

Mesurer la capacité de rétention en eau d'un sol par centrifugation : une méthode fiable, facile et rapide à mettre en œuvre dans un laboratoire

Sandrine Revaillet, Célia Pouget, Gaël Alvarez, Sébastien Fontaine¹



Sandrine Revaillet. J'ai commencé ma carrière en tant que technicienne d'expérimentation sur les géniteurs de maïs à Limagrain Chappes (63) en 1995, et intégré l'INRA en 1996 au GEVES de la Minière (78) en DHS Maïs. Puis j'ai rejoint l'unité d'Agronomie de Clermont-Ferrand (future unité UREP) en 1999 pour suivre des essais de blé en conditions contrôlées et analyses chimiques associées, ensuite à partir de 2004 sur des activités mixtes de biométrie et laboratoire sur la prairie et le sol, puis complètement laboratoire depuis 2015. Je gère l'activité analytique du laboratoire commun UREP, sous la responsabilité de Laurence Andanson (Vet Agro Sup-50%) et mets en œuvre les techniques d'analyses pour déterminer les paramètres utiles à l'étude des cycles carbone et azote des projets de recherche de l'UREP.

Les principaux moyens techniques que j'utilise et les paramètres déterminés sont :

- un chromatographe en phase gazeuse –Perkin Clarus 480 (CO₂, O₂, N₂O, CH₄, N₂)
- un spectromètre laser à amplification résonante d'absorption –Picarro G2101 (rapport isotopique du $\delta^{13}C$ du CO₂, mesures de gaz)
- incubations, extractions et mesures biométriques sur le sol : azote minéral et biomasse microbienne, pH, humidité du sol, humidité à potentiel matriciel du sol.

Mon travail consiste essentiellement à l'encadrement technique de personnel non-titulaire (masters, thèses, post-doc..). Je suis responsable des achats du laboratoire et gère les plannings d'utilisation du matériel. Les activités transversales de qualité et prévention viennent compléter mon métier, et me permettent d'avoir des missions qui ont une portée plus globale, tout en améliorant le collectif.



Célia Pouget. À la suite de mon Master en Ecologie à Rennes, j'ai intégré l'INRAE de Clermont-Ferrand pour ma thèse qui porte sur le rôle de la variabilité environnementale dans la dynamique des communautés végétales dans les prairies de moyenne montagne. Mes travaux de thèse s'intéressent particulièrement à la dynamique spatio-temporelle des communautés aussi bien d'un point taxonomique que fonctionnel. Au cours de ces différents travaux, j'ai développé de fortes compétences en statistiques. J'ai également acquis de nouvelles compétences dans le domaine de l'écologie des communautés et proposé des approches originales pour traiter des problématiques en écologie.

¹ INRAE Site de Crouël, UMR 0874 UREP, 5 Chemin de Beaulieu, 63039 Clermont-Ferrand cedex 2, France

✉ sandrine.revaillet@inrae.fr ☎ +33 1 (0)4 43 76 16 19



Gaël Alvarez. Agronome de formation, je suis ingénieur de recherche à VetAgro Sup depuis 1997 sur le campus agronomique de Clermont-Ferrand. Depuis 2012 je mène mes recherches dans l'unité INRA Ecosystème prairial avec laquelle nous avons créé en 2016 l'Unité Mixte de Recherche Ecosystème Prairial (INRAE-VetAgro Sup). Mes intérêts scientifiques ont toujours été ciblés sur la compréhension des cycles biogéochimiques de l'azote (N) et du carbone (C) dans les agro-écosystèmes. Considérant les réserves organiques du sol comme un élément constitutif essentiel au fonctionnement des écosystèmes, les processus de décomposition microbienne des matières organiques et de stockage de C et N dans le sol ont toujours été centraux dans les questions que j'aborde. Exerçant à la fois une activité de recherche et d'enseignement auprès des élèves ingénieurs de VetAgro Sup, les enjeux de mon travail sont naturellement à la fois agronomiques (fertilité des systèmes sol-plantes, réserves de nutriments pour les végétaux et les organismes du sol, rétention en eau) et environnementaux (puits de carbone atmosphérique, qualité des eaux). Le contexte de changement global renforce assurément les perspectives de mes activités vers la construction de systèmes agricoles durables. Dans ce cadre je privilégie une étude systémique des transferts de matière entre organismes (relations trophiques plantes-microbes) et des interactions entre métabolismes clé, en cherchant à connecter biogéochimie, agronomie, écologie et plus récemment enzymologie.



Sébastien FONTAINE, Directeur de Recherche. Après une thèse en écologie (1999-2002) à l'Ecole Normale Supérieure, j'ai été recruté en 2003 à l'Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial (UREP) à l'INRAE de Clermont Ferrand. L'objectif principal de mes recherches est la compréhension des cycles C/N/P des écosystèmes terrestres dans un contexte de changements globaux et du développement d'une agriculture durable (e.g. création de nouveaux couverts). Les écosystèmes étudiés sont principalement les prairies permanentes mais aussi des prairies temporaires, des cultures et des forêts afin de comprendre les différences de fonctionnement. La plupart des études ont été effectuées en climat tempéré et plus ponctuellement en milieu tropical (Amazonie) et arctique (Permafrost). Au travers de ces recherches je vis d'excellentes aventures scientifiques et humaines, notamment avec mes collègues les plus proches dont certains sont les co-auteurs de cet article.

Résumé :

La capacité de rétention en eau des sols est utilisée pour des applications pratiques en agriculture (irrigation), mais aussi dans la recherche (ex. modélisation du transport de l'eau et de ses solutés, sécheresse). Elle dépend de la relation entre la teneur en eau et la pression matricielle du sol (ou pF) qui peut être mesurée sur le terrain ou au laboratoire. Des courbes sont réalisées avec des points spécifiques, tel le point de flétrissement (pF 4,2). La méthode de référence au laboratoire est basée sur l'usage de la presse à membrane. La méthode décrite dans cet

article est une miniaturisation d'une méthode alternative par centrifugation avec du matériel présent dans la majorité des laboratoires. Nous fournissons les calculs permettant d'adapter la méthode selon le type de centrifugeuses et la hauteur de colonne de sols à étudier. Nous avons testé cette méthode alternative sur un panel de 25 sols ayant des textures contrastées et en se focalisant sur un point spécifique clé de la rétention en eau des sols (pF 4,2). Les résultats produits par la méthode de centrifugation miniaturisée sont linéairement corrélés avec ceux de la méthode de référence. Le modèle linéaire explique 94 % de la variabilité pour une gamme de sols aux capacités de rétention en eau au point de flétrissement contrastées [1,34 % — 64,15 %]. Ces résultats suggèrent que la méthode de détermination de la caractéristique de rétention en eau des sols proposée dans cette étude est fiable. Nous avons par ailleurs estimé que le temps optimum de centrifugation est de 10 minutes. Le périmètre d'utilisation de cette méthode est discuté.

Mots clés : teneur en eau du sol, pression matricielle, presse à membrane, point de flétrissement.

Abstract.

The soil water retention capacity is used for practical applications in agriculture (irrigation), but also in research (e.g., modeling of water flow and solutes transport drought). It depends on the relationship between water content and the soil matrix pressure (or pF) which can be measured in the field or at the laboratory. Curves are established with specific points, such as the permanent wilting point (pF 4.2). The laboratory reference method is based on the use of the pressure plate method. The method described in this article is a miniaturization of an alternative method by centrifugation with equipment present in most of laboratories. We supply the calculations allowing to adapt the method according to the type of centrifuge and the height of studied soil column. We tested this alternative method on a panel of 25 soils with contrasting textures and focusing on a specific key point of soil water retention (pF 4.2). The results produced by the miniaturized centrifugation method are linearly correlated with those of the reference method. The linear model explains 94% of the variability for a range of soils with contrasting water retention capacities at the point of wilting [1.34% - 64.15%]. These results suggest that the method for determining the water retention characteristic of soils proposed by this study is reliable. We have also estimated that the optimum centrifugation time is 10 minutes. The scope of use of this method is discussed.

Key words: soil water content, matrix pressure, membrane press, wilting point.

Introduction

L'Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial est devenue UMR (Unité Mixte de Recherche) avec VetAgro Sup depuis 2017. L'unité conduit notamment des travaux sur les effets de la sécheresse sur le fonctionnement des prairies dans un contexte de changement global. Les trois thématiques de l'unité sont : biodiversité et étude des communautés, cycles CN, modélisation. Ce sont sur les deux premiers thèmes que va porter l'étude du comportement de l'eau dans le sol, qui sera utile pour caractériser la disponibilité de l'eau dans les écosystèmes et gérer l'irrigation des essais à différentes échelles allant du plein champ, aux mésocosmes (en pots) et aux microcosmes (incubations de laboratoire).

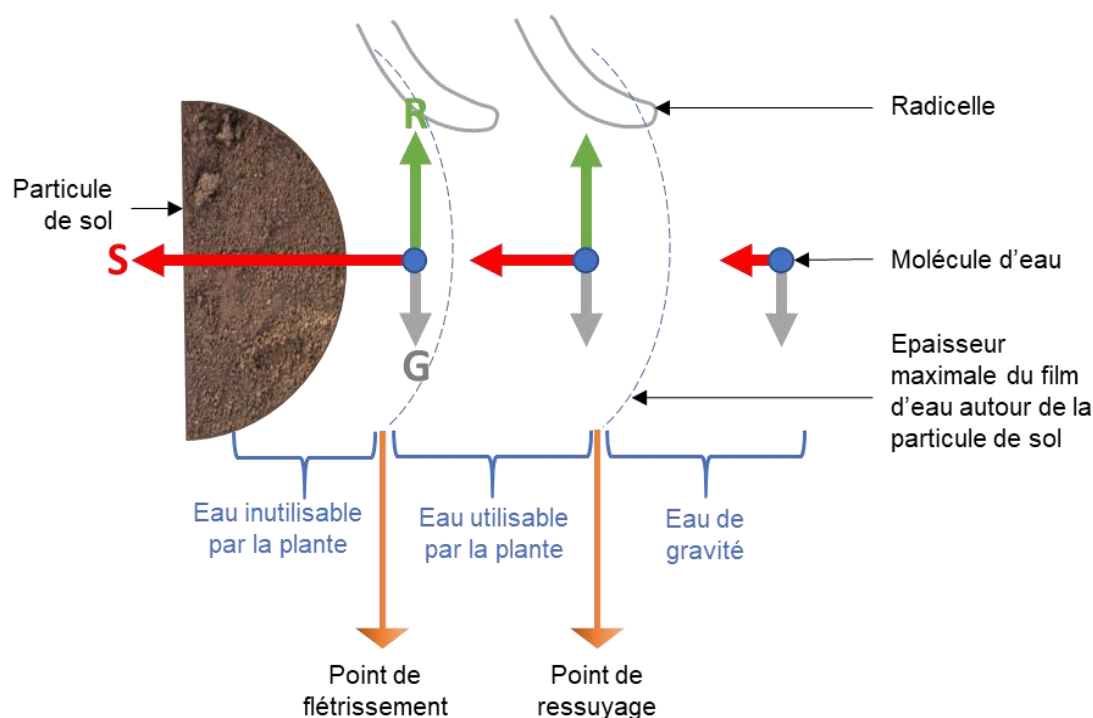


Figure 1 : Les trois forces s'exerçant sur l'eau du sol (Soltner, 1986) : la gravité (G), la succion par les racines (R) et par le sol (S).

Le sol est alimenté en eau par les précipitations. L'eau dite « de gravité » va s'écouler rapidement. Au fil du temps, l'écoulement se ralentit, le sol atteint un équilibre qu'on appelle « point de ressuyage » ou « capacité au champ ». Puis, le sol continue de sécher, l'intensité des forces de succion du sol augmente (notées S – Figure 1) : la plante devra développer un travail de plus en plus important pour s'alimenter en eau, jusqu'à une limite, appelée « point de flétrissement », au-delà de laquelle la plante n'est plus capable d'extraire l'eau. La plante flétrit et meurt si la situation perdure. La différence entre les humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement est nommée la quantité d'eau disponible nommée Réserve Utile (RU) du sol. La RU est très variable d'un sol à l'autre car la taille et la nature des particules du sol, incluant les minéraux et la matière organique, vont faire varier les forces de succion exercées sur l'eau qui sera donc plus ou moins retenue en quantité.

L'état de liaison de l'eau sur les particules du sol ou la pression qu'il faudrait appliquer pour extraire cette eau (Riou, 1997) correspond au potentiel de pression matriciel. Ce potentiel de pression est exprimé en unité de pression (MPa), de hauteur d'eau (m) ou encore d'énergie ($J\ kg^{-1}$). La capacité de rétention en eau des sols est définie par la quantité d'eau retenue par le sol pour un potentiel de pression matricielle donné. Les caractéristiques de rétention en eau d'un sol sont obtenues par l'établissement de la courbe reliant la teneur en eau du sol à la pression matricielle (Figure 2). Pour simplifier, un physicien anglais (Schofield, 1935) a proposé d'exprimer le potentiel matriciel de l'eau du sol par une fonction logarithmique (par analogie de la fonction pH en chimie - Potentiel Hydrogène) de la hauteur d'eau en cm, fonction appelée pF (Potentiel de Force) – voir Figure 2.

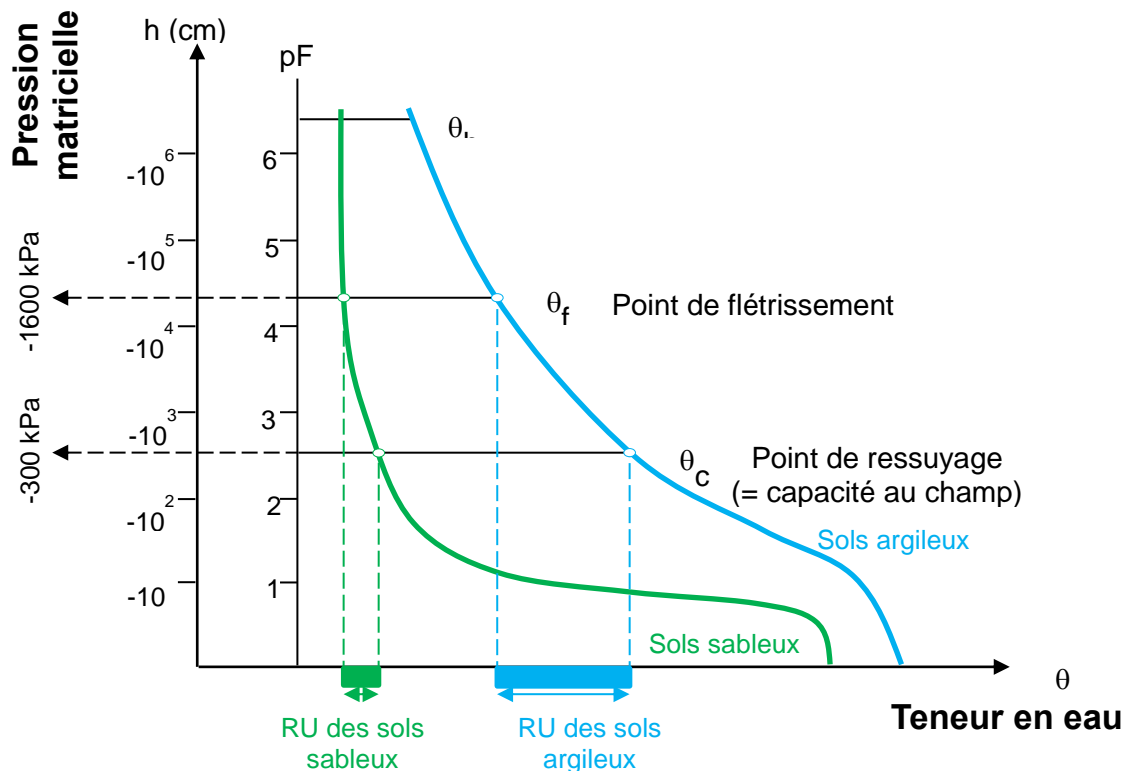


Figure 2 : Caractéristiques de rétention en eau d'un sol sableux et d'un sol argileux. La pression matricielle sur l'axe des ordonnées peut être exprimée en Pascals, en hauteur d'eau (h) ou en pF avec $pF = \log_{10} h$. L'axe des abscisses représente la teneur en eau des sols exprimées en % de masse sèche de sol. RU : Réserve Utile, pF : Potentiel de Force.

La forme et la position de la courbe dans le repère sont contrôlées par les propriétés physico-chimiques du sol (texture, densité, teneur en matière organique (MO), hystérésis due au séchage/humification). Les caractéristiques de rétention en eau du sol apparaissent dans la documentation scientifique sous des noms différents : courbe de libération d'eau du sol, courbe de rétention d'eau du sol, courbe pF , courbe de pression à saturation ("NF ISO 11274 Qualité du sol : Détermination de la caractéristique de la rétention en eau, méthodes de laboratoire" 1998).

Les mesures des caractéristiques de rétention en eau des sols peuvent se mesurer sur le terrain ou au laboratoire. La plus ancienne méthode de laboratoire citée en bibliographie est la centrifugation (Briggs and McLane, 1907). Puis la méthode de presse à membrane est apparue (Richards and Fireman, 1943). Cette dernière consiste en un ressuyage des échantillons de sols saturés en eau sur du matériel poreux, pouvant utiliser le vide qui génère une différence de pression, facilitant l'évacuation de l'eau (Coleman and Marsh, 1961). Il existe différents extracteurs en fonction de la pression recherchée (Figure 3). Dans les années 1990, une analyse statistique des relations des propriétés physico-chimiques des sols et de la capacité de rétention en eau a permis de développer des fonctions de pédotransfert permettant d'estimer la rétention en eau des sols, comme le montre l'étude bibliographique de (Bastet et al., 1998). Cependant, ces fonctions nécessitent une caractérisation physico-chimique des sols impliquant de nombreuses mesures (texture, densité apparente, teneur en MO), et les estimations obtenues peuvent comporter des incertitudes importantes, notamment lorsqu'elles sont appliquées à des sols caractérisés par des minéralogies atypiques par rapport aux sols utilisés pour établir ces fonctions.

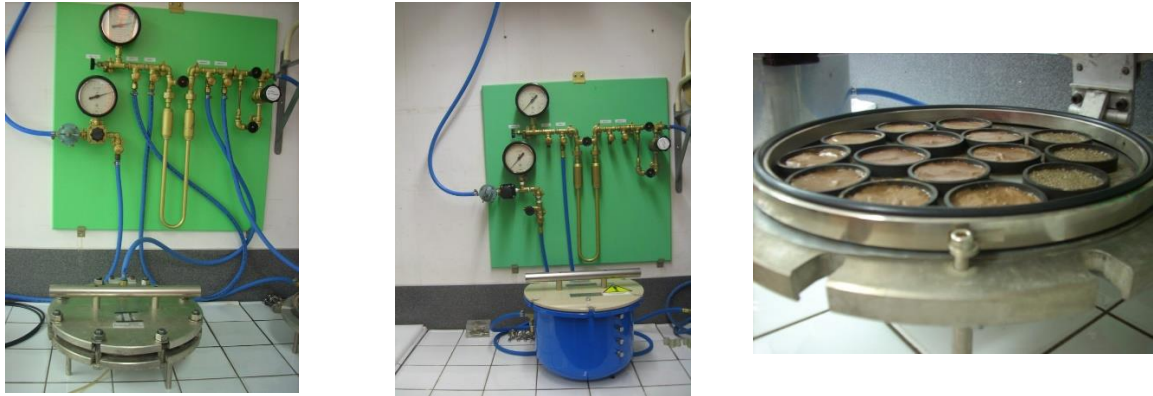


Figure 3 : Différents extracteurs à plaque et échantillons de sol (Photos G. Allavoine).

En comparant la méthode de centrifugation à la méthode de presse à membrane dite « de référence », de nombreux auteurs ont montré que ces méthodes conduisent à des résultats corrélés (Caputo and Nimmo, 2005) (Reatto et al., 2008) (Reis et al., 2013) (Silva and Azevedo, 2002) (Smagin, 2012). La technique de centrifugation est plus facile à mettre en place et nécessite un temps nettement inférieur par rapport à la presse à membrane.

L'originalité de cette étude réside dans la miniaturisation de la méthode de centrifugation permettant de travailler avec des échantillons de sol inférieurs à 1 g. Cette miniaturisation permet de caractériser la capacité de rétention en eau des sols à de petites échelles (agrégats de différentes tailles) où des processus écologiques importants (absorption racinaire, activités microbiennes) se produisent. Elle permet également d'atteindre des pressions appliquées élevées à des points critiques pour la plante tel le point de flétrissement (pF 4,2) avec des centrifugeuses de paille largement répandues dans les laboratoires.

Plus généralement, les objectifs de cette étude sont de :

1/ constituer une banque de sols ayant des propriétés contrastées et pour lesquels nous disposons déjà des mesures de rétention en eau effectuées avec la méthode de référence. Une base de 25 sols issus de différents continents et avec des propriétés contrastées a été utilisée. L'humidité au point de flétrissement (pF 4,2) de ces sols a été mesurée par deux laboratoires. Une comparaison inter-laboratoires sur un sous-échantillon de 18 sols a été effectuée afin de s'assurer de la fidélité de la méthode.

2/ comparer la méthode mise au point dans cette étude avec la méthode de référence.

3/ déterminer la durée de centrifugation optimale.

Matériel et méthodes

Obtenir une pression matricielle par centrifugation

Pour imposer une pression matricielle sur l'eau du sol ciblée, nous allons appliquer à une colonne de sol saturée en eau une accélération centrifuge (Figure 4). La masse de la colonne d'eau du sol acquiert un "poids" dont la valeur est directement proportionnelle à l'accélération centrifuge. Autrement dit une pression de centrifugation

s'exerce sur l'eau. De l'eau du sol va s'écouler, induisant une augmentation de la valeur des pressions matricielles du fait des capillaires créés par l'eau du sol de plus en plus fins. Lorsque le temps de centrifugation est suffisamment long, un équilibre est atteint où les pressions matricielles compensent exactement les pressions de centrifugation. Pour être tout à fait exact, des pressions osmotiques et la gravité agissent également sur l'eau du sol mais elles sont souvent négligeables aux deux autres pressions mises en jeu (pression de centrifugation appliquée et pression matricielle du sol en réaction).

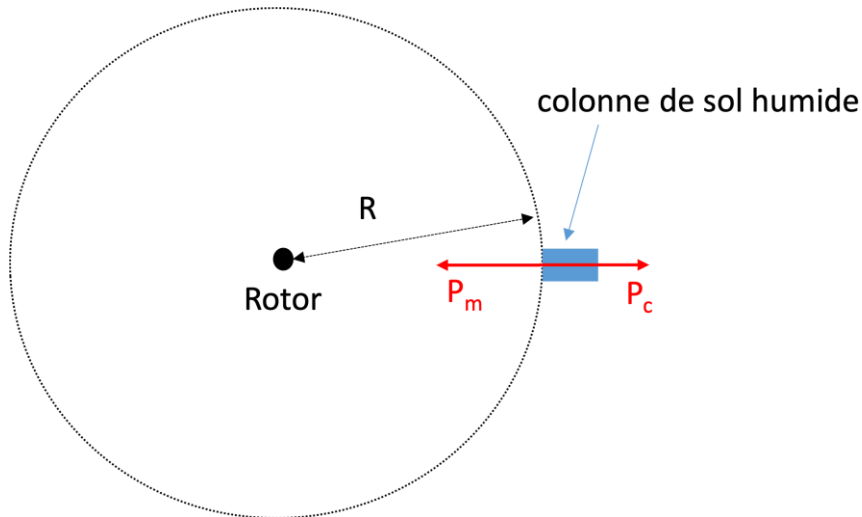


Figure 4 : Principe général de la méthode par centrifugation pour obtenir une pression matricielle du sol sur l'eau. À l'équilibre, la pression matricielle s'oppose exactement à la pression centrifuge ($P_m = -P_c$) dont la valeur est directement proportionnelle à la distance entre le rotor et la colonne de sol (R). Les flèches rouges représentent les vecteurs pression. Pour poser les vecteurs, nous prenons ici comme référence le haut de la colonne de sol c'est-à-dire la partie de la colonne de sol la plus proche du rotor.

Représentation et unités de la pression matricielle

La pression matricielle du sol exercée sur l'eau exprimée en pF peut être transformée en hauteur de colonne d'eau puis en Pascal (Pa).

Le pF est calculé de la manière suivante :

$$pF = \log|h| \quad \text{Équation 1}$$

où h est une hauteur d'eau en cm. Cette expression s'obtient par analogie à une colonne d'eau de hauteur h soulevée par les forces matricielles exercées sur l'eau par les parois d'un capillaire, les forces de capillarité (Figure 5). Au sein du sol ces forces de capillarité sont créées par les nombreux capillaires constituant la porosité du sol. Elles représentent une composante majeure des forces matricielles du sol auxquelles s'ajoutent d'autres forces comme les forces osmotiques, toutes ces forces ayant pour effet de retenir l'eau dans le sol en s'opposant aux forces de gravité et de succion des plantes.

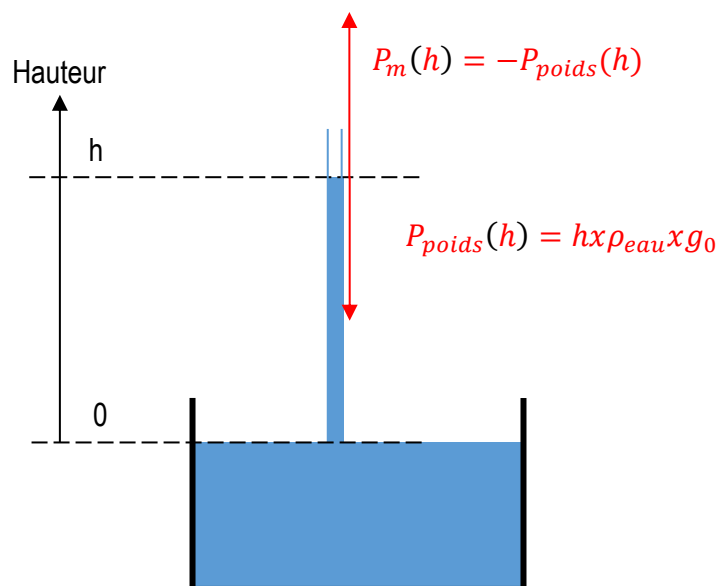


Figure 5 : Schématisation de la pression matricielle du sol exercée sur une colonne d'eau. La pression matricielle (P_m) est représentée ici par un capillaire dont les forces soulèvent une colonne d'eau. Cette analogie est pertinente car les particules du sol (minéraux, matières organiques) créent des capillaires. À l'équilibre, la pression matricielle s'oppose exactement au poids de la colonne d'eau ($P_m = -P_{poids}$). Les flèches rouges représentent les vecteurs pression en haut de la colonne d'eau (h). Cependant, les pressions ne s'exercent pas uniquement en haut de la colonne mais tout au long de celle-ci suivant un gradient linéaire allant de 0 en bas de la colonne à $P_m(h)$ et $P_{poids}(h)$ en haut de la colonne, ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau, g_0 l'accélération liée à l'attraction terrestre.

La hauteur d'eau soulevée par la pression matricielle est calculée par

$$h = 10^{pF} \quad \text{Équation 2}$$

La pression matricielle en Pa peut être obtenue en tenant compte de la masse volumique de l'eau ($\rho_{eau} = 1000 \text{ kg/m}^3$) et de l'accélération liée à l'attraction terrestre ($g_0 = 9.81 \text{ m/s}^2$) (Figure 5) :

$$P_m(H) = -H \times \rho_{eau} \times g_0 \quad \text{Équation 3}$$

Où la hauteur **H est exprimée en mètre dans cette équation**. Par exemple, un pF de 2,5 correspond à une P_m de -31 kPa.

Obtenir une pression matricielle par centrifugation

Pour imposer une pression matricielle choisie, sur l'eau du sol, nous appliquons une accélération centrifuge à une colonne de sol saturée en eau (Figure 4). La masse de la colonne d'eau du sol acquiert un "poids" dont la valeur est directement proportionnelle à l'accélération centrifuge. Autrement dit une pression de centrifugation s'exerce sur la colonne d'eau contenue dans le sol et de l'eau du sol va s'écouler à l'extrémité de la colonne de sol la plus éloignée de l'axe du rotor. Lorsque le temps de centrifugation est suffisamment long, un équilibre est atteint où les pressions matricielles compensent exactement les pressions de centrifugation, laissant dans le sol une certaine quantité d'eau correspondant à cette pression matricielle imposée.

L'accélération centrifuge augmente avec le rayon de centrifugation avec pour conséquence qu'elle n'est pas homogène dans la colonne d'eau du sol. Une analyse précise des gradients de pression de centrifugation et

matricielle le long de la colonne est donc nécessaire pour déterminer la pression matricielle moyenne appliquée à l'eau du sol.

Calcul des pressions centrifuge et matricielle selon le gradient d'accélération le long d'une colonne de sol

Considérons une colonne de sol saturée en eau constituée d'une multitude de petites colonnes élémentaires empilées les unes sur les autres (Figure 6). Les deux extrémités de la colonne d'eau correspondent à R_{max} ("bas", éloigné de l'axe) et R_{min} ("haut", proche de l'axe) sur l'axe du rayon de centrifugation (R) et à 0 et H ($H = R_{max} - R_{min}$) sur l'axe de la hauteur (h).

Chacune des colonnes élémentaires est située à une distance R de l'axe du rotor soit à une hauteur h par rapport à la base de la colonne. Elle subit donc l'accélération centrifuge présente à la distance R de l'axe du rotor.

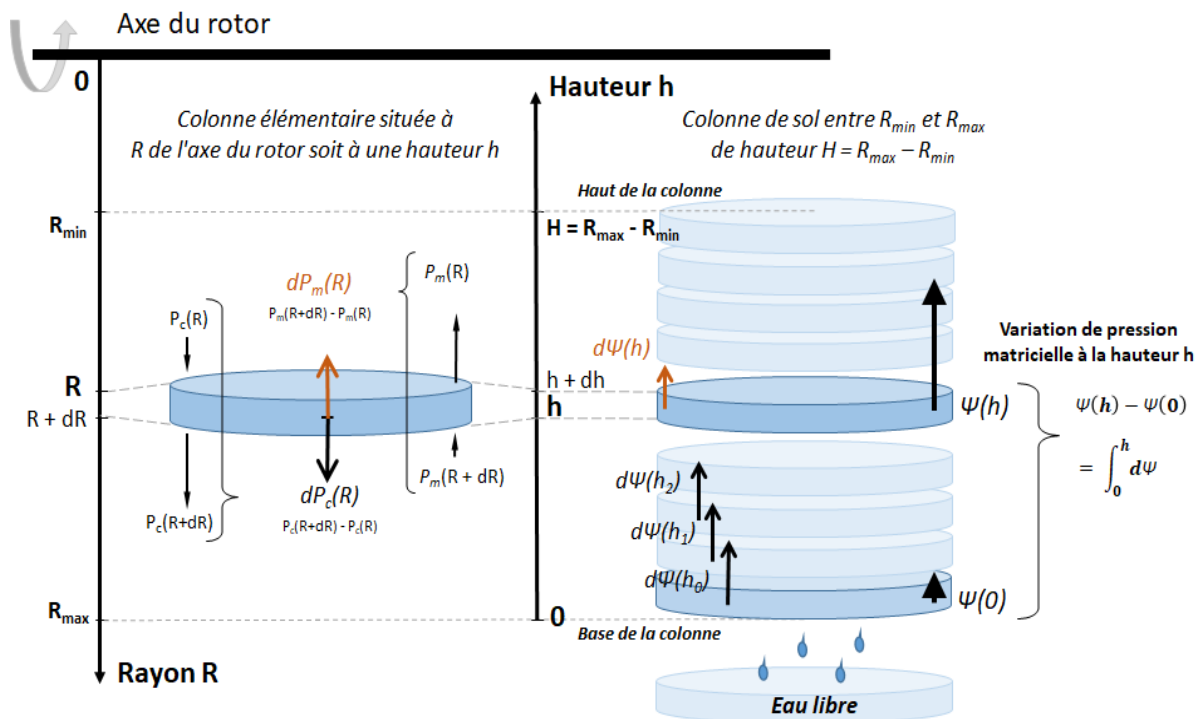


Figure 6 : Schématisation de la variation de la pression matricielle de l'eau dans le sol $\Psi(h)$ le long de la hauteur h de la colonne de sol. La colonne est représentée par une superposition d'unités élémentaires de hauteur (dh) infinitésimales. La variation du rayon de centrifugation avec la hauteur h induit une variation élémentaire $d\Psi(h)$ de la pression matricielle. Le cumul de ces variations élémentaires de pression depuis la base de la colonne ($h=0$) jusqu'à une hauteur h , donne la pression matricielle de l'eau à chaque hauteur de la colonne : $\Psi(h)$

Pression matricielle élémentaire s'exerçant sur une colonne d'eau élémentaire située à une distance (R) de l'axe du rotor

Intéressons-nous aux pressions centrifuge et matricielle agissant sur la colonne élémentaire située à une distance R de l'axe du rotor et d'épaisseur très fine $|dh| = |dR|$ (Figure 6).

Sous l'effet de l'accélération, la pression centrifuge (P_c) augmente entre le haut (R) et le bas ($R+dR$) de la colonne élémentaire. La variation (augmentation) de la force centrifuge (dF_c en Newton) du haut vers le bas de cette unité est proportionnelle à la masse d'eau de l'unité (en kg) et à l'accélération (a_c) :

$$\begin{aligned} dF_c(R) &= a_c \times m_{eau} \\ dF_c(R) &= a_c \times \rho_{eau} \times S_{ech} \times dR \end{aligned} \quad \text{Équation 4}$$

Où S_{ech} correspond à la surface de l'unité élémentaire (m^2) et dR la hauteur d'eau de l'unité élémentaire (m).

L'accélération centrifuge (m/s^2) est déterminée par :

$$a_c = \omega^2 \times R \quad \text{Équation 5}$$

Où R est la distance entre le rotor de la centrifugeuse (en m) et l'unité élémentaire, ω est la vitesse angulaire (radian/s) définie par :

$$\omega = \frac{2 \times \pi}{60} \times N = \frac{\pi}{30} \times N \quad \text{Équation 6}$$

avec N le nombre de tours/min de la centrifugeuse.

La variation de pression de centrifugation (dP_c en Pa) entre le haut et le bas de l'unité est obtenue en exprimant la variation de force centrifuge par m^2 :

$$dP_c(R) = P_c(R + dR) - P_c(R) = \frac{dF_c(R)}{S_{ech}} = \rho_{eau} \times \omega^2 \times R \times dR \quad \text{Équation 7}$$

avec S_{ech} la surface de l'échantillon (m^2).

À l'équilibre hydrostatique, l'eau est retenue dans la colonne élémentaire par une variation élémentaire de pression matricielle (dP_m) qui s'oppose exactement à la variation élémentaire de pression de centrifugation (dP_c):

$$dP_m(R) = P_m(R + dR) - P_m(R) = -dP_c(R) = -\rho_{eau} \times \omega^2 \times R \times dR \quad \text{Équation 8}$$

Par souci de simplicité pour la suite, on transpose cette variation de pression matricielle avec le rayon R en variation de pression matricielle avec la hauteur h dans la colonne (changement de repère). On appellera $\psi(h)$ cette fonction transposée donnant la pression matricielle le long de cet axe de hauteur h . La transposition de $dP_m(R)$ en $d\psi(h)$ correspond à l'égalité suivante :

$$d\psi(h) = \psi(h + dh) - \psi(h) = -dP_m(R) \quad \text{Équation 9}$$

La transposition de R sur l'axe de hauteur h s'écrit :

$$R = R_{max} - h \quad \text{Équation 10}$$

Les équations 9 et 10 donnent ainsi :

$$d\psi(h) = -dP_m(R_{max} - h) \quad \text{Équation 11}$$

On obtient avec les équations 11 et 8, l'expression finale de la variation de pression matricielle le long de l'axe de hauteur h :

$$d\psi(h) = -\rho_{eau} \times \omega^2 \times (R_{max} - h) \times dh \quad \text{Équation 12}$$

Pression matricielle à une hauteur h dans la colonne d'eau : $\Psi(h)$

La pression matricielle à une hauteur h dans la colonne d'eau, $\Psi(h)$, est obtenue en cumulant les variations élémentaires de pressions ($d\Psi(h)$) depuis la base de la colonne d'eau jusqu'à la hauteur h . Ce cumul est donné par l'intégration de la variation de Ψ avec h , entre 0 et h :

$$\int_0^h \frac{d\psi}{dh} dh = \psi(h) - \psi(0) \quad \text{Équation 13}$$

À la hauteur $h=0$ (base de la colonne), l'eau est libre de toute force matricielle. Par convention le potentiel matriciel de l'eau libre vaut 0, d'où $\Psi(0) = 0$. Sous cette convention, les équations 12 et 13 donnent la pression matricielle à chaque hauteur h d'une colonne d'eau :

$$\begin{aligned} \psi(h) &= \int_0^h \frac{d\psi}{dh} dh = \int_0^h -\rho_{eau} \times \omega^2 \times (R_{max} - h) \times dh \\ \psi(h) &= -\rho_{eau} \times \omega^2 \times h \times \left(R_{max} - \frac{h}{2} \right) \end{aligned} \quad \text{Équation 14}$$

La pression matricielle est négative, correspondant à une dépression soulevant une colonne d'eau de hauteur h dans la colonne de sol. Cette dépression s'intensifie (Ψ devient plus négatif) au fur et à mesure que l'eau monte dans la colonne de sol (Figure 7).

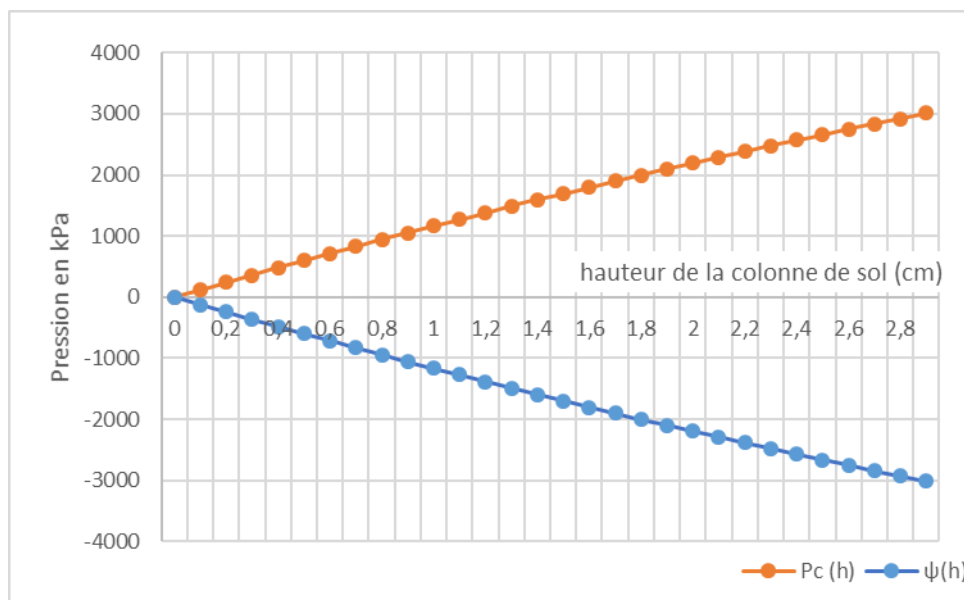


Figure 7 : Schématisation de la variation de la pression de centrifugation (P_c) et de la pression matricielle de l'eau dans le sol (Ψ) le long de la hauteur h de la colonne de sol. Les simulations ont été réalisées en considérant une colonne de sol de 2,82 cm, un R_{max} de 9,27 cm et une vitesse de centrifugation de 11 000 tours par minute.

Vitesse de centrifugation à appliquer pour imposer une pression matricielle choisie

Cas d'une colonne de sol perpendiculaire au rotor

Dans le but de mesurer l'humidité équivalente au potentiel matriciel l'idéal serait d'échantillonner une petite fraction de la colonne de sol en ciblant la hauteur (h) correspondant au potentiel visé. Dans la pratique la mesure est généralement réalisée sur l'ensemble de la colonne de sol. Dans ce cas, il est nécessaire de calculer la pression matricielle moyenne exercée sur l'eau dans la colonne de sol. Certains auteurs (Khazode *et al.*, 2002; Russel and Richards, 1939; Smagin, 2012) utilisent un proxy de cette valeur moyenne en calculant la pression matricielle exercée au milieu de la colonne d'eau. Cependant cette approche n'est pas très rigoureuse car elle fait l'hypothèse d'une relation linéaire entre la pression matricielle et la hauteur de la colonne de sol ce qui n'est pas entièrement vrai (Figure 8). Il est tout aussi simple et plus juste de calculer la valeur moyenne de la pression matricielle (ψ) en appliquant à l'équation 14 une approche du type $f(x)$ sur l'intervalle $[a; b] = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx$:

$$\begin{aligned}\psi &= \frac{1}{H} \int_0^H -\rho_{eau} \times \omega^2 \times h \times \left(R_{max} - \frac{h}{2}\right) dh \\ \psi &= -\rho_{eau} \times \frac{\omega^2}{6} \times H \times (3 \times R_{min} + 2 \times H)\end{aligned}\quad \text{Équation 15}$$

où H est la hauteur totale de la colonne de sol (Figure 3).

En réorganisant l'équation 15 nous obtenons l'équation permettant de calculer la vitesse de centrifugation (nombre de tours min^{-1}) à appliquer selon la pression matricielle moyenne visée (ψ en Pa) :

$$N = \sqrt{\frac{-6 \times \psi}{\rho_{eau} \times \left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \times H \times (3 \times R_{min} + 2 \times H)}}\quad \text{Équation 16}$$

avec: $\rho_{eau} = 1000 \text{ kg/m}^3$, ψ en Pa, H et R_{min} en m.

Cas d'une colonne de sol non perpendiculaire à l'axe du rotor (inclinaison)

Les équations qui viennent d'être présentées sont valables pour une colonne de sol centrifugée à la perpendiculaire de l'axe de rotation. Pour des vitesses de rotation élevées, les centrifugeuses sont équipées de rotor disposant les échantillons avec un angle différent, souvent de 45° , par rapport à l'axe perpendiculaire (Figure 9). Cet angle modifie les gradients de pression dans la colonne de sol et doit donc être considéré dans le calcul de ψ et N. La modification des calculs peut se faire assez simplement en considérant la projection de la colonne de sol inclinée, sur l'axe perpendiculaire (Figure 8).

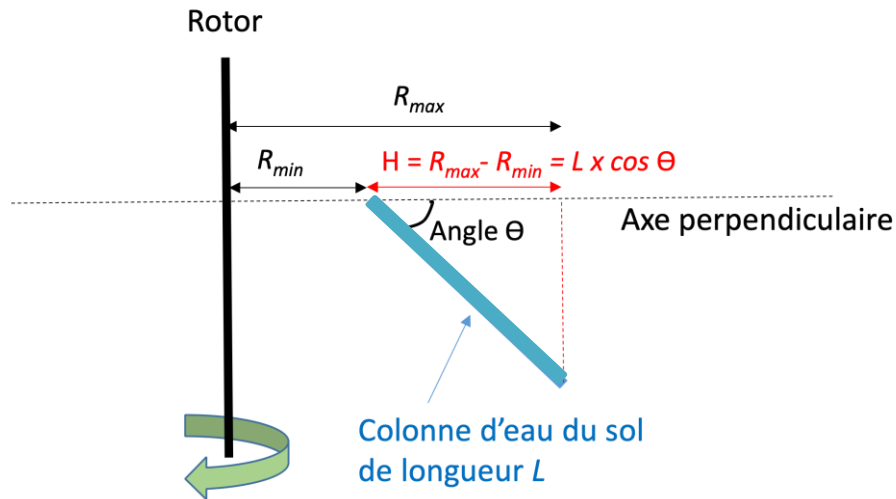


Figure 8 : Schématisation d'une colonne de sol inclinée avec un angle θ par rapport à l'axe perpendiculaire au rotor. La hauteur d'eau H de la colonne de sol peut être obtenue en projetant la colonne inclinée sur l'axe perpendiculaire. Ainsi la hauteur d'eau H est égale au cosinus de l'angle θ multiplié par la longueur L de la colonne de sol.

La pression matricielle moyenne dans une colonne de sol inclinée est obtenue en remplaçant dans l'équation 16 la variable H par le cosinus de l'angle d'inclinaison θ (Figure 8). La vitesse de centrifugation (nombre de tours min^{-1}) à appliquer selon la pression matricielle moyenne visée (ψ en Pa) est donnée par :

$$N = \sqrt{\frac{-6 \times \psi}{\rho_{\text{eau}} \times \left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \times \cos(\theta) \times L \times (3 \times R_{\text{min}} + 2 \times \cos(\theta) \times L)}} \quad \text{Équation 17}$$

Avec : $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg/m}^3$, ψ en Pa, L et R_{min} en m.

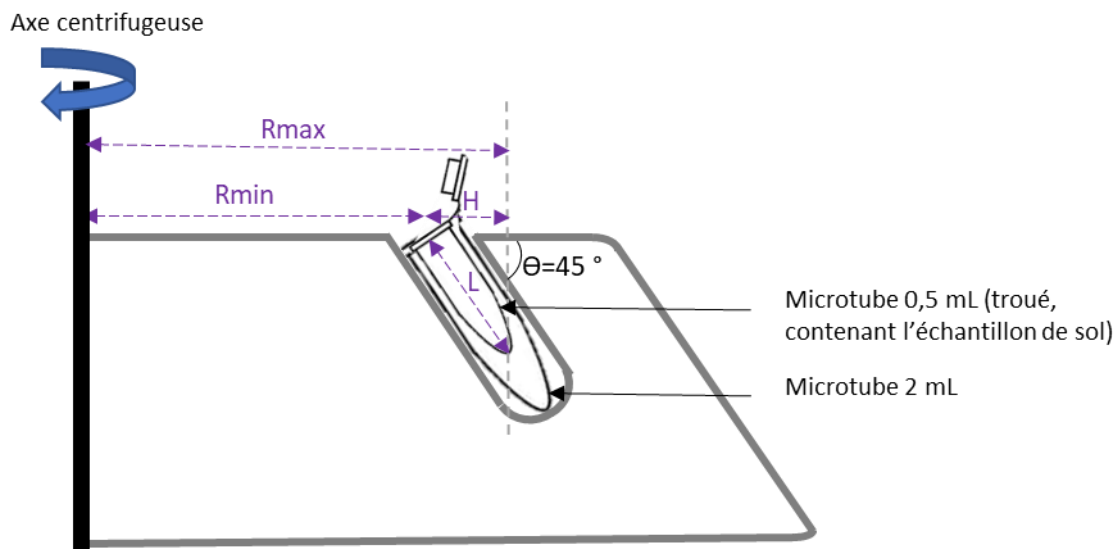


Figure 9 : Schéma de la centrifugeuse ThermoScientific SL16R avec rotor à microtubes (le tube contenant le sol est perméable à l'eau)

En utilisant l'équation et les données spécifiques à nos conditions expérimentales (Figure 9 : $R_{min} = 0,0645 \text{ m}$; $L = 0,0282 \text{ m}$; $\theta = \pi/4$ radian équivalent à 45°), nous avons calculé les vitesses de centrifugation à appliquer pour différents potentiels matriciels caractéristiques (Tableau 1).

Tableau 1 : Vitesse de centrifugation (ou équivalent pression) à appliquer pour des pF caractéristiques pour la centrifugeuse ThermoScientifique SL16R. Attention ces indications de vitesse de centrifugation ne sont valables que pour ces conditions

	Potentiel matriciel moyen		Vitesse tr/min
	Valeur en pF	Pression (k Pa)	
Capacité au champ	2,5	-31	1 910
Humidité d'incubation	3,0	-98	3 396
Point de flétrissement	4,2	-1555	13 520

Fabrication du matériel de centrifugation

Le matériel de centrifugation est constitué de deux microtubes de volumes différents : 2 mL et 0,5 mL (.1). Le microtube de 2 mL va servir à récupérer l'eau libérée par l'échantillon de sol placé dans le tube de 0,5 mL au cours de la centrifugation. Le tube de 0,5 mL a été préalablement troué sur les côtés avec un pointeau à chaud : 4 rangées de 4 trous chacune et un trou au fond du tube, soit 17 trous (Figure 10.2). Ce perçage latéral est essentiel car il évite qu'une force de la paroi du tube sur l'eau du sol libérée s'oppose à l'évacuation de l'eau. Afin que le sol ne s'échappe pas par les trous du microtube, il est enfermé dans un mini sac conique qui doit épouser parfaitement les parois du microtube. Pour le confectionner on utilise de la toile à bluter en nylon ($30 \mu\text{m}$). Elle est découpée en carrés de 3 cm de côté (Figure 10.3) et enroulée autour d'un cône de 1 mL afin de lui faire prendre la forme conique (Figure 10.3-4). Puis en dégageant légèrement le cône de 1 mL, la toile est chauffée à l'extrémité pointue avec une flamme de lampe à alcool pour souder la pointe (Figure 10.4). Ensuite, le cône de 1 mL est de nouveau utilisé pour insérer le filtre conique ainsi confectionné, au fond du microtube troué (Figure 10.5-6).



1



2



3



4



5

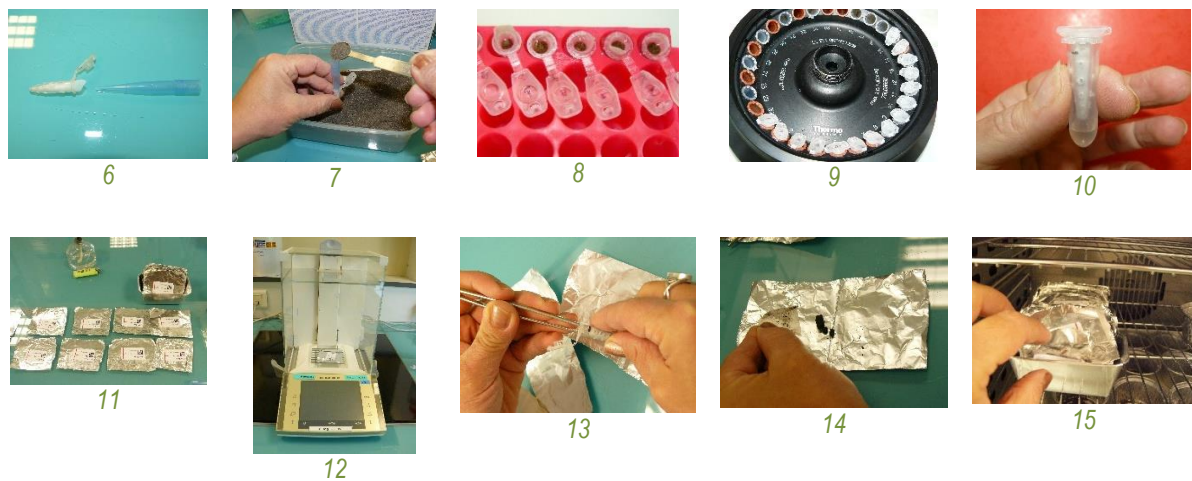


Figure 10 : Les étapes de préparation des microtubes (photos S. Revaillet).

Préparation des échantillons

La méthode peut être appliquée à du sol frais ou sec, tamisé ou non. Dans notre étude, le sol a été tamisé (2 mm) afin de réduire l'hétérogénéité granulométrique, puis séché à l'air.

La veille de la centrifugation, à l'aide d'un cône de pipette 1 mL coupé au bout pour servir d'entonnoir (Figure 10.7), remplir le microtube de 0,5 mL avec du sol, soit environ 3 cm (faire un trait préalable sur le microtube percé (Figure 10.10). Taper légèrement le microtube sur la paillasse. Veiller à mettre la même hauteur de sol dans chacun des microtubes, car le calcul de la vitesse à appliquer en dépend. Ensuite, faire tremper les microtubes dans un portoir à fond plein rempli d'eau, et mouiller légèrement la surface des sols avec une pissette (Figure 10.8). Faire au moins cinq répétitions par tube (compter 10 % de perte car le tube peut éclater pendant la centrifugation, ou glisser). Lors de l'ajustement du niveau d'eau (quel que soit le type de sol), veiller à ne pas mettre une hauteur d'eau plus élevée que la hauteur du sol.

Déroulement des mesures

Découper des carrés de papier aluminium (environ 10 cm de côté, Figure 10.11). Choisir une balance de précision (au millième de gramme), étiqueter et noter le poids de tare des carrés de papier aluminium (Figure 10.12). Après une imprégnation de 24 h, égoutter les microtubes troués sur un essuie-tout (quelques secondes), les placer dans le plus grand microtube au bouchon coupé (2 mL). Puis, installer les tubes dans la centrifugeuse (Figure 10.9) et les centrifuger à la vitesse de rotation voulue par rapport à l'objectif de pression à appliquer pendant 10 min (cf. Tableau 1 et équation 17 pour calculer la vitesse de centrifugation à appliquer). Dans notre étude, les échantillons de sol étaient centrifugés à 13800 tr.min⁻¹, correspondant à une pression appliquée de 1555 kPa et au point de flétrissement permanent (pF 4,2). Après centrifugation, sortir les microtubes de 0,5 mL dans un portoir qu'on mettra dans un sac plastique pour éviter que les échantillons ne se dessèchent davantage. Ensuite, pour chaque microtube de 0,5 mL, démouler le sol en retirant le filtre en toile à bluter, mettre dans le papier aluminium (peser la

tare du papier aluminium auparavant - Figure 10.13-14), et noter le poids frais (tare + poids de l'échantillon). Poser les échantillons dans des barquettes aluminium et les mettre 24 h à l'étuve à 105°C en ayant pris soin de laisser l'aluminium ouvert pour que l'humidité s'échappe (Figure 10.15). En cas de données aberrantes, l'échantillon est éliminé de la série d'étude.

Après l'avoir préalablement refroidi dans un dessiccateur 10 min, peser l'échantillon (tare + masse échantillon). Effectuer les calculs d'humidité du sol (avec mF= masse fraîche et mS= masse sèche) :

$$\% \text{Humsol} = \frac{mF - mS}{mS}$$

Test de la méthode sur un panel de sols aux textures contrastées

Nous avons testé notre méthode miniaturisée de détermination des teneurs en eau caractéristiques sur un large panel de sols ayant des textures contrastées. Comme vu précédemment (Figure 2) et tel que le décrit Jamagne (Jamagne et al., 1977) et de nombreux auteurs dans analyse bibliographique de Bastet (Bastet et al., 1998), la texture joue un rôle clé dans la rétention d'eau des sols. Un panel de 25 sols issus d'une expérimentation nommée « sol du monde 2010 » (Perveen *et al.*, 2019) a été utilisé. Les caractéristiques granulométriques ainsi que la teneur en carbone (indicateur de la teneur en matière organique) sont connues (cf. Annexe 2). Ces sols ont été positionnés sur le triangle des textures (Jamagne *et al.*, 1977) comme le montre la Figure 11. Ce panel a été sélectionné pour tester la méthode et ses limites. Les mesures effectuées par la méthode de presse à membrane ont été réalisées précédemment à cette étude et dans deux laboratoires distincts (prestataire privé SAS et l'INRA de Laon). La première étape de notre étude a donc été de mesurer la variabilité de mesure inter-laboratoires sur un sous-échantillon de 19 sols afin de s'assurer que nous disposions d'un pool de résultats homogènes. La justesse et la répétabilité de notre méthode par rapport à cette méthode de référence ont été quantifiées au potentiel hydrique de -15 849 g/cm², soit pF 4,2 (c.à.d. le point de flétrissement). Notre dernier objectif était de déterminer la durée optimale de centrifugation correspondant à la durée minimale à partir de laquelle nous n'observons plus de diminution significative du pourcentage d'humidité. Pour cela nous nous sommes basés sur des courbes de dessèchement du sol (Figure 15), décrites par de nombreux auteurs (Caputo and Nimmo, 2005; Reatto *et al.*, 2008; Reis *et al.*, 2013; Silva and Azevedo, 2002; Smagin, 2012) afin de définir différentes durées de centrifugation à tester.

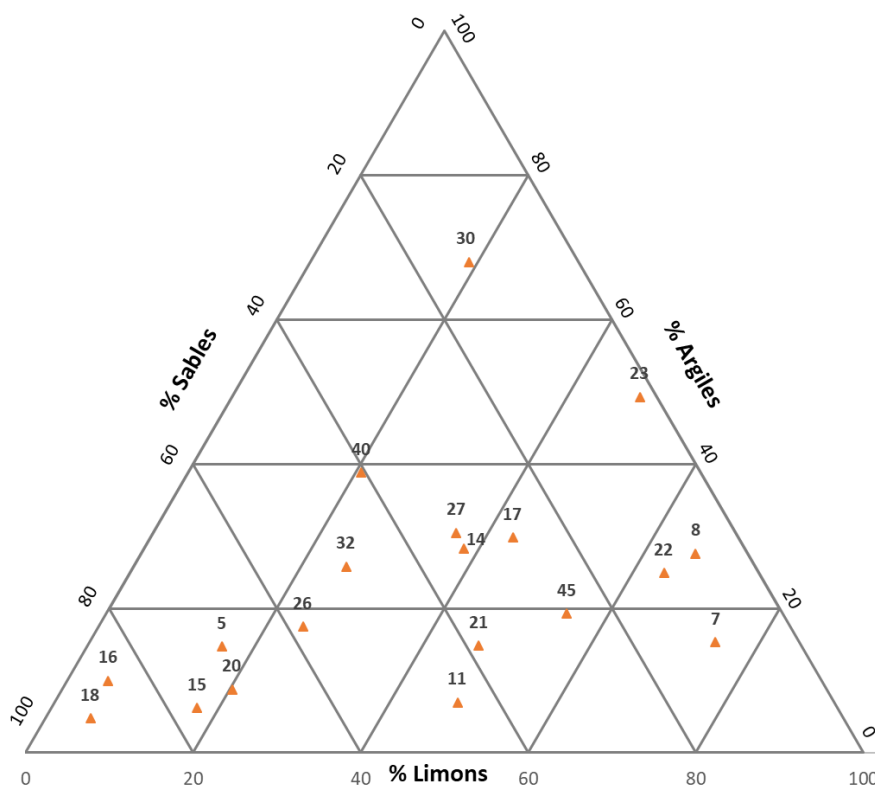


Figure 11 : Répartition des échantillons de sol évalués sur le triangle des textures.

Analyses statistiques

L'objectif 1 est de comparer les résultats de presse à membrane donnés par les deux laboratoires différents (SAS et l'INRA de Laon). Afin de répondre à cet objectif, un modèle linéaire a été réalisé sur 18 sols pour déterminer si les deux laboratoires donnent des résultats différents.

L'objectif 2 concerne la comparaison des deux méthodes. Les valeurs de centrifugation pendant 10 minutes seront confrontées aux valeurs obtenues avec la presse à membrane des deux laboratoires. Pour répondre à cet objectif, un modèle linéaire a été réalisé sur 25 sols.

L'objectif 3 est de trouver la durée optimale de centrifugation pour tout type de sol. Pour cette démonstration, six sols ont été choisis, présentant des caractéristiques pédologiques contrastées, pour six temps de centrifugation différents : de 10 à 60 minutes de centrifugation avec un pas de temps de 10 min (cf. Annexe 3). Un test de Kruskal-Wallis a été utilisé afin de tester les différences entre les temps par type de sol.

Les données ont été analysées avec le logiciel R (R Core Team, 2018).

Résultats

Objectif 1 : Comparaison des mesures inter-laboratoires pour la méthode de référence

Les résultats de presse à membrane obtenus par les deux laboratoires sont fortement corrélés (Im , $R^2=0,95$; $p<0,001$) avec une pente proche de 1 (1,07) et une ordonnée à l'origine qui n'est pas significativement différente de 0 (-1,27) (Figure 12). Ainsi, il n'y a pas de différence significative entre les deux laboratoires signifiant que le

panel de sols complet (25 sols) peut être exploité pour évaluer notre méthode miniaturisée de détermination des teneurs caractéristique de la rétention en eau du sol.

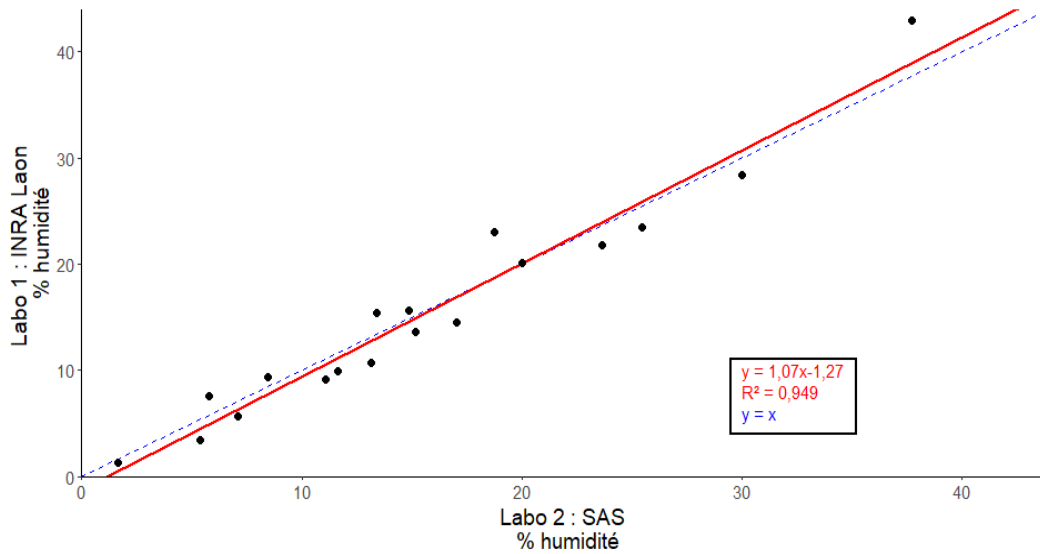


Figure 12 : Comparaison des résultats de presse à membrane des deux laboratoires.

Objectif 2 : Comparaison de la méthode par centrifugation miniaturisée et de la méthode de référence

Les deux méthodes sont fortement corrélées (lm ; $R^2=0,94$; $p<0,001$) avec une pente non différente de 1 (1,01) mais avec une ordonnée à l'origine différente de 0 (3,02) (Figure 13). Ainsi, la méthode par centrifugation induit une surestimation systématique de 3,02 % de la teneur en eau massique au point de flétrissement par rapport à la méthode de presse à membrane.

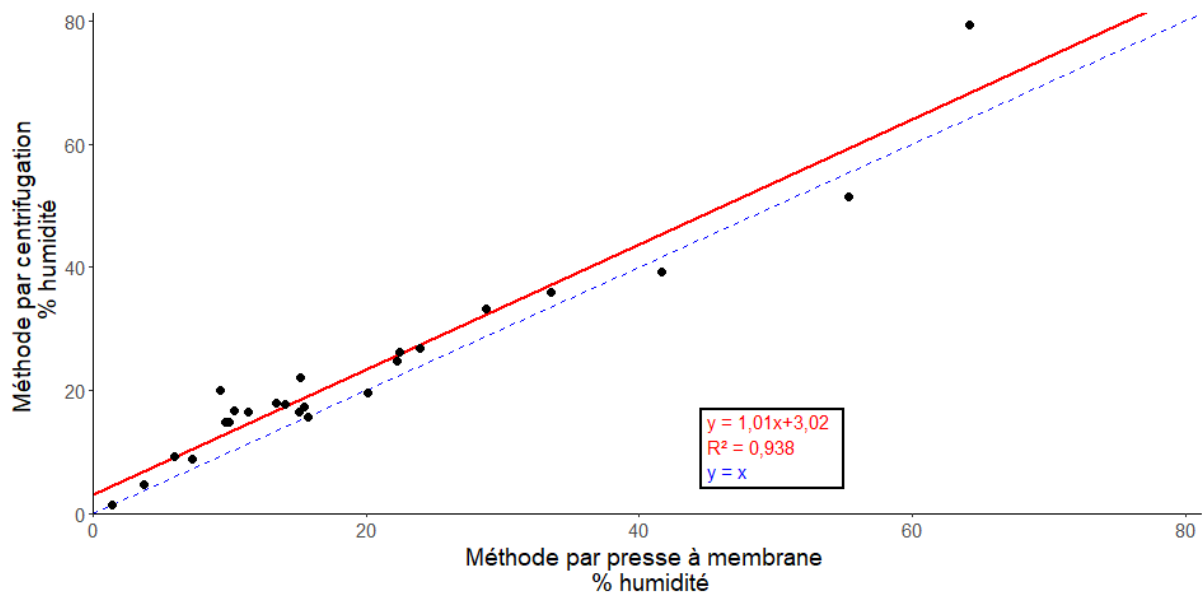


Figure 13 : Relation entre les taux d'humidité (%) des deux méthodes.

Objectif 3 : Détermination du temps optimum de centrifugation

Pour cette démonstration, six sols aux caractéristiques pédologiques contrastées ont été choisis pour six temps de centrifugation différents (pas de temps de 10 min, allant de 10 à 60 min de centrifugation) (voir Annexe 2).

Tableau 2 : Résultats des tests de Kruskal-Wallis pour les six temps de centrifugation (10, 20, 30, 40, 50 et 60 minutes).

num_sol	Provenance du sol	X^2	df	p-value
15	Hollande	28,175	5	< 0,001
16	Hongrie	7,426	5	0,19
21	Canada	7,139	5	0,21
23	Russie_cult	7,090	5	0,21
40	Limagne (France)	4,542	5	0,47
45	Laqueuille_extensif (France)	9,915	5	0,08

Les résultats montrent que seul le sol de Hollande présente une différence de teneur en eau au point de flétrissement suivant le temps de centrifugation (Kruskal-Wallis ; $p < 0,001$; Tableau 2). En regardant les données collectées de ce sol, on s'aperçoit que 4 données sur 18 sont très différentes pour le temps 30 min. Ceci entraîne un écart-type de 2 à 4 fois plus important par rapport aux autres temps de centrifugation.

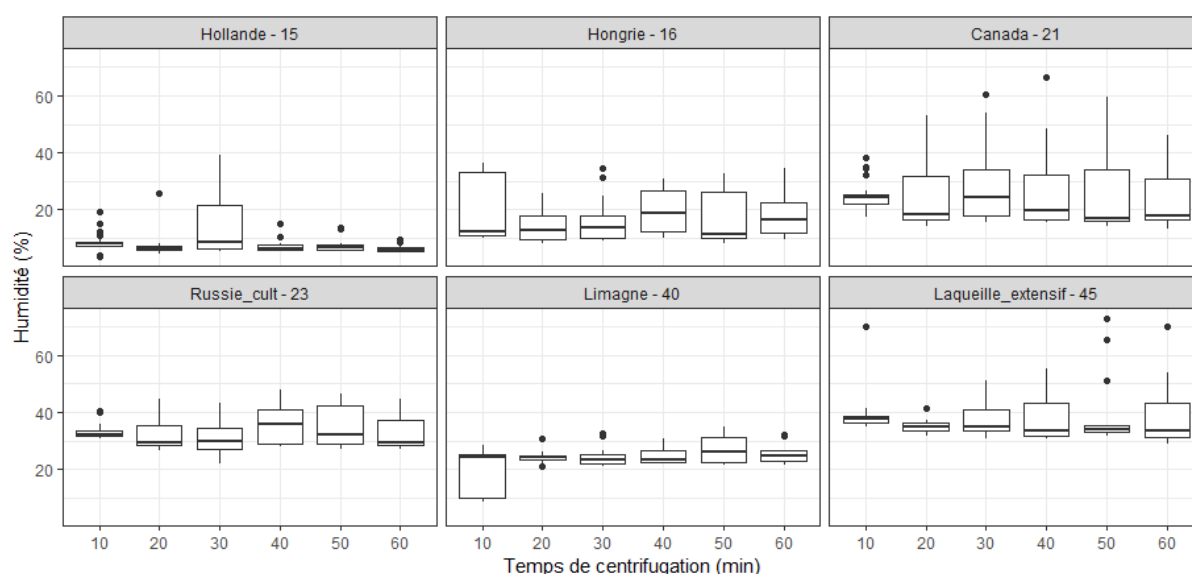


Figure 14 : Capacité de rétention en eau (médiane, premier et dernier quartile) pour pF 4,2 de six sols à six temps de centrifugation différents, incluant plusieurs répétitions (Annexe 2).

La Figure 14 représente la capacité de rétention en eau pour six sols choisis pour leurs caractéristiques granulométriques et teneurs en matière organiques contrastées, à six temps différents. Chaque boîte à moustaches représente la variabilité (distribution) des mesures. On constate que plus la variabilité des mesures aux différents temps est grande (e.g. sols 16-Hongrie, 21-Canada, 23-Russie), plus la médiane de l'humidité au point de flétrissement est variable. Cependant, hormis le sol 15 pour le temps 30 min (échantillons ayant eu un problème technique mais non supprimés), les résultats du test de comparaison de moyenne aux différents temps (Tableau

2) montre que, pour chacun des sols, il n'y a pas de variation significative des moyennes d'humidité au point de flétrissement avec le temps ($p > 0,05$).

Discussion

Les mesures d'humidité au point de flétrissement réalisées avec la méthode de référence (presse à membrane) par les deux laboratoires sur un sous échantillon de sols donnent des valeurs identiques. Ce résultat indique que l'ensemble des données produites par ces laboratoires constitue un pool homogène pouvant servir à l'évaluation de la méthode de centrifugation miniaturisée proposée par cette étude.

Les résultats produits par la méthode de centrifugation miniaturisée sont linéairement corrélés avec ceux de la méthode de référence. Le modèle linéaire explique 94 % de la variabilité pour une gamme de sols aux capacités de rétention en eau au point de flétrissement contrastées [1,34 % — 64,15 %]. Ces résultats suggèrent que la méthode de détermination des caractéristiques de rétention en eau des sols proposée par cette étude est fiable.

Le modèle linéaire possède une pente proche de 1 mais une ordonnée à l'origine égale à 3 %, traduisant une surestimation de l'humidité au point de flétrissement par rapport à la méthode référence. Ainsi, dans l'objectif d'une estimation absolue et précise de la capacité de rétention en eau des sols, il est conseillé de déterminer la droite de corrélation entre la méthode proposée et la méthode de référence. La surestimation par la méthode par centrifugation a déjà été observée (Reatto *et al.*, 2008) bien que son origine reste inconnue. Elle pourrait s'expliquer par la différence des matériaux de filtration (céramique pour la presse à membrane et toile en plastique pour la méthode de cette étude) en contact avec le sol et au travers desquels l'eau doit circuler.

L'analyse de l'effet de la durée de centrifugation sur l'humidité au point de flétrissement sur une sélection de six sols aux textures contrastées (cf. Annexe 2) montre que dix minutes suffisent pour atteindre un équilibre du taux d'humidité. Ce temps de centrifugation est largement inférieur à ceux observés par différents auteurs cités dans l'article de Reatto (Reatto *et al.*, 2008). Cet écart est difficilement explicable par des différences de propriétés de sols puisque notre étude donne des temps de centrifugation identique pour six sols aux capacités de rétention en eau contrastées. L'écart pourrait venir de la miniaturisation et de la faible prise d'essai de notre méthode (< 1g) par rapport aux autres. Plus la prise d'essai est faible, plus la surface de contact du sol avec le matériau poreux évacuant l'eau est importante et plus le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre est réduit. Les avantages de prendre une faible quantité de sol peuvent être largement contrebalancés par des effets négatifs comme le manque de représentativité manifeste. De si faibles quantités ne sont forcément pas représentatives pour des sols présentant des hétérogénéités centimétriques.

Certaines limites de la méthode présentée dans cette étude sont à prendre en compte, notamment par rapport aux caractéristiques granulométriques de certains sols. Par exemple, un sol tourbeux présentera une très forte variabilité des résultats par rapport aux autres sols (cf. Annexe 1). Cependant, cette variabilité est également observée pour la méthode de presse à membrane. Des investigations supplémentaires sont nécessaires pour comprendre l'origine de cette variabilité et développer une méthodologie adaptée à ce type de sol. Nous avons

aussi observé que pour les sols contenant une grande quantité de limons, la centrifugation induit un tassement du sol (phénomène de « croute de battance ») empêchant l'évacuation de l'eau. Pour ce type de sol, nous recommandons l'utilisation de la méthode de presse à membrane.

Le mode opératoire actuel devra être amélioré pour résoudre certains problèmes occasionnels de glissement du petit tube contenant l'échantillon dans le grand tube recueillant l'eau évacuée rendant l'échantillon inexploitable (réutilisation des microtubes). Actuellement ce problème est surmonté par la multiplication d'échantillons.

Enfin, notre technique permet la détermination des caractéristiques de rétention en eau des sols sur de petites masses de sol (± 1 g de sol). Elle est donc adaptée pour caractériser la micro-hétérogénéité hydrique des sols (mm à cm) ou les capacités de rétention en eau d'un échantillon de sol qui a été précédemment homogénéisé, par exemple par un tamisage fin (2 mm), et dans lequel il est relativement aisé de prélever un sous-échantillon représentatif. Pour des applications nécessitant de travailler sur des masses de sol hétérogènes plus grandes la presse à membrane constituera une meilleure option. D'une manière générale, nous conseillons avec notre technique de mettre en place 5 à 10 reliquats par sol, au moins dans les premières étapes, afin de parer aux risques de variabilité de mesure inhérente aux petites prises d'essai (Annexe 3).

Conclusion

Cette étude montre que la technique de centrifugation miniaturisée permet d'obtenir des résultats comparables à la méthode de presse à membrane, qui fait office de méthode de référence (NF ISO 11274). Cette méthode présente l'avantage d'un faible coût du fait de la rapidité et de la simplicité de sa mise en œuvre (quelques heures vs. plusieurs semaines pour la méthode de presse à membrane) et du matériel de centrifugation déjà présent dans la plupart des laboratoires. Cette méthode ouvre des perspectives intéressantes pour caractériser la micro-hétérogénéité de la capacité de rétention en eau des sols, son influence sur les activités microbiennes et les absorptions racinaires grâce à sa faible prise d'essai.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-SA).



<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Le Cahier des Techniques de l'Inra », la date de sa publication et son URL).

Remerciements

Les auteurs remercient Daniel Boitet (INRAE de Laon) pour avoir effectué les mesures de presse à membrane et Gonzague Allavoine (INRAE de Reims) pour ses conseils et ses photos de la méthode de presse à membrane.

Données

Les données sont disponibles à : [Mesurer la capacité de rétention en eau d'un sol par centrifugation : une méthode facile et rapide à mettre en œuvre dans un laboratoire - Portail Data INRAE](#)

<https://data.inrae.fr/privaturl.xhtml?token=15873f75-8753-4574-93ca-f6b09f91379f>

Bibliographie

- Baize, D., 1988. Guide des analyses courantes en pédologie: choix, expression, présentation, interprétation. Inst. national de la recherche agronomique, Paris.
- Bastet, G., Bruand, A., Quélin, 1998. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert (FPT) : une analyse bibliographique.
- Briggs, L.J., McLane, J.W., 1907. The moisture equivalents of soils.
- Calvet, R., 2013. Le sol. Ed. France Agricole, Paris.
- Caputo, M.C., Nimmo, J.R., 2005. Quasi-steady centrifuge method for unsaturated hydraulic properties: TECHNICAL NOTE. Water Resour. Res. 41. <https://doi.org/10.1029/2005WR003957>
- Coleman, J.D., Marsh, A.D., 1961. An investigation for the pressure membrane method for measuring the suction properties of soil. J. Soil Sci. 12, 343–362. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1961.tb00924.x>
- Combeau, A., Quantin, P., 1963. Observations sur la capacité au champ de quelques sols ferrallitiques. Rapprochement avec les courbes pF-Humidité. Sci. Sol 1–7.
- Jamagne, M., Betremieux, R., Begon, J., Mori, A., 1977. Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. Bultin Tech. Inf. Ministère Agric. 324–325, 627–641.
- NF ISO 11274 Qualité du sol : Détermination de la caractéristique de la rétention en eau, méthodes de laboratoire, 1998.
- Perveen, N., Barot, S., Maire, V., Cotrufo, M.F., Shahzad, T., Blagodatskaya, E., Stewart, C.E., Ding, W., Siddiq, M.R., Dimassi, B., Mary, B., Fontaine, S., 2019. Universality of priming effect: An analysis using thirty five soils with contrasted properties sampled from five continents. Soil Biol. Biochem. 134, 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.03.027>
- R Core Team, 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Reatto, A., da Silva, E.M., Bruand, A., Martins, E.S., Lima, J.E.F.W., 2008. Validity of the Centrifuge Method for Determining the Water Retention Properties of Tropical Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 72, 1547. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0355N>
- Reis, R.M., Saboya, F., Tibana, S., Marciano, C.R., Ribeiro, A.B., 2013. Determination of soil-water retention curve for a young residual soil using a small centrifuge.
- Richards, L.A., Fireman, M., 1943. Pressure plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soil. Soil Sci. 56, 395–404. <https://doi.org/10.1097/00010694-194312000-00001>
- Riou, C., 1997. L'eau dans l'espace rural: production végétale et qualité de l'eau. Institut national de la recherche agronomique (INRA), Paris.
- Schofield, R.K., 1935. The pF of the water in soil. Trans. Third Int. Congr. Soil Sci. II, 37–48.
- Silva, E.M. da, Azevedo, J.A. de, 2002. Influência do período de centrifugação na curva de retenção de água em solos de Cerrado (traduit en français). Pesqui. Agropecuária Bras. 37, 1487–1494. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002001000017>
- Smagin, A.V., 2012. Column-centrifugation method for determining water retention curves of soils and disperse sediments. Eurasian Soil Sci. 45, 416–422. <https://doi.org/10.1134/S1064229312040126>

Soltner, D., 1986. Les bases de la production végétale : phytotechnie générale : le sol, le climat, la plante. Tome I, Tome I,.

ANNEXES

Annexe 1 : Liste des sols et triangles des textures.

Tableau 3 : Liste des sols avec leurs caractéristiques texturales (pourcentage d'argiles, de limons et de sables), leur position dans le triangle des textures, la teneur en matière organique (g C / 100g sol). Les sols choisis pour le test du temps optimum sont en gras.

N°	Profondeur (cm)	Type de culture	Pays	Argiles (%)	Limons (%)	Sables (%)	Triangle texture	C MS
27	0-20	tourbière	UK	30,5	36,2	33,3	A	21,97
40	0-20	culture blé intensif	France Limagne	38,8	20,7	40,5	A	1,91
23	0-20	Chernozem	Russie	49,3	48,7	2	ALO	5,15
30	0-23	arbres fruitiers (couleur rouge)	Vietnam	68	19	13	ALO	2,34
8	40-60	culture	France Grignon	27,6	66,2	6,2	LA	0,67
22	0-10	prairie (sol gris)	Russie	24,9	63,8	11,3	LA	3,23
14	40-60	forêt	Allemagne	28,3	38,2	33,5	LAS	0,43
17	0-20	forêt	Italie	29,8	43,3	26,9	LAS	4,06
45	0-20	prairie, Andosol	France Laqueuille	19,3	55	25,7	LAS	12,19
11	40-60	prairie, Andosol	France Laqueuille	7	48,1	44,9	LLS	1,85
7	0-20	culture	France Grignon	15,3	74,7	10	LM	1,68
21	0-20	Forêt, horizon humique	Québec	14,8	46,7	38,5	LS	6,71
32	0-20	prairie	France Theix ORE	25,8	25,4	48,8	LSA	3,90
16	0-20	prairie	Hongrie	10	4,9	85,1	S	4,40
18	0-20	culture (mil)	Niger	4,8	5,4	89,8	S	0,13
5	40-60	forêt de hêtres	Danemark	14,7	16,1	69,2	SA	0,33
26	0-20	prairie	UK	17,5	24,4	58,1	SA	2,26
15	0-20	sapin douglas, forêt de chênes	Hollande	6,2	17,4	76,4	SL	6,02
20	0-20	blé/coton	Pakistan	8,8	20,3	70,9	SL	1,18

3 5	0-20	Boigneville	France	limoneux
4 1	0-20	Landeyrat	France	tourbe
4 2	0-20	Ref_Reims	France	limoneux
4 3	0-20	validate	France Theix	LSA, forte MO
4 4	0-20	Plateforme	France Theix	LSA, forte MO
4 6	0-20	Laqueuille_intensif	France Laqueuille	LAS, forte MO

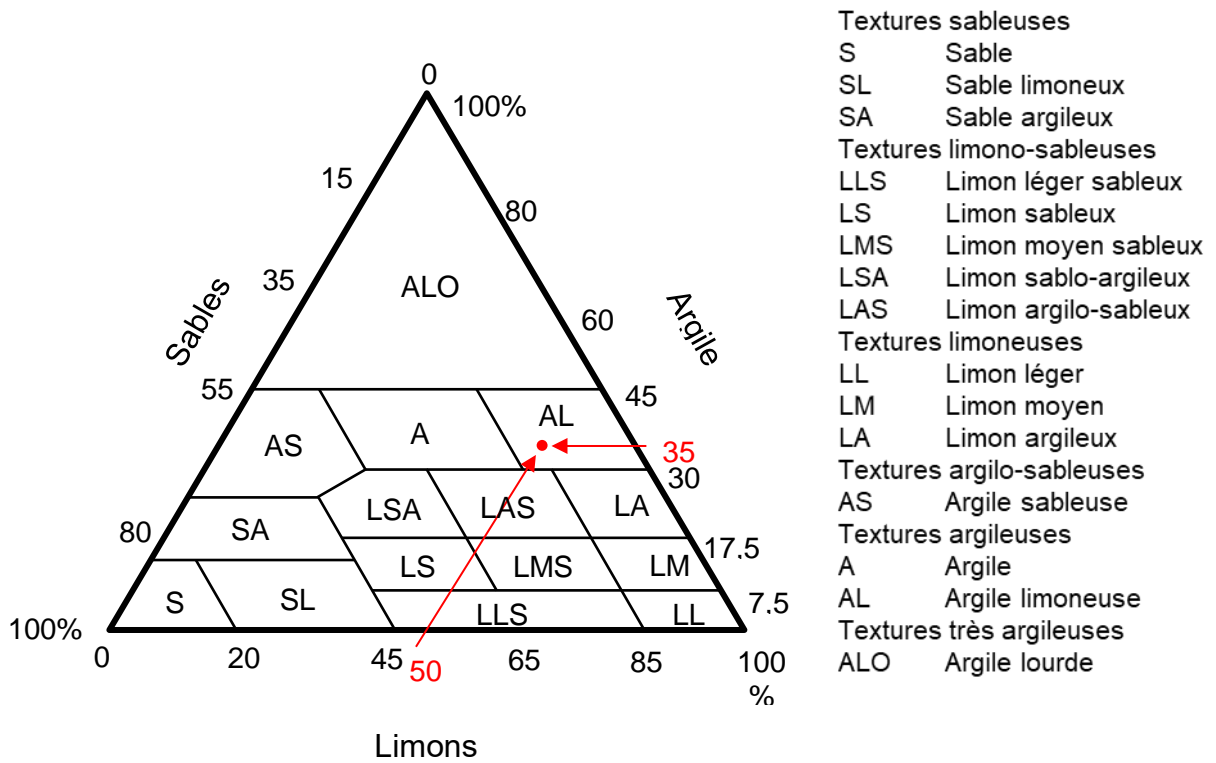


Figure 16 : Triangle de classification des textures de Jamagne (Baize, 1988) p31. Positionnement d'un échantillon dont A=35% et LT=50%.

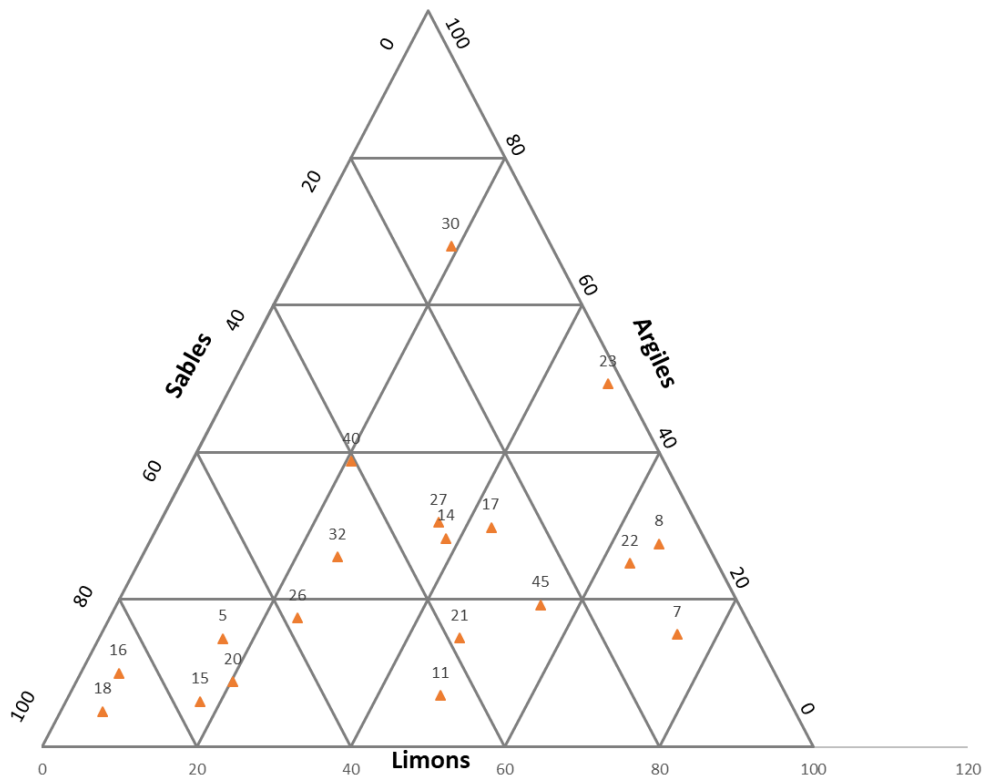


Figure 17 : Positionnement des échantillons sur le triangle des textures.

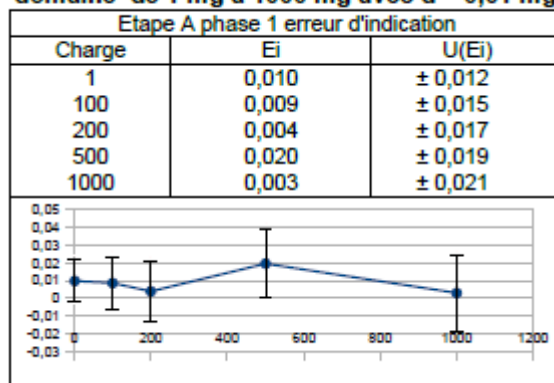
Annexe 2 : Nombre de mesures par sol pour chaque temps de centrifugation.

	Canada	Hollande	Hongrie	Laqueuille extensif	Limagne	Russie_cult
10 min	24	37	41	23	41	23
20 min	18	15	15	14	9	14
30 min	17	18	15	17	13	11
40 min	18	15	17	21	14	16
50 min	21	14	14	13	13	16
60 min	18	15	13	18	13	15

Annexe 3 : Appréciation de l'erreur relative sur les micropesées

Le certificat d'étalonnage de la balance de précision XP105 Mettler du laboratoire, utilisée pour effectuer les mesures donne les résultats suivants :

domaine de 1 mg à 1000 mg avec $d = 0,01$ mg



Donc pour une charge d'environ 500mg, l'incertitude est de $\pm 0,019$ mg, soit $\pm 0,02$ mg. Nous avons deux pesées (en frais, en sec) soit une incertitude de $2 \times 0,02 = \pm 0,04$ mg. Sur toutes les pesées enregistrées, nous avons calculé que l'incertitude variait de [0,03% ; 0,26%], donc inférieur à 0,5% dans tous les cas, donc l'erreur relative ne vient pas de la balance, mais le fait d'avoir une faible quantité de matière, l'échantillonnage peut être très hétérogène (présence d'un grain de sable qui peut alourdir, ou de matières organiques...).