

application de la psychrométrie par thermocouple en pédologie et en phytologie

La mesure de l'état énergétique de l'eau contenue dans le sol et les tissus végétaux complète celle de la teneur en eau par les méthodes radioactives.

L'auteur du présent article, le Professeur Walter H. Gardner a été détaché pour un an de l'Université d'Etat de Washington, à Pullman, Etats-Unis d'Amérique, pour travailler à la Division mixte FAO/AIEA de l'énergie atomique dans l'alimentation et l'agriculture.

Les techniques radioactives fondées sur l'atténuation ou la diffusion de neutrons ou de rayons gamma de faible énergie par l'eau jouent maintenant un rôle indispensable dans l'étude de l'eau contenue dans le sol et dans d'autres matériaux poreux. Ce sont les seules méthodes non destructives connues qui échappent aux incertitudes provenant de la non-unicité des relations teneur en eau-énergie pour l'eau retenue dans des matériaux poreux. Les mesures volumétriques de la teneur en eau à l'aide des méthodes radioactives comportent certaines limitations, mais elles ont néanmoins fourni, sur la quantité d'eau présente dans le sol, les renseignements qui permettent le mieux d'évaluer les besoins de l'irrigation et la quantité d'eau disponible pour les plantes au cours de leur croissance. Ces mesures ont aussi été extrêmement utiles de diverses manières pour les ingénieurs qui construisent sur des sols et d'autres matériaux poreux dont il importe de connaître la teneur en eau ou la densité. Toutefois, malgré tout son intérêt, la mesure volumétrique de l'eau contenue dans un matériau poreux ne rend pas entièrement compte de son humidification. A de nombreux égards, il

importe davantage de savoir avec quelles forces le matériau poreux retient l'eau. En fait, la mesure dans laquelle un matériau poreux semble sec ou humide au toucher dépend davantage des forces avec lesquelles il retient l'eau que de la quantité d'eau qu'il contient. Un sol — ou un matériau de construction — donné peut sembler humide au toucher alors que l'eau ne constitue que 5% de son volume tandis qu'un autre sol ou matériau ayant une texture plus fine et des pores plus fins peut ne pas sembler humide au toucher tant que l'eau ne représente pas 20 ou 30% de son volume. Toutefois, l'un et l'autre donneront probablement une même impression d'humidité au toucher si l'état énergétique de l'eau ou la force avec laquelle ils retiennent l'eau (énergie de rétention) est à peu près la même. Ce principe est important parce qu'il s'applique aux plantes qui croissent dans le sol et important encore parce qu'il affecte les propriétés mécaniques des matériaux poreux.

Il existe certes des relations entre la teneur en eau et l'état énergétique de l'eau retenue par un matériau poreux. Toutefois, ces relations varient considérablement avec la porosité et avec l'humidification. En outre, les matériaux poreux ne s'humidifient pas de la même manière chaque fois qu'on ajoute de l'eau et il peut y avoir dans la relation teneur en eau-énergie des différences considérables qui ne dépendent que de l'humidification antérieure. Dans certains cas, les différences sont suffisamment faibles pour qu'il soit possible de déduire des seules mesures de la teneur en eau des conclusions utiles sur les propriétés des matériaux poreux humides qui sont liées à l'énergie. Toutefois, tel n'est pas toujours le cas et les différences sont souvent assez importantes pour que de telles hypothèses conduisent à des erreurs graves. Il est donc évident qu'au moins deux propriétés des matériaux poreux humides qui sont liées à l'eau sont importantes, la teneur en eau et l'énergie nécessaire pour extraire l'eau.

Le présent article a trait à une méthode psychrométrique relativement nouvelle pour mesurer l'état énergétique de l'eau du sol, propriété complétant la teneur en eau qui peut être déterminée au moyen des techniques radioactives. Il n'est peut-être pas inutile toutefois de donner un aperçu des méthodes classiques de mesure. L'appareil le plus simple pour déterminer les forces avec lesquelles l'eau est retenue dans un sol, le tensiomètre, comporte un ballon poreux et une colonne d'eau, comme le montre la figure 1. L'eau est retenue dans les pores fins du récipient de manière à résister à la traction exercée par la colonne d'eau, h. L'eau peut passer du récipient dans le sol ou inversement jusqu'à ce que l'équilibre soit réalisé, et à ce moment la hauteur de la colonne d'eau, h, donne une indication de l'énergie nécessaire pour extraire l'eau (l'énergie potentielle par unité de volume est donnée par la formule ρgh où ρ est la densité de l'eau, g l'accélération due à la pesanteur et h la hauteur de la colonne d'eau). La colonne d'eau peut être remplacée par un manomètre au mercure ou un vacuomètre qui peut être placé de manière plus pratique au-dessus de la surface du sol. C'est une méthode utile pour les sols humides mais à mesure que le sol s'assèche, des phénomènes de cavitation dans la colonne d'eau limitent la hauteur que le manomètre peut supporter sans qu'il y ait rupture de la colonne. De ce fait, une partie appréciable des mesures intéressantes est hors de portée. Une méthode de laboratoire qui évite ce problème en utilisant des pressions positives peut être appliquée à des échantillons, mais on ne peut l'employer *in situ*.

La méthode psychrométrique pour la mesure de l'état énergétique de l'eau est fondée sur le fait que dans un matériau poreux ne contenant que de l'eau pure, la tension de vapeur dépend aussi des forces avec lesquelles l'eau est retenue à la surface et dans les pores du matériau, de la même manière qu'en dépend la hauteur de la colonne d'eau du tensiomètre. Ainsi, la mesure de la tension de vapeur dans le système poreux est semblable à celle du potentiel donné par l'équation de la figure 1. Le rapport p/p_0 donne le coefficient d'humidité relative et le rôle du psychromètre devient évident. La présence de matériaux solubles dans l'eau du sol affecte aussi l'état énergétique et le potentiel mesuré devient la somme des potentiels «matriciel et osmotique». Le tensiomètre ne mesure que le potentiel matriciel étant donné que les produits dissous peuvent traverser la paroi du ballon poreux. Avec une membrane osmotique,

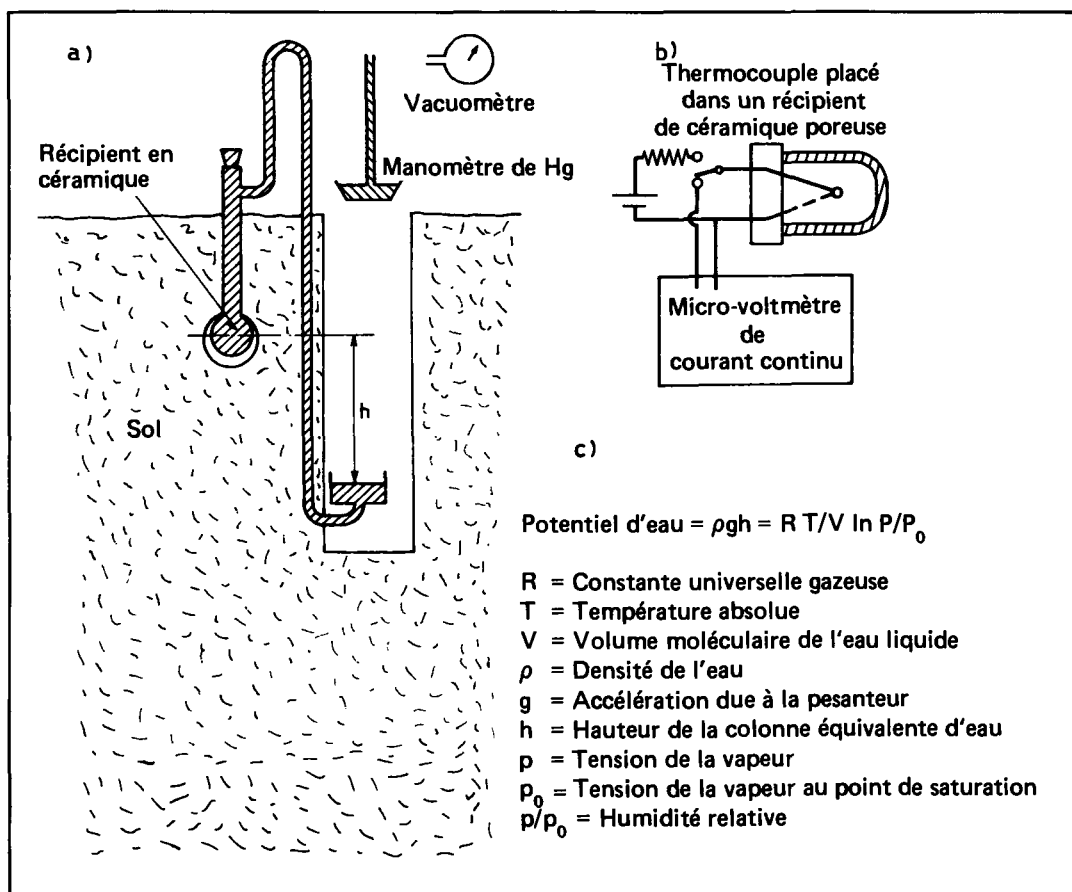


Figure I a) Diagramme d'un tensiomètre
 b) Diagramme d'un psychromètre
 c) Equation pour le potentiel de l'eau

l'appareil mesurerait aussi les potentiels matriciel plus osmotique. Néanmoins, la présence d'une membrane de cette nature ramènerait le temps de réaction de l'appareil à des niveaux où son usage ne serait plus pratique et on ne l'emploie donc pas de cette manière.

Le psychromètre utilisé pour la mesure de l'humidité du sol diffère sensiblement de l'appareil classique utilisé pour mesurer l'humidité de l'atmosphère. Ceci est dû au fait que dans la plupart des matériaux poreux toute la région d'intérêt est très proche de 100% d'humidité relative, région où une précision extrêmement élevée est nécessaire. En outre, la nature et les dimensions de l'élément détecteur du psychromètre doivent permettre l'enfouissement de l'appareil dans le sol. Le psychromètre utilisé est présenté sous forme graphique à la figure I. Il se compose d'un couple thermo-électrique en Chromel-Constantan construit en fil métallique fin sous microscope et placé dans un récipient poreux. Les soudures froides de ce couple thermo-électrique se trouvent à la base de l'appareil de sorte que lorsqu'on place de l'eau sur la soudure de mesure et qu'il y a évaporation, la différence de température mesurée est l'abaissement de la température indiqué par le thermomètre «humide» normalement nécessaire pour l'emploi des tableaux hygrométriques. Etant donné qu'il faut mesurer des températures de l'ordre du millième de degré Celsius, on a besoin d'un micro-voltmètre à



Un psychromètre fonctionnant sur la feuille d'une plante et dans le sol.

courant continu très sensible. Pour humidifier la soudure de mesure du thermocouple, on fait passer un petit courant continu (de 3 à 8 mA env.) à travers le thermocouple pendant 10 secondes environ dans un certain sens pour refroidir la soudure de mesure (refroidissement de Peltier). La soudure est refroidie en dessous du point de rosée et l'eau se condense sur la soudure. Lorsqu'on coupe le courant de refroidissement, l'eau s'évapore de la soudure dans l'atmosphère à une vitesse qui dépend de l'humidité relative de l'atmosphère. La différence de température entre la soudure de mesure et les soudures froides de la base de l'appareil au cours de la première partie de ce processus d'évaporation est l'abaissement de température du thermomètre «humide». Cet appareil ne réunit pas toutes les conditions nécessaires pour être un psychromètre parfait, pour lequel il existe des tableaux standards (de toute façon, il n'existe pas de tableaux suffisamment précis pour la région proche de la saturation), c'est pourquoi l'instrument est en général directement étalonné dans des unités de potentiel approprié au moyen d'atmosphères standard fournies par des solutions osmotiques.

Le psychromètre pour les sols est sensible à la température de sorte que l'appareil doit être placé assez profondément dans le sol pour que les variations de température soient faibles. Néanmoins, en plaçant des psychromètres semblables très près de grandes masses thermiques (par exemple un bloc d'aluminium de 2 x 2 x 3 cm), il est possible d'effectuer des mesures in situ des potentiels d'eau dans des feuilles en pleine croissance. Cet appareil est également utilisé en laboratoire sur des échantillons de sols et de tissus végétaux. Le laboratoire utilise de plus en plus cet appareil pour procéder à des mesures du potentiel osmotique de jus provenant de tissus végétaux broyés ou congelés.

Comme pour beaucoup d'appareils, il est difficile de donner la date à laquelle le psychromètre a été découvert et le nom de son inventeur. Néanmoins, il semble que le psychromètre a été utilisé pour la première fois pour des mesures de la teneur en eau du sol vers 1938 par L. A. Richards, au Laboratoire de salinité des Etats-Unis à Riverside (Californie). Richards a appliqué de l'eau à une petite soudure avec une pipette microscopique, en soumettant la température de l'ensemble à un contrôle précis, dans un bain spécial. Vers 1951, D. C. Spanner a utilisé en Angleterre l'effet Peltier pour mettre de l'eau sur le thermocouple, supprimant ainsi la nécessité d'accéder directement au thermocouple et éliminant les perturbations thermiques. On avait ainsi surmonté l'un des obstacles les plus difficiles qui s'opposaient à l'utilisation pratique de la découverte et permis de procéder à des mesures in situ. Le perfectionnement des techniques et leur application aux problèmes de phyto-pédologie se sont accélérés au début des années 1960, en grande partie grâce à une découverte de S. L. Rawlins, au Laboratoire de salinité des Etats-Unis qui a constaté qu'on pouvait éliminer presque entièrement les problèmes posés par la température en plaçant le thermocouple du psychromètre à l'intérieur d'un petit ballon poreux et en l'enterrant dans le sol où la vitesse des variations de température est faible. A cette époque, de nombreux laboratoires s'étaient intéressés à cette technique et au cours des dernières années des progrès considérables ont été réalisés.

La valeur pratique de la psychrométrie pour effectuer des mesures sur le sol et les plantes est liée à l'intérêt de suivre les changements de l'état énergétique de l'eau à mesure que celle-ci traverse le sol, passe du sol aux plantes et des plantes dans l'atmosphère, ainsi qu'à la nécessité d'identifier quelle propriété de l'eau est le plus directement associée avec la croissance végétale. On sait depuis longtemps que l'effet de l'eau sur la croissance végétale est lié davantage aux forces avec lesquelles l'eau est retenue dans le sol et dans les tissus qu'à la teneur en eau du sol proprement dite. Cependant, les méthodes de mesure de l'état énergétique étaient compliquées dans le meilleur des cas et les mesures in situ, impossibles. Avec le développement de la psychrométrie appliquée au sol et aux plantes, cette mesure est maintenant relativement facile. L'emploi généralisé de la psychrométrie a permis d'élaborer de nouveaux concepts et de mieux connaître la chaîne sol-plante-atmosphère, ainsi que d'obtenir de nombreux résultats pratiques qui ont permis d'améliorer les méthodes de gestion