$$\text{Biais} = 1/N \sum Y_i - 1/N \sum \hat{Y}_i \quad (\text{équation 2})$$

L'efficacité (EF ; *équation 3*) permet d'évaluer la performance de la fonction de pédotransfert (i.e., si elle explique bien la variabilité des observations disponibles).

$$EF = 1 - \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (\text{équation 3})$$

Où $\bar{Y}$ est la moyenne des Y observés.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Fonction de pédotransfert obtenue sur le jeu de données Arvalis

La fonction de pédotransfert (FPT) élaborée par Arvalis pour estimer la teneur en argile après décarbonatation à partir de la teneur en argile sans décarbonatation et de la teneur en calcaire total est décrite dans l'*équation 4*.

$$A_{AD} = A_{SD} \times (-0,0002 \times (CaCO_3)^2 + 0,0071 \times CaCO_3 + 0,9247)$$

où A_{AD} = argile après décarbonatation en %, A_{SD} = argile sans décarbonatation en % et $CaCO_3$ = calcaire total en %

Le modèle quadratique (voir § 2.1.2) a été ajusté avec les valeurs de pente de la relation $A_{AD}-A_{SD}$ selon des classes de teneur en $CaCO_3$. Deux modèles ont été testés, ajustés par classe de 10 % de $CaCO_3$ et par classe de 20 %. L'ajustement quadratique par classe de 10 % a été retenu (*Figure 3*).

3.2. Première validation sur le jeu de données AUREA

La validation sur le jeu de données AUREA montre un biais d'estimation de -0,43 %, une RMSE de 5,77 % et une efficacité de 0,79.

Ces trois indicateurs montrent que la fonction développée est globalement performante pour prédire les teneurs en argile après décarbonatation du jeu de données AUREA. Cependant, ce dernier ne comportant pas de métadonnées (localisation, nature de substrat, teneur en éléments grossiers), et se concentrant sur les horizons superficiels, la validité de cette fonction à un niveau national et pour tout type d'horizon restait à démontrer.

3.3. Validation sur le jeu de données DoneSol

La comparaison des teneurs prédites par rapport aux teneurs mesurées (*Figure 4*) montre que les valeurs sont peu dispersées autour de la droite $y = x$, ce que confirme la RMSE de 5,61 %. Le biais de -1,84 % indique que la FPT Arvalis est précise mais qu'elle a tendance à (légèrement) surestimer les valeurs d'argile après décarbonatation. L'efficacité de 0,77 indique que la fonction est performante.

Les trois indicateurs montrent une performance correcte de cette fonction de pédotransfert dans des contextes pédologiques variés et différentes profondeurs d'horizon.

La *Figure 4* montre que pour quelques situations avec des teneurs en argile très faible, la fonction peut prédire une teneur en argile après décarbonatation négative. Il s'agit de situation avec des teneurs en $CaCO_3$ au-dessus de 90 %, en dehors de la gamme de variation du jeu d'entraînement.

4. CONCLUSION

Les performances observées pour la fonction de pédotransfert élaborée par Arvalis, pour un grand nombre de sols développés sur des calcaires dans différents contextes en France métropolitaine, nous encourage à recommander son utilisation pour le calcul de la teneur en argile après décarbonatation, pour les sols ayant des teneurs en $CaCO_3$ entre 5 et 90 %, correspondant à la gamme de variation du jeu d'entraînement. Il conviendra cependant de rester vigilant selon la précision nécessaire aux futures applications, cette fonction restant moins précise qu'une analyse en laboratoire. De même, la fonction n'est pas à utiliser sur des sols formés sur calcaires dolomitiques, plus rares en France en grandes cultures et non représentés dans le jeu d'entraînement.

Excepté dans certains modèles de minéralisation de la matière organique, les sols carbonatés sont souvent exclus des travaux de modélisation de propriétés agronomiques et

Figure 3 : Rapport du pourcentage d'argile après décarbonatation sur le pourcentage d'argile sans décarbonatation (%AAD/%ASD) par classe de CaCO_3 et courbe d'ajustement (jeu d'entraînement Arvalis)

Figure 3: Ratio of the percentage of clay after carbonate dissolution to the percentage of clay without carbonate dissolution (%AAD/%ASD) and its adjustment curve as a function of CaCO_3 class (Arvalis training database)

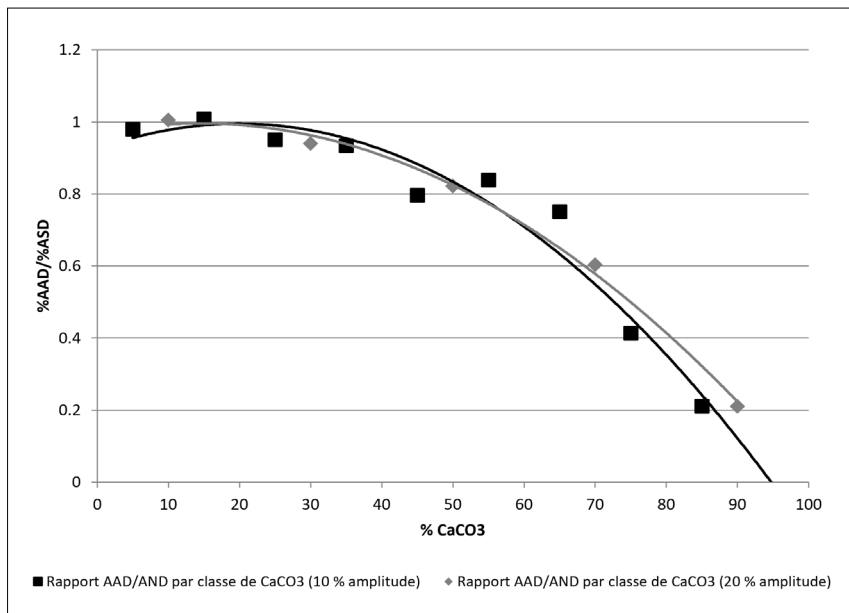
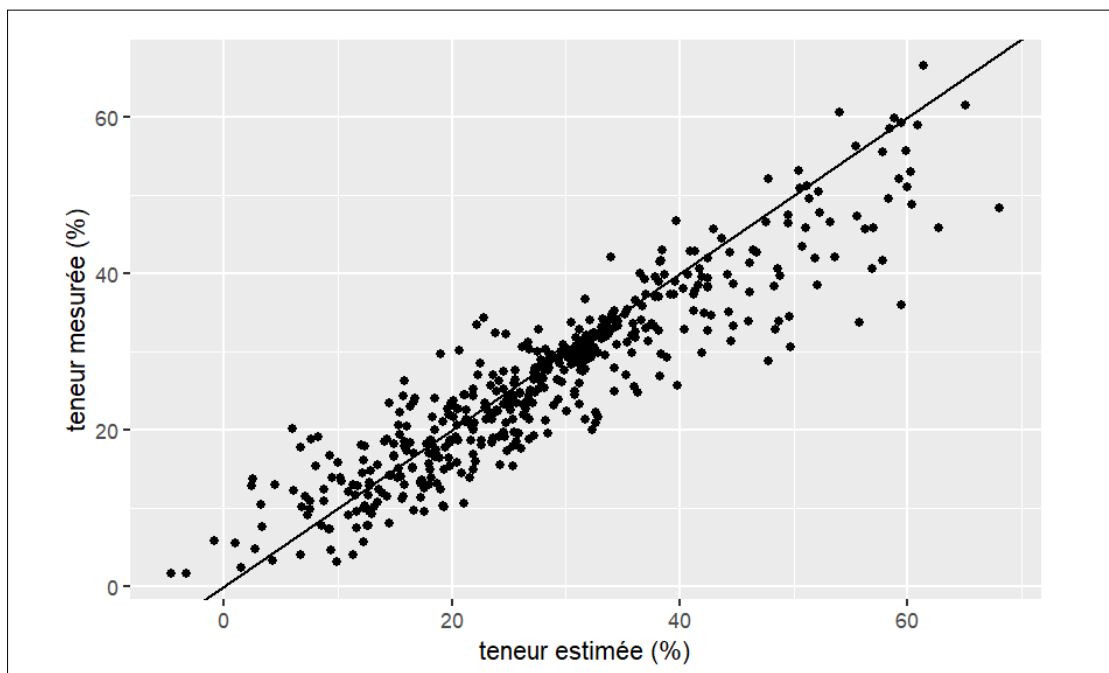


Figure 4 : Comparaison des teneurs prédites par rapport aux teneurs mesurées d'argile après décarbonatation pour les 472 horizons du jeu de validation DoneSol

Figure 4: Scatter plot of measured vs predicted content of clay after carbonate dissolution for the 472 selected soil horizons of the DoneSol validation set



de cycles biogéochimiques (notamment cycle de l'azote et du phosphore), les références étant plus rares. D'autres paramètres chimiques (potassium échangeable), ou fonctions biologiques (transformation du carbone, recyclage des éléments minéraux) pourraient dépendre plus directement des argiles après décarbonatation. L'utilisation de cette fonction pour estimer la part d'argiles granulométriques non calcaires peut donc ouvrir la voie à une meilleure prise en compte des sols carbonatés dans de futures études agronomiques, et être mobilisée dans l'estimation de fonctions ou propriétés du sol. C'est par ailleurs déjà le cas de plusieurs modèles et/ou outils d'aide à la décision sol-dépendant qui mobilise cette variable en donnée d'entrée pour fournir un conseil sur la minéralisation de l'azote ou du carbone organique.

Pour approfondir, une nouvelle étude partant des mêmes jeux de données, mais prenant en compte la nature du substrat calcaire, le type de sol et la teneur en éléments grossiers de l'horizon, pourrait permettre d'améliorer encore le niveau de précision. Il faudra toutefois veiller à trouver le meilleur compromis entre précision, représentativité et opérationnalité pour les futurs utilisateurs.

REMERCIEMENTS

Nous remercions les équipes d'Arvalis, de Terres Inovia, du GEVES, de Syngenta, de Maisadour et d'Euralis qui ont participé à l'acquisition des données ayant permis la constitution du jeu d'entraînement. Nous remercions tout particulièrement Auréa Agrosociences pour la communication d'un jeu de données indépendant. Merci également à Thibaud Deschamps pour sa participation au processus de validation. Ce travail n'a pu être réalisé que grâce aux partenaires du Groupement d'intérêt scientifique sur les sols qui capitalisent leurs analyses dans la base de données DoneSol depuis plus de 30 ans ce dont nous les remercions.

Une partie du processus de validation a été effectuée dans le cadre du projet CASDAR IDTypTerres, dont l'une des actions consistait à définir des méthodes harmonisées d'estimation de paramètres agronomiques des sols, comme la teneur en argile minéralogique. Ce projet a reçu le soutien financier du compte d'affectation spéciale développement agricole et rural.

BIBLIOGRAPHIE

- Baize D. (2000). Guide des analyses en pédologie, 2^e édition revue et augmentée. Paris : Editions Quæ, 257 p.
- Beaudoin N., Lecharpentier P., Ripoche-Wachter D., Strullu L., Mary B., Léonard J., Launay M., Justes É. (éds). (2023). STICS soil-crop model. Conceptual framework, equations and uses. Versailles : Éditions Quæ, 516 p.
- Beaudoin N., Nicoulaud B., Houlès V. (2007). Établissement et validation de classes de pédotransfert pour un modèle de culture à l'échelle parcellaire : application au modèle STICS. *In* : Agriculture de précision. Versailles : Éditions Quæ, (Update Sciences and Technologies). ISBN 978-2-7592-0019-1. <https://hal.inrae.fr/hal-02819387v1>
- Grolleau E., Bargeot L., Chafchafi A., Hardy R., Doux J., Beaudou A., Le Martret H., Lacassin J.-C., Fort J.-L., Falipou P., Arrouays A. (2004). Le système d'information national sur les sols : DONESOL et les outils associés. *Étude et Gestion des Sols*, 11 (3), 255-269. (hal-02681867)
- Francis R.E., Aguilar R. (1995). Calcium carbonate effects on soil textural class in semiarid wildland soils. *Arid Land Research and Management*, 9 (2), 155-165. <https://doi.org/10.1080/15324989509385882>
- Lucke B., Schmidt U. (2015). Grain size analysis of calcareous soils and sediments: inter-method comparison with and without calcium carbonate removal. *In* : Soils and sediments as archives of landscape change: Geoarchaeology and landscape change in the subtropics and tropics. Lucke B., Bäuml R., Schmidt M. (editors). Selbstverlag der Fränkischen Geographischen Gesellschaft in Kommission bei Palm & Enke, Erlangen, 83-98.
- Mary B., Beaudoin N., Justes É., Machet J.M. (1999). Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *European Journal of Soil Science*, 50 (4), 549-566. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1999.00264.x>

