

## Technique de prélèvement et d'analyse pour l'étude de la porosité du sol par imagerie 3D en tomographie d'absorption des rayons X

Bénard Yannick<sup>1</sup>, Le Couteulx Alexis

Cet article présente une technique de prélèvement de colonnes de sol couplée à la tomographie d'absorption des rayons X pour analyser la structure du sol. Cette dernière est une alternative aux méthodes en 2D couramment utilisées telles que l'analyse d'images obtenues en 2D, la description d'images obtenues par microscopie en transmission ou en réflexion. La technique repose sur le prélèvement de colonnes de sol par enfouissement de tubes PVC. Afin d'assurer la qualité des acquisitions lors du passage de ces colonnes dans un tomographe aux rayons X (plateforme CIRE, Nouzilly), leur surface est consolidée à l'aide de paraffine. Ce type de prélèvement couplé avec la tomographie RX permet d'imager en 3D des colonnes de sol relativement meuble ce qui est notamment le cas après le passage d'outils de travail du sol. L'analyse des images issues des scans RX des colonnes a été conduite à l'aide du logiciel libre Fiji.

Un exemple d'utilisation est présenté portant sur l'étude de la porosité d'un sol après le passage d'une charrue et d'une herse rotative plus semoir. Les résultats acquis sont prometteurs et cette technique est maintenant couramment utilisée à l'UMR SAS à Rennes.

**Mots clés :** tomographie aux rayons X, structure du sol, analyse d'images, colonne de sol

### Introduction

La structure des sols est l'assemblage spatial de ses éléments constitutifs : des minéraux, de la matière organique, des agrégats ; la porosité fait partie intégrante de la structure d'un sol. L'étude de la structure des sols est particulièrement importante dans le domaine de la pédogenèse (origine et évolution des sols), dans celui de l'utilisation des sols (capacité à transférer, retenir et filtrer l'eau et les substances polluantes, importance dans la germination et le développement des plantes, etc.) et de par sa relation avec la phase vivante (micro- ou macroorganismes, etc.).

Il existe historiquement à l'UMR SAS (Inra, Rennes) deux approches pour étudier la structure du sol. Elles sont basées sur l'imprégnation d'un bloc de sol avec de la résine de polyester et la réalisation de différentes sections de sol imprégnées, une fois la résine polymérisée, pour étudier la structure. Ces techniques sont :

- la technique « grande lame mince » appelée mammoth et mise au point à l'UMR, consiste à découper puis à amincir jusqu'à une épaisseur de 30  $\mu\text{m}$  un bloc de sol (Bénard, 1996). Les lames obtenues sont ensuite analysées au microscope sous lumière polarisante afin d'observer les minéraux, leur orientation et organisation ainsi que la porosité ;
- la technique « lame épaisse » consiste à découper le bloc en une lame d'environ 4 mm d'épaisseur. Une image de la lame est acquise sous lampe UV avec une caméra. Cette image est ensuite analysée afin de quantifier principalement la porosité.

En complément de ces techniques d'analyse de la composition et de la porosité du sol, la tomographie RX a commencé à être utilisée depuis près de trois décennies pour l'étude de la porosité (Grever et al., 1989). Cette technique est basée sur la mesure de

---

<sup>1</sup> INRA, UMR Sol Agro et hydrosystème spatialisé, 65 rue de Saint-Brieuc, CS 84215, 35042 Rennes cedex, France  
[yannick.benard@inra.fr](mailto:yannick.benard@inra.fr)

l'atténuation des rayons X qui traversent un objet, comme c'est le cas pour une radiographie médicale. La réalisation de radiographies sous des angles d'incidences multiples et l'utilisation d'une méthode de rétroprojection permettent de reconstruire la structure interne d'un objet. À chaque volume élémentaire de l'image 3D, i.e. voxel, est associé un coefficient d'atténuation qui est proportionnel à la densité apparente moyenne, au numéro atomique moyen dans le volume élémentaire et à l'énergie du faisceau incident. La tomographie RX permet donc d'établir une image tridimensionnelle des variations de densité dans l'échantillon analysé sans destruction. Ces images sont ensuite analysées afin de quantifier divers indicateurs tels que la porosité ou la continuité des réseaux de pores. L'originalité du travail présenté ici est la technique de prélèvement du sol et suivi de son analyse pour l'étude de la porosité du sol par imagerie 3D en tomographie d'absorption des rayons X.

L'objectif de cet article est :

- de présenter une méthode de prélèvement et de préparation d'échantillons destinés à être scannés au tomographe RX;
- de décrire le passage des échantillons dans le tomographe;
- de présenter l'analyse des images acquises par le tomographe.

Nous avons choisi comme exemple, l'analyse de la structure/porosité d'un sol à différentes étapes de son travail pour mettre en évidence l'impact de certains d'outils de travail du sol.

## Description du matériel et de la méthode

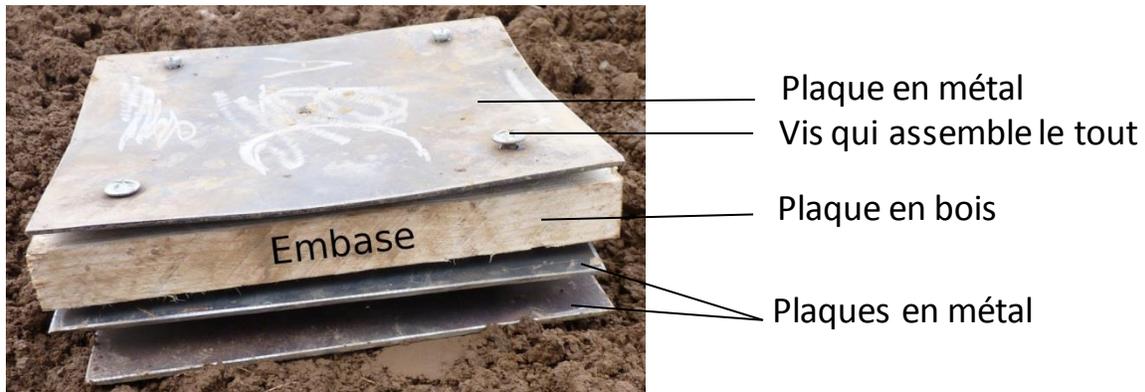
### Prélèvement des échantillons

Le matériel pour réaliser le prélèvement des colonnes de sol consiste en :

- 1 Opinel N°12 ;
- 1 maillet anti-rebonds pour absorber les chocs et éviter d'endommager le cylindre ;
- 1 cale en bois d'au moins 5 cm d'épaisseur ;
- 1 cylindre en PVC de type gouttière. Dans le cadre de cette étude nous avons utilisé un cylindre de Ø 14 cm et de 30 cm de longueur, de 3 mm d'épaisseur, biseauté à l'extérieur pour faciliter son enfoncement
- 1 plaque rigide en métal pour faire un support, épaisseur 2 mm ;
- 1 pelle ;
- du film étirable.

Avec ce matériel est fabriquée une embase qui est constituée de trois plaques en métal, d'une cale en bois, de quatre entretoises disposées aux quatre coins de l'embase (**Figure 1**). Les deux premières plaques de métal assurent la résistance de l'embase, la cale de bois permet de limiter les vibrations lors de l'enfoncement du cylindre. La dernière plaque, évidée selon

la forme du cylindre, permet de maintenir l'embase en place lors des chocs.



*Figure 1. Embase utilisée pour enfoncer les cylindres dans le sol (photo : Le Coulteux A.)*

Les différentes étapes du prélèvement sont :

1. sélectionner une zone de prélèvement correspondant aux objectifs de l'étude puis placer à l'œil le cylindre à la verticale et mettre en place l'embase
2. enfoncer le cylindre le plus verticalement possible à l'aide du maillet et de l'embase d'écrit ci-dessus, jusqu'à la profondeur désirée, par petite étape afin de limiter l'impact sur la structure du sol. Lorsque le cylindre est enfoncé en biais, on peut observer la présence de vide entre le sol et le cylindre ce qui engendre une erreur lors des mesures. L'enfoncement d'un cylindre peut être gêné voire empêché par la présence d'obstacles (cailloux, débris végétaux importants, etc.) ; le technicien doit choisir soit de le garder soit d'en prélever un nouveau sur une nouvelle zone ;
3. décaisser l'échantillon en dégageant la terre autour du cylindre avec l'Opinel et la pelle, couper le sol en dessous de la colonne avec l'Opinel puis extraire l'échantillon délicatement pour éviter de changer la géométrie de l'échantillon (**Figure 2**) ;
4. raser l'excédent de sol au fond de la colonne puis mettre une plaque rigide sous le cylindre pour éviter que celui-ci

se vide. Maintenir cette plaque à l'aide d'un ruban adhésif. Emballer précautionneusement le cylindre avec un film étirable afin de maintenir en place le sol dans les conditions d'extraction.



Figure 2. Exemple d'une colonne de sol enfoncée après reprise du travail superficiel (photo : Le Couteux A.)

### Préparation des échantillons et passage au tomographe

Afin que les rayons X traversent la même épaisseur de sol, les colonnes sont imagées à l'horizontale dans un tomographe RX. Les échantillons ont été scellés avec de la paraffine pour garder le sol en place lors de leur passage au tomographe. Cette technique, initialement utilisée par Grevers et al. (1989), consiste à verser lentement de la paraffine liquide mais proche de son point de fusion de 55 °C sur la surface du sol. La solidification de la paraffine permet de consolider le sol sans modifier sa structure ni modifier/influencer les données des images. Un morceau de métal a aussi été fixé sur la colonne de sol ce qui permet d'établir un repère sur les images utilisées lorsque les colonnes sont scannées à plusieurs reprises, pour un recalage géométrique.

Les colonnes de sol ont été imagées à la plateforme CIRE (Nouzilly, France) avec un scanner médical Siemens Somatom Definition AS+. Après plusieurs tests, le scanner a été réglé à 140 kV et 500 mA afin d'obtenir la meilleure résolution et de limiter l'impact de l'absorption radiale des RX. Les images obtenues ont une résolution de 0,2975 mm par pixel et la distance (verticale) entre les coupes horizontales (*i.e* le pitch) est de 0,1 mm. Lors de cette étape d'acquisition des images, il faut veiller à ce que l'axe des colonnes soit confondu avec l'axe d'avancement du tapis afin d'obtenir des coupes les plus circulaires possibles. Une acquisition préliminaire et rapide permet de s'assurer de ce critère ainsi que de définir un Champ de Vue (CdV), qui correspond à la zone imagée par l'appareil.

### Analyse des images

- Caractéristiques des images (nombre, format et valeur des pixels)

Pour chaque cylindre, un *stack* ou « piles ou empilements » est récupéré. Ce stack, contenant plusieurs centaines d'images au format DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine), regroupe les sections reconstruites en 2D des coupes

du cylindre scanné. Le format DICOM est un format normé qui permet d'accéder à de nombreuses métadonnées, notamment : la résolution d'un pixel, le *pitch*, la date d'acquisition, etc. Les images sont des carrés de 512 x 512 pixels. Ainsi la résolution d'un pixel dépend du champ de vue (CdV), qui représente les dimensions de la zone d'acquisition des images et défini lors des essais de cadrage. L'atténuation de chaque voxel est exprimée en unité Hounsfield (Hs) allant de -1024 pour l'air à plus de 3000 pour les matériaux denses tels que les cailloux ou les métaux. Pour ce tomographe, la valeur 0 Hs sert de point de référence pour calibrer le tomographe et correspond à l'eau.

- Traitement à l'aide d'un logiciel d'analyse d'image (Fiji)

Les sections sont traitées avec le logiciel d'analyse d'images Fiji (<http://fiji.sc/Fiji>) qui est basé sur le logiciel ImageJ (Schneider et al., 2012). C'est un logiciel libre qui permet de traiter automatiquement les stacks et d'automatiser les procédures d'analyse en créant des scripts/macros.

- Prétraitement initial des *stacks*

Les *stacks* sont initialement traités pour éliminer le cylindre PVC. Un volume d'intérêt (VOI) cylindrique est défini à l'aide de deux cercles : un au sommet du cylindre et l'autre à sa base. Puis sur chaque image 2D une valeur aberrante (e.g. 10000 Hs, permise par le codage sous-jacent des images) est allouée aux pixels à l'extérieur de ce cylindre. En fonction de l'analyse que nous souhaitons mettre en place, un filtrage peut être utilisé avec, par exemple, dans le cadre de l'analyse de la bioturbation des vers de terre, un filtre médian 3D qui permet de diminuer le bruit sur les images tout en préservant les bords des pores.

- Choix d'un seuil de binarisation des images et analyses complémentaires

Les images 2D ainsi acquises représentent un grand jeu de données qu'il s'agit d'analyser. Afin de les traiter, nous commençons par binariser les images. Il s'agit de définir un seuil en dessous duquel les pixels sont considérés comme des vides et au-dessus duquel ils sont considérés comme des solides. Ceci va dépendre directement de la résolution des images et signifie que la proportion de vide est intimement liée à ce seuil. Plusieurs méthodes de seuillage existent : 1°) la définition d'un seuil par l'utilisateur mais cette technique est subjective, 2°) l'utilisation d'un algorithme de seuillage global qui se base sur l'histogramme d'une image ou du *stack* pour définir un seuil. Les meilleurs résultats ont été obtenus lorsque les algorithmes se basaient sur l'histogramme du *stack* et non d'une couche seule (**Figure 3**). Nous avons utilisé cette méthode. 3°) Les algorithmes de seuillage locaux qui se basent sur la variabilité locale des valeurs des pixels. Ces derniers sont plus compliqués à mettre en œuvre mais ont montré de bons résultats.

Une fois les images binarisées, nous avons choisi d'utiliser le plugin BoneJ (<http://bonej.org/>) disponible dans *Fiji* pour faire des mesures de morphologie et topologie de la porosité. Nous avons notamment calculé sur la phase porale : la connectivité, un indice de forme (SMI) et un indice d'anisotropie<sup>2</sup>. La porosité en fonction de la profondeur a aussi été analysée en faisant

---

2 . Cf <http://bonej.org/>

le rapport du nombre de pixels « vides » sur le nombre de pixels total de chaque section.

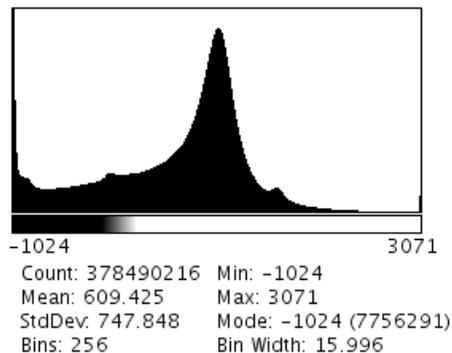


Figure 3. Exemple d'histogramme des valeurs d'un jeu d'images.

## Un exemple d'utilisation de la technique

### Site expérimental

La Station expérimentale de Kerguéhennec (latitude 47°52'48"N longitude. 02°46'23"O) se situe au nord du département du Morbihan (56) (Figure 4). Cette région bénéficie d'un climat tempéré. Elle est gérée par les chambres d'Agriculture de Bretagne et possède plusieurs dispositifs expérimentaux. L'un d'entre eux a été mis en place en 2000 et permet de mesurer les flux de ruissellement de différents systèmes de culture. Sur ce dispositif, nous avons prélevé des colonnes de sol avant labour (AvL) et après labour puis reprise (ApRL), c'est-à-dire après le passage d'une charrue, d'une herse rotative et d'un semoir.



Figure 4. Localisation du domaine expérimental de Kerguéhennec dans la région Bretagne.

Le sol repose sur un substrat géologique composé de schistes briovériens métamorphisés et de micaschistes. Sur la parcelle, la profondeur moyenne constatée est de 70 cm, variant entre 45 et 100 cm (Viaud, 2011). Le sol est peu caillouteux et non compacté ce qui facilite le prélèvement des colonnes.

À titre d'exemple d'application de la tomographie RX en 3D, la Figure 5 montre l'évolution de la porosité en fonction de la profondeur avant un labour (AvL) et après un labour suivi d'une reprise et d'un semis (ApRL). Avant labour la porosité diminue lentement avec la profondeur pour atteindre une valeur proche de 20 % à 20 cm. On observe par ailleurs au niveau de la

surface de la colonne, entre 0 et 2 cm, une valeur minimale qui représente une diminution forte de la porosité. Ce processus correspond à la formation d'une croûte de battance.

Pour la courbe ApRL, on observe un seuil à environ 5 cm de profondeur à partir duquel la porosité diminue fortement passant d'environ 30 % à 15 %. Nous faisons l'hypothèse que cette profondeur correspond à l'impact du rouleau Packer couplé à la herse rotative lors de la reprise de labour.

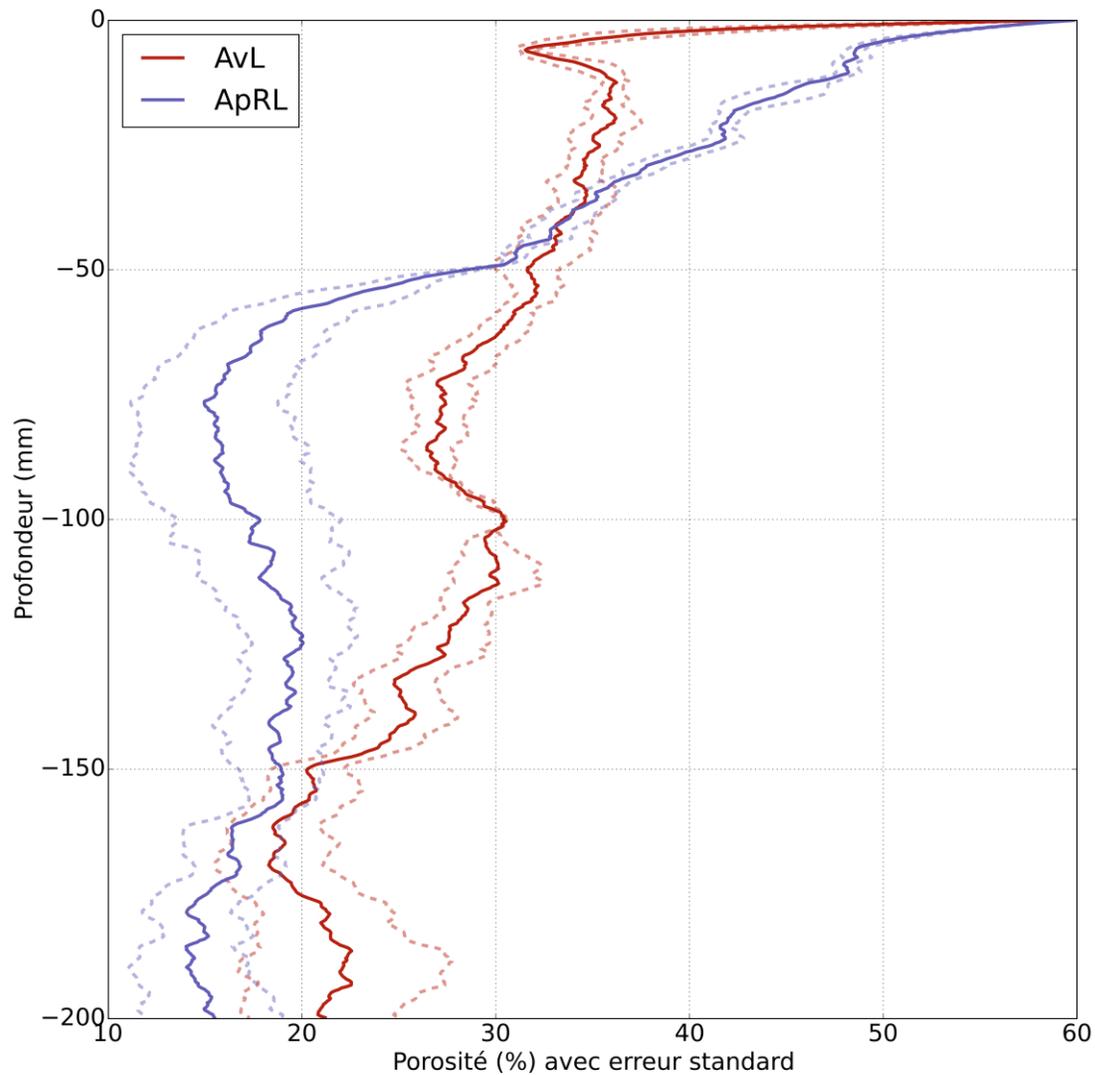


Figure 5. Évolution de la porosité en fonction de la profondeur avant labour (AvL) et après la reprise de labour (ApRL) d'après analyse des images de tomographie RX en 3D.

## Conclusion

Nous avons présenté dans cet article, l'utilisation de la tomographie aux rayons X pour analyser la porosité du sol. Nous

avons abordé le passage de ces colonnes dans un tomographe RX et l'analyse des images acquises. Cette technique permet de quantifier la porosité accessible à la résolution du scanner X quelle que soit la forme de celle-ci. Dans le cadre de l'exemple présenté, l'utilisation de la tomographie a permis de montrer l'effet de tassement du combiné de semis. Il faut à présent relier ce tassement à un impact sur des propriétés physiques du sol comme la conductivité hydraulique. En parallèle, d'autres indicateurs ont été utilisés pour quantifier la forme des porosités mais il reste à développer un référentiel pour les interpréter.

## Remerciements

Nous remercions la patience et la disponibilité de Guenola Peres, experte en *Lumbricus Rubellus Castanoïdes*, *Allolobophora Chlorotica*, *Chlorotica Typica*, et également pédagogue hors pair ; Denis Piron, discret, efficace, et pas avare de conseils. Pour finir, je remercie toutes les espèces de vers de terre qui grâce à elles, pendant les analyses d'image des échantillons de sol, m'ont permis de voyager et d'imaginer un monde souterrain...

## Références

- Bénard Y (1996) Les techniques de fabrication des lames minces du sol. *Cahier des Techniques de l'INRA*, **37** : 29-42.
- Grevers M, Jong E, Arnaud R (1989) The Characterization of Soil Macroporosity with Ct Scanning. *Can J Soil Sci.* **69** : 629-637.
- Schneider C, Wayne R, Kevin E (2012) NIH Image to ImageJ : 25 Years of Image Analysis. *Nat Meth* **9** : 671-675 .
- Viaud V, Angers DA, Parnaudeau V, Morvan T, Menasseri-Aubry SM (2011) Response of organic matter to reduced tillage and animal manure in a temperate loamy soil. *Soil Use Manag.* **27** : 84-93.