

NORME  
INTERNATIONALE

**ISO**  
**10573**

Première édition  
1995-12-15

---

---

**Qualité du sol — Détermination de la  
teneur en eau de la zone non saturée —  
Méthode à la sonde à neutrons de  
profondeur**

iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

*Soil quality — Determination of water content in the unsaturated zone  
— Neutron depth probe method*

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/937741e6-8fb1-46f2-ac17-f45134c3b9f/iso-10573-1995>



Numéro de référence  
ISO 10573:1995(F)

## Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour vote. Leur publication comme Normes internationales requiert l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

La Norme internationale ISO 10573 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 190, *Qualité du sol*, sous-comité SC 5, *Méthodes physiques*.

Les annexes A, B, C, D et E de la présente Norme internationale sont données uniquement à titre d'information.

[ISO 10573:1995](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/937741e6-8fb1-46f2-ac17-f451134c3b9f/iso-10573-1995)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/937741e6-8fb1-46f2-ac17-f451134c3b9f/iso-10573-1995>

© ISO 1995

Droits de reproduction réservés. Sauf prescription différente, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

Organisation internationale de normalisation  
Case postale 56 • CH-1211 Genève 20 • Suisse

Imprimé en Suisse

# Qualité du sol — Détermination de la teneur en eau de la zone non saturée — Méthode à la sonde à neutrons de profondeur

**AVERTISSEMENT** — Les sondes à neutrons de profondeur contiennent des sources radioactives pouvant présenter un danger pour la santé et l'environnement lorsqu'elles sont mal utilisées, rangées ou jetées. Il est impératif de se conformer à la législation nationale et internationale et aux règlements en vigueur.

## 1 Domaine d'application

La présente Norme internationale prescrit une méthode in situ pour la détermination de la teneur en eau de la zone non saturée des sols à l'aide d'une sonde à neutrons de profondeur. Elle est applicable lorsqu'on poursuit des investigations sur la réserve en eau, sur l'équilibre de l'eau et sur la distribution de l'eau dans la zone non saturée du sol. Cette méthode étant non destructive, elle est particulièrement adaptée à des mesurages répétés au même emplacement. Plusieurs profils de la teneur en eau peuvent être obtenus en effectuant une série de mesurages à différentes profondeurs jusqu'au niveau de la nappe phréatique.

L'avantage de la méthode, comparée à d'autres, par exemple la méthode à la sonde gamma, est la rapidité à laquelle les mesurages peuvent être effectués. Elle présente cependant l'inconvénient de n'offrir qu'une résolution relativement faible des mesurages de profondeur.

## 2 Références normatives

Les normes suivantes contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui en est faite, constituent des dispositions valables pour la présente Norme internationale. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Toute norme est sujette à révision et les parties prenantes des accords fondés sur la présente Norme internationale

sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des normes indiquées ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur à un moment donné.

ISO 11272:—<sup>1)</sup>, *Qualité du sol — Détermination de la masse volumique apparente sèche.*

ISO 11461:—<sup>1)</sup>, *Qualité du sol — Détermination de la teneur volumique en eau du sol — Méthode gravimétrique.*

## 3 Définitions

Pour les besoins de la présente Norme internationale, les définitions suivantes s'appliquent.

**3.1 teneur en eau en fraction volumique,  $\theta$** : Volume d'eau s'évaporant du sol lorsque celui-ci est séché jusqu'à masse constante à 105 °C, divisé par le volume apparent original du sol.

### NOTES

1 La teneur en eau peut s'exprimer en pourcentage volumique ou en fraction volumique.

2 Dans la présente Norme internationale, la teneur en eau telle qu'elle est définie ci-dessus peut également être appelée «eau libre».

1) À publier.

3 La méthode de séchage du sol jusqu'à masse constante à 105 °C est décrite dans l'ISO 11461.

4 La méthode de détermination du volume apparent du sol est décrite dans l'ISO 11272.

## 4 Principe

Une sonde à neutrons de profondeur, constituée d'une source de neutrons et d'un détecteur de neutrons, est enfoncée dans un tube d'accès vertical dans le sol. La source de neutrons, généralement de type  $^{241}\text{Am-Be}$ , émet des neutrons à un niveau d'énergie cinétique élevée. Les neutrons perdent une partie de l'énergie lorsqu'ils entrent en collision avec des noyaux d'atome. Après plusieurs collisions, leur niveau d'énergie est réduit au niveau d'énergie thermique correspondant à la température ambiante. Ce niveau est très rapidement atteint lorsque les neutrons entrent en collision avec des noyaux d'atome d'hydrogène, leurs masses étant pratiquement égales.

Les neutrons thermiques forment un nuage stable dont la concentration est mesurée par le détecteur de la sonde. Le nombre de neutrons thermiques par unité de temps enregistré par le détecteur (le taux de comptage) correspond donc à une mesure de la concentration en noyaux d'hydrogène présents dans le sol à proximité de la sonde. La plupart de ces noyaux se trouvent généralement dans les molécules d'eau, le taux de comptage correspond donc également à une mesure de la teneur en eau du sol. Une courbe d'étalonnage est utilisée pour convertir le taux de comptage des neutrons en valeur de teneur en eau du sol.

### NOTES

5 Le taux de comptage des neutrons obtenu est affecté par la présence de tous les noyaux d'atome présents dans le sol. Cependant, à une teneur en eau donnée, le taux de comptage peut être majoré dans certains types de sols par la thermalisation des neutrons que provoque leur collision avec les noyaux d'atome de certains éléments constitutifs du sol, ou par le nombre important de molécules d'hydrogène présentes dans des substances autres que l'eau libre. Toutefois, le taux de comptage peut être minoré par l'absorption de neutrons de noyaux présentant une importante section efficace d'absorption atomique. Voir l'annexe A.

6 Le volume de sol (volume de mesurage) auquel le mesurage se rapporte est pratiquement sphérique. Pour un type donné de sonde à neutrons, le rayon de la sphère est fonction de la densité totale des noyaux d'atome présents dans le sol. Pour la plupart des sondes commercialisées, le rayon du volume d'où proviennent 95 % des neutrons comptés par le détecteur («sphère d'influence»<sup>[1]</sup>) peut varier de 0,1 m à 0,2 m dans les sols mouillés à 0,8 m ou plus dans les sols secs (sablonneux). En conséquence, le mesurage obtenu à une profondeur donnée dépend de la répartition de la teneur en eau dans le volume de mesurage à cet instant, et de tout autre gradient de la composition du sol. C'est pourquoi, la reproduction graphique du résultat du mesurage d'une teneur en eau donnée à une certaine pro-

fondeur n'est possible que lorsque les répartitions de la teneur en eau et de la composition du sol dans le volume de mesurage sont invariables dans le temps. Il est important de tenir compte de cette exigence (concernant l'invariabilité temporelle des gradients) pour l'étalonnage de la sonde à neutrons de profondeur. Voir l'annexe A.

7 La forme et les paramètres de la courbe d'étalonnage dépendent (voir [2] de l'annexe E):

- de la composition chimique de l'horizon de sol considéré, ainsi que de sa masse volumique;
- des gradients de sa composition rencontrés dans le volume de mesurage;
- des gradients dans la teneur en eau du sol rencontrés dans le volume de mesurage;
- de la méthode d'installation du tube d'accès;
- des caractéristiques de ce tube d'accès;
- des spécifications de l'appareil utilisé.

En général, à chaque horizon de sol correspond une courbe d'étalonnage qui lui est propre. Dans les couches homogènes plus épaisses que le volume de mesurage, les courbes d'étalonnage sont généralement linéaires; leurs paramètres étant fonction de la composition du sol. Toutefois, dans le cas de couches minces ou hétérogènes, les courbes d'étalonnage seront souvent non linéaires eu égard aux différents effets de gradients dans la composition du sol et à la teneur en eau aux états secs et mouillés.

## 5 Appareillage

**5.1 Sonde à neutrons de profondeur**, consistant en une source de neutrons rapides et en un détecteur de neutrons thermiques, associés à un dispositif de mesure.

**5.2 Tube d'accès à paroi mince**, dont le diamètre intérieur est un peu plus large que celui de la sonde à neutrons. Le tube doit être fabriqué en un matériau très «transparent» aux neutrons rapides et thermiques (par exemple aluminium, alliage d'aluminium) et résistant à la corrosion chimique ainsi qu'aux déformations possibles lors de son installation. L'acier inoxydable, la fonte galvanisée et le plastique (polyéthylène) conviennent également, même si leur transparence aux neutrons est plus faible.

**5.3 Équipement permettant d'installer les tubes d'accès.**

**5.4 Équipement pour sécher et nettoyer les tubes d'accès**, le cas échéant, une fausse sonde permettant de vérifier les performances du tube.

**5.5 Courbes d'étalonnage**, pour la conversion du taux de comptage en teneur en eau.

**5.6 Appareillage normal pour le prélèvement des échantillons de sol**, pour les étalonnages effectués sur le terrain, permettant de déterminer la teneur volumique en eau  $\theta$  par gravimétrie, conformément à l'ISO 11461.

## 6 Mode opératoire

### 6.1 Installation des tubes d'accès

L'emplacement doit être représentatif de l'environnement immédiat et il faut veiller à éviter toute concentration d'eau de surface à cet endroit. Utiliser un plancher pour éviter de causer des dégâts dans la végétation environnante ainsi que toute compaction de la surface du sol lors de l'installation du tube. Veiller autant que possible à éviter toute compaction du sol autour et en dessous du tube, ainsi qu'à ne pas créer de vides autour de celui-ci.

Installer les tubes d'accès selon l'une des méthodes suivantes.

- a) Enfoncer le tube dans le sol à l'aide d'un marteau et le vider à l'aide d'une tarière de type spirale. Pour empêcher toute infiltration d'eau souterraine, il est recommandé de boucher l'extrémité inférieure du tube avec du ciment à prise rapide ou un bouchon.
- b) Enfoncer le tube dans un trou de diamètre identique ou légèrement inférieur et de la profondeur requise, puis boucher l'extrémité inférieure comme en a). On peut également boucher l'extrémité inférieure avant l'insertion du tube.

Les trous peuvent être préparés à l'aide d'un tube d'accès ou d'une tarière de type spirale, ou par une combinaison de ces deux méthodes. Fermer le sommet du tube hermétiquement à l'aide d'un bouchon en caoutchouc pour éviter toute pénétration d'eau de pluie ou de surface. L'intérieur du tube doit toujours rester sec.

#### NOTES

8 Il est recommandé que les tubes d'accès soient coupés aussi près du sol que l'usage de l'appareil le permet, afin de minimiser la dose de radiations reçue par l'opérateur descendant la sonde.

9 Des directives d'installation plus spécifiques sont données en [3] et [4] de l'annexe E.

Après l'installation, éviter soigneusement toute perturbation du sol et de la végétation environnante au cours des mesurages à l'intérieur du tube d'accès.

### 6.2 Étalonage

Le plus souvent, les courbes d'étalonnage fournies par le fabricant de sondes à neutrons, et celles pu-

bliées dans les ouvrages de référence ne donnent qu'une indication grossière de la teneur absolue en eau du sol, parce que les influences spécifiques au site, dont il est question à la note 7 de l'article 4, n'ont pas été suffisamment prises en compte, si elles l'ont jamais été (voir également l'annexe A).

L'influence de la composition chimique et de la masse volumique apparente (voir A.2) est prise en compte dans les étalonnages théoriques calculés à partir des sections efficaces d'interaction macroscopique des neutrons du sol considéré (voir [1], [4], [9] de l'annexe E).

L'influence combinée des gradients de la teneur en eau, de la composition chimique et de la masse volumique apparente ne peut être prise en compte que par un étalonnage effectué sur le terrain. Pour obtenir une mesure absolue précise de la teneur en eau, il est donc nécessaire de procéder à un étalonnage in situ sur le terrain.

L'étalonnage sur le terrain se base sur la détermination simultanée du taux de comptage neutronique et de l'échantillonnage pour déterminer la teneur volumique en eau de chaque couche du sol, conformément à l'ISO 11461, dans différentes conditions hydrologiques, afin d'obtenir une courbe d'étalonnage pour chaque couche du sol.

NOTE 10 La subdivision en horizons du profil du sol est déterminée au départ par les différences dans la composition du sol, mais il convient de prendre également en considération la forme des gradients de la teneur en eau du sol, dont la récurrence est systématique. D'autres divisions peuvent s'avérer nécessaires pour atteindre les objectifs de l'investigation.

Les conditions hydrologiques dans lesquelles l'étalonnage est effectué doivent différer les unes des autres autant que possible, afin que les courbes d'étalonnage soient représentatives de la plage des conditions du site. Pour satisfaire autant que possible à l'exigence de gradients invariables dans le temps, l'étalonnage ne doit pas être effectué après de fortes pluies ou des travaux d'irrigation, ou immédiatement après l'installation soudaine d'un temps très chaud.

Déterminer les courbes d'étalonnage en effectuant l'analyse, par régression, des différentes combinaisons du taux de comptage neutronique et de la teneur en eau de chaque couche de sol. Le taux de comptage est considéré comme la variable indépendante ( $x$ ) et la teneur en eau, comme la variable dépendante ( $y$ ). Les courbes d'étalonnage ainsi calculées sont spécifiques de la sonde à neutrons utilisée. L'utilisation de comptages standards pour normaliser les mesurages des taux de comptage utilisés dans la régression, permet d'appliquer les étalonnages à différentes sondes de même géométrie (voir l'annexe C).

Des directives supplémentaires concernant l'étalonnage sur le terrain sont données en [2], [3] et [4] de l'annexe E et dans l'annexe B.

## NOTES

11 Les processus suivants peuvent faire varier dans le temps les courbes d'étalonnage:

- modification de la composition chimique du sol y compris celle de l'eau du sol, et modification de la masse volumique apparente. Cela peut être corrigé jusqu'à un certain point sur la base de propriétés (chimiques) connues (voir [3] de l'annexe E);
- diminution de la source d'énergie de la sonde, due à la décroissance radioactive et/ou diminution de la sensibilité du détecteur. Ceci peut être corrigé en utilisant des comptages standards effectués dans un milieu dont les caractéristiques sont invariables (voir l'annexe C).

12 Les directives données ici s'appliquent aux mesurages de la teneur absolue en eau. Lorsque uniquement des mesurages relatifs sont à effectuer (c'est-à-dire des variations dans le temps de la teneur en eau), les exigences concernant l'étalonnage et l'exactitude peuvent être moins sévères.

### 6.3 Mesurages

La sonde à neutrons de profondeur doit être utilisée autant que possible conformément aux instructions du fabricant, en particulier en ce qui concerne les aspects techniques de sa manipulation et la sécurité.

Descendre la sonde dans le tube d'accès à la profondeur à laquelle le mesurage doit être effectué.

Effectuer les comptages selon l'une des méthodes suivantes:

- a) sur une durée déterminée; dans ce cas le nombre de neutrons thermiques détectés est enregistré;
- b) sur un nombre déterminé de neutrons; dans ce cas la durée de comptage est enregistrée.

## NOTES

13 Lorsque la variation dans le temps de la teneur en eau est à déterminer, il est important de positionner précisément la sonde à une profondeur spécifiée.

14 La seconde méthode de comptage mentionnée présente l'avantage de donner une exactitude de mesure relativement constante (c'est-à-dire exactitude du taux de comptage) alors que, dans la première méthode, l'exactitude dépend de la teneur en eau.

Au lieu d'effectuer un seul comptage sur une longue durée, il peut s'avérer de meilleur rapport d'en effectuer plusieurs sur des temps relativement courts car cela permet de fournir des informations quantitatives sur la dispersion des mesures. Cette information permet la détection de certains types de défaillance de l'appareillage.

Il est recommandé que les comptages standards effectués dans un milieu aux caractéristiques invariables, tel qu'un grand baril d'eau (voir C.3.1), soient

effectués à intervalles suffisamment fréquents pour permettre la vérification des performances globales de l'instrument. Par exemple, un comptage standard peut éventuellement être effectué au début et à la fin de chaque série de mesurages dans un tube d'accès spécifique. Une certaine dérive dans le comptage standard est attendu. Toutefois, une variation subite du schéma général indique avec une quasi certitude que l'appareil connaît une défaillance et qu'il faut alors le réparer ou le remplacer.

### 6.4 Sécurité et entretien

**PRÉCAUTIONS DE SÉCURITÉ — La source radioactive de la sonde à neutrons de profondeur présente un danger potentiel pour l'opérateur, le public et l'environnement. La plupart des gouvernements et des organisations ont des règlements ayant force de loi pour tout ce qui touche à l'achat, le fonctionnement, le transport, le stockage et l'élimination des dispositifs radioactifs. Il s'agit de les respecter. En l'absence de règlements spécifiques concernant la sécurité des sources radioactives, il convient de consulter les directives données par l'Agence internationale de l'énergie atomique [6], [7] et la Commission internationale de protection radiologique [8].**

La période radioactive de l'américium (458 ans), couramment utilisé dans les sondes à neutrons de profondeur, dépasse la durée pendant laquelle l'intégrité du conteneur de la source peut être garantie (par exemple environ 30 ans). Lorsqu'une sonde à neutrons n'est plus requise, la source radioactive doit être mise au rebut dans un conteneur pour déchets radioactifs.

Les sondes à neutrons de profondeur doivent être utilisées uniquement par des opérateurs ayant reçu une formation adéquate. L'entretien doit être effectué uniquement par des personnes compétentes. Des vérifications périodiques de la source scellée doivent être effectuées par une agence compétente, afin de détecter d'éventuelles fuites.

## 7 Expression des résultats

Calculer le taux de comptage  $R$ , nombre de neutrons thermiques détectés par unité de temps, à l'aide de l'équation suivante:

$$R = \frac{N}{t}$$

où

$R$  est le taux de comptage, en coups par minute;

- $N$  est le nombre de neutrons thermiques comptés;
- $t$  est le temps de comptage, en minutes.

Calculer la teneur en eau  $\theta$ , à l'aide de l'équation suivante:

$$\theta = f(R, p)$$

où

- $\theta$  est la teneur en eau, exprimée en fraction volumique;
- $f$  est la fonction d'étalonnage (courbe d'étalonnage) calculée par analyse de régression;
- $R$  est le taux de comptage, en coups par minute;
- $p$  représente les paramètres de la courbe d'étalonnage.

Si nécessaire, le taux de comptage peut être corrigé pour tenir compte de la différence entre le taux de comptage standard effectif ( $R_s$ ) et le taux de comptage standard attendu ( $R_{se}$ ). Dans la plupart des cas, une correction de type  $R' = R(R_{se}/R_s)$  peut être appliquée, où  $R'$  est le taux de comptage corrigé. Pour plus de précisions, voir l'annexe C.

## 8 Exactitude

**8.1** L'exactitude de la détermination de la teneur en eau par la sonde à neutrons est principalement affectée par les causes d'erreur suivantes.

- a) Dispersion des comptages individuels ou des temps de comptage, résultant des variations aléatoires du nombre des neutrons émis par la source.

L'importance de cette erreur est exprimée en général comme l'écart-type du nombre de neutrons comptés. Comme le processus d'émission suit une distribution de Poisson, l'écart-type résultant du nombre de neutrons détectés est

$$s_N = \sqrt{N}$$

- b) Inexactitude de la courbe d'étalonnage utilisée.

Elle peut se déterminer à partir des résultats de l'analyse par régression dont on a déduit la courbe. Les sources d'erreur suivantes peuvent être distinguées au sein même d'un étalonnage effectué sur le terrain:

- variabilité dans l'espace sur le plan horizontal de la teneur en eau du sol pendant l'étalonnage sur le terrain;

- petites fluctuations dans la forme du profil de la teneur en eau lors de l'étalonnage sur le terrain, dues aux conditions de régime non stationnaire (voir également l'annexe A).

Cumulées, ces influences déterminent l'écart-type résiduel de la courbe de régression, c'est-à-dire la courbe d'étalonnage (erreur type de la régression).

- c) Inexactitude de la profondeur à laquelle la sonde a été placée, par rapport à la profondeur d'étalonnage, particulièrement en présence d'importants gradients de teneur en eau.

**8.2** En présence de variations importantes dans la forme du profil de la teneur en eau, résultant par exemple de l'existence de fronts d'humectation ou d'évaporation importants, les courbes d'étalonnage sont moins fiables et l'exactitude décroît en proportion.

**8.3** Lorsque l'étalonnage et les mesurages sur le terrain sont effectués dans les conditions décrites dans la présente Norme internationale, l'exactitude sur la teneur en eau calculée sera également déterminée par le nombre de comptages effectués pour chaque mesurage [voir 8.1 a)], par le nombre d'échantillons pour la détermination par gravimétrie prélevés pour chaque couche de sol et/ou pour chaque site d'échantillonnage [voir 8.1 b)] ainsi que le nombre et la gamme des différents types de conditions hydrologiques d'échantillonnage. En ce qui concerne les sols sablonneux raisonnablement homogènes dans l'espace, une exactitude de 0,005 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> à 0,01 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, ou de 0,5 % (V/V) à 1,0 % (V/V) de chaque teneur en eau calculée peut être atteinte assez facilement (voir [2] de l'annexe E). Pour les sols dont la teneur en eau est moins homogène dans l'espace (en particulier les sols argileux, limoneux ou tourbeux), cette exactitude est plus difficile à atteindre. Des informations supplémentaires concernant la manière dont les mesurages doivent être effectués ainsi que la détermination de l'exactitude sont données dans l'annexe D.

**8.4** Certaines erreurs systématiques (sur le positionnement de la courbe d'étalonnage, par exemple) étant éliminées, l'exactitude des mesures relatives ou différentielles de la teneur en eau (c'est-à-dire la variation de cette teneur dans le temps) sera toujours plus grande que celle des mesures absolues. Pour calculer l'exactitude de la mesure différentielle de la teneur en eau, les causes d'erreur énumérées en 8.1 a), b) et c) peuvent constituer un point de départ à l'analyse de la propagation des erreurs, en utilisant les équations correspondantes (c'est-à-dire la courbe d'étalonnage et l'équation permettant le calcul de la teneur en eau différentielle).

## 9 Rapport d'essai

Le rapport d'essai doit contenir les informations suivantes:

- a) une référence à la présente Norme internationale;
- b) une description précise du lieu d'échantillonnage et des caractéristiques du profil du sol;
- c) une description des procédures d'installation des tubes d'accès;
- d) une référence à une description précise de l'appareillage utilisé, ainsi qu'à toutes les caractéristiques de performance nécessaires;
- e) les données concernant les courbes d'étalonnage utilisées;
- f) la teneur en eau aux différentes profondeurs, exprimée en mètres cubes par mètre cube de sol;
- g) toute observation pouvant être importante pour l'interprétation des résultats, telle que les conditions hydrologiques et météorologiques avant et pendant les mesurages.

iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

[ISO 10573:1995](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/937741e6-8fb1-46f2-ac17-f451134c3b9f/iso-10573-1995)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/937741e6-8fb1-46f2-ac17-f451134c3b9f/iso-10573-1995>

## Annexe A (informative)

### Informations nécessaires à l'étalonnage de la sonde à neutrons de profondeur

#### A.1 Introduction

La présente annexe traite des problèmes théoriques que pose, dans des circonstances pratiques, l'étalonnage d'une sonde à neutrons.

#### A.2 Principaux facteurs pouvant affecter les mesurages à la sonde à neutrons de profondeur

Plusieurs facteurs peuvent affecter le taux de comptage mesuré à une teneur en eau donnée. Une distinction peut être effectuée entre les effets dits homogènes et les effets hétérogènes. Le premier groupe renvoie aux effets se produisant lors de mesurages dans un milieu homogène, c'est-à-dire un sol dont la composition (chimique) et la teneur en eau sont uniformes. Le second groupe renvoie spécifiquement aux effets produits par les gradients de ces paramètres dans le volume de mesurage.

##### A.2.1 Effets homogènes

Lorsque des mesurages sont effectués avec une sonde à neutrons de profondeur dans un milieu homogène, le taux de comptage à une teneur en eau (libre) donnée est affecté par les processus suivants.

- a) La thermalisation résultant des collisions des neutrons avec des noyaux d'atome autre que les noyaux d'hydrogène présents dans le volume de mesurage.

L'oxygène et le silicium comptant parmi les constituants du sol les plus importants, leurs noyaux sont également les plus importants. Cependant, alors que 17 collisions en moyenne avec un noyau d'hydrogène sont nécessaires pour faire passer un neutron d'une énergie initiale de 1 MeV à un niveau d'énergie thermique de 1/40 eV, 136 collisions sont nécessaires avec un noyau d'oxygène et 240, avec un noyau de silicium (voir [10] de l'annexe E). L'hydrogène présent domine donc le processus de thermalisation.

- b) Les collisions avec les noyaux d'hydrogène présents dans
- 1) l'eau liée ( $H_2O$ ); ou dans
  - 2) d'autres composés contenant de l'hydrogène.

La catégorie 1) se réfère à de l'eau qui ne s'évapore pas lorsque le sol est séché selon la procédure prescrite dans l'ISO 11461.

Les catégories 1) et 2) incluent

- l'eau présente dans les pores;
- l'eau intercrystalline, telle que l'eau entre les plaques d'argile;
- l'eau intracrystalline, c'est-à-dire l'eau de cristallisation;
- l'hydrogène présent dans les hydroxydes d'aluminium (sols de bauxite/latérite) ou dans les composés organiques (sols tourbeux).

Dans tous les cas la présence d'hydrogène dans de tels composés peut avoir un effet significatif sur le procédé de thermalisation.

- c) L'absorption des neutrons thermiques par des noyaux ayant une grande section efficace d'absorption. Les éléments les plus importants dans le contexte des sols sont le bore, le chlore, le fer et l'azote parce qu'ils sont particulièrement abondants dans certaines situations.

Les facteurs dont il est question en a) et en b) majoritent le taux de comptage mesuré pour une teneur en eau donnée. Alors que l'absorption des neutrons thermiques [voir c)], au contraire, fait baisser le taux de comptage. L'influence de tous ces facteurs peut varier dans le temps avec les variations de la concentration des composés impliqués. Ceci est particulièrement vrai en ce qui concerne les matières organiques (oxydation), le fer ainsi que d'autres métaux et minéraux (lessivage influencé par la genèse du sol), le chlore (lorsqu'il s'agit de sols salins) et l'azote (fertilisation et lessivage).

Les modifications de la masse volumique apparente du sol, causées par exemple par l'agriculture, modifient

la concentration de tous les composés présents dans le sol et donc les effets des facteurs mentionnés en a), b) et c).

### A.2.2 Effets non homogènes

Les effets non homogènes surviennent en présence de gradients dans la composition du sol et/ou dans la teneur en eau à l'intérieur du volume de mesurage. Pour une teneur en eau donnée à une certaine profondeur, le taux de comptage de la sonde intègre la répartition de la teneur en eau sur tout le volume de mesurage. Ceci est également influencé par la fonction de réponse aux impulsions du détecteur (c'est-à-dire la répartition de la sensibilité). Si, à cette profondeur, cette même teneur en eau est répartie différemment, le résultat donné par la sonde sera différent. Ainsi, pour les mesurages reproductibles, il convient que la répartition de la teneur en eau à une certaine profondeur et à une teneur en eau donnée soit invariable dans le temps. Cette condition peut être considérée comme une exigence de base pour l'étalonnage de la sonde à neutrons de profondeur.

Le volume d'influence du mesurage dépendant de la densité de la totalité des noyaux d'atome [2], la répartition asymétrique dans le volume de mesurage constitue un autre facteur. Ceci a pour résultat une sous-estimation nette de la teneur en eau moyenne dans le volume de mesurage en présence d'un gradient de teneur en eau, quelle que soit sa direction. Cet effet peut également être appelé effet d'interface.

En pratique, les effets d'interface les plus importants surviennent à la surface du sol (interface sol/air) et, également, souvent à l'interface entre un sol de surface riche en humus et le sous-sol ou la roche mère.

### A.3 État hydrologique de l'eau du sol

Les gradients invariables dans le temps de la teneur en eau apparaissent dans certaines conditions hydrologiques. À tout moment, la répartition verticale de la teneur en eau est commandée par le type d'écoulement prévalant dans la zone insaturée. Dans les sols dont la nappe phréatique est peu profonde, deux types d'écoulement peuvent être distingués.

#### a) Régime stationnaire (conditions à l'équilibre)

Il est caractérisé par une répartition verticale constante de la teneur en eau (profil d'humidité en régime permanent), pour des conditions données de l'horizon de surface (charge hydraulique  $h$ ) et à une profondeur  $d$  donnée du niveau de la nappe phréatique (niveau de l'eau souterraine), dites variables d'état. Ceci résulte en un écoulement capillaire invariable dans le temps et dans l'espace (profondeur). Chaque fois qu'une combinaison de ces variables d'état apparaît, les mêmes gradients sur le site apparaîtront. On néglige ici l'effet d'hystérésis des caractéristiques physiques du sol.

#### b) Régime non stationnaire (conditions de non équilibre)

Il est caractérisé par une répartition verticale variable de la teneur en eau pour une combinaison donnée des variables d'état  $h$  et  $d$ . Des différences locales dans la répartition de la teneur en eau peuvent donc apparaître dans le volume de mesurage, pour une teneur en eau donnée mesurée à une certaine profondeur et pour une combinaison donnée des variables d'état. Les conditions de régime non stationnaire résultent le plus souvent de pluies orageuses (fronts d'humectation) ou après tout changement brutal des conditions hydrologiques, et donc aussi après une période de sécheresse aiguë (fronts d'évaporation).

En pratique, on constate que les changements des conditions hydrologiques dans la zone insaturée se produisent à un rythme saisonnier et correspondent à une séquence de combinaisons  $h$  et  $d$ . À tout moment, cette combinaison peut varier autour de la combinaison moyenne. Ceci résulte en de légères divergences entre les différentes mesures de teneur en eau. L'effet d'hystérésis est similaire. Dans les étalonnages sur le terrain, ces différences se manifestent par la dispersion des points d'étalonnage de part et d'autre de la courbe d'étalonnage, affectant donc l'exactitude de cette courbe.

Pour les sites où la nappe phréatique est peu profonde, les exigences suivantes s'appliquent.

L'exigence concernant l'invariabilité dans le temps des gradients (locaux) ne peut être satisfaite que lorsque les variables d'état peuvent être déterminées et qu'un régime stationnaire s'établit. Dans la pratique, la profondeur de la nappe phréatique est la plus sensible des variables d'état, car, pour la forte pente de la courbe de rétention d'eau  $d\theta/dh$  à cet endroit (c'est-à-dire  $h$  voisin de zéro), le gradient de teneur en eau est proportionnel au seuil de saturation des potentiels (répartition de la pression hydrostatique). Ainsi, pour une profondeur donnée du niveau de la nappe phréatique, la plus grande modification dans le profil de la teneur en eau causée par la modification du sol de surface, se produira à proximité du niveau de la nappe phréatique. Mais, dans de pareilles conditions d'humidité, le rayon du volume de mesurage, ainsi que l'effet d'interface, est minime. Inversement, le rayon du volume de mesurage sera plus grand à proximité du sol de surface, alors que le gradient de teneur en eau sera plus petit. D'où le fait que les conditions du sol de surface sont moins sensibles en ce qui concerne l'exigence d'invariabilité dans le temps des gradients.

En l'absence d'une nappe phréatique peu profonde permanente, des conditions de régime non stationnaire prévaudront. Il convient d'éviter, lors d'un étalonnage, les conditions survenant lors d'avancées notables de fronts d'humectation ou d'évaporation dans le sol.

## Annexe B (informative)

### Étalonnage sur le terrain

#### B.1 Introduction

La présente annexe donne les informations nécessaires à l'étalonnage sur le terrain de la sonde à neutrons de profondeur et traite des procédures à suivre pour ce faire.

#### B.2 Procédures d'étalonnage sur le terrain

En raison des informations de l'annexe A, veiller, en procédant à l'étalonnage, à ce que

- a) l'étalonnage sur le terrain soit effectué autant que possible dans des conditions de régime stationnaire;
- b) le moment de l'étalonnage soit, si possible, choisi de façon à être représentatif des conditions hydrologiques typiques du moment de l'année en cours.

Ceci permet de calculer des courbes d'étalonnage représentatives de tous les mesurages subséquents, effectués dans des conditions semblables.

L'étalonnage sur le terrain est basé sur la détermination simultanée des taux de comptage et sur l'échantillonnage par gravimétrie dans une couche de sol donnée.

Il peut y avoir d'autres approches pour l'étalonnage sur le terrain. Des revues utiles aux procédures d'étalonnage de sondes à neutrons de profondeur sont données aux références [3] et [4] de l'annexe E. Le degré d'exactitude souhaité pour les mesures de la teneur en eau dépend des objectifs de l'investigation; il convient de prendre en considération ces exigences (extérieures) lors du choix de la procédure d'étalonnage.

Quelle que soit la méthode choisie, il est d'abord nécessaire de distinguer la répartition des différentes couches du sol et de déterminer les profondeurs auxquelles les données nécessaires à l'étalonnage sont à collecter. Celles-ci sont en général apparentes dans la constitution même du profil du sol, parce que les gradients de teneur en eau les plus importants apparaîtront aux transitions dans la texture et la composition

du sol. Des distinctions supplémentaires peuvent être faites, en fonction des objectifs poursuivis. En principe, il n'existe pas, pour les besoins de l'étalonnage, de distance minimale entre deux profondeurs auxquelles des mesurages sont effectués. Cependant, l'exactitude relative sur les mesures différentielles de teneurs en eau va décroître avec la diminution de ces différences. Une différenciation sur la verticale qui est trop importante sera donc moins significative.

Il existe pour l'étalonnage sur le terrain, deux approches principales, décrites en B.2.1 et B.2.2, que l'on peut également combiner.

#### B.2.1 Tube d'accès permanent; méthode d'étalonnage fixe

Les comptages sont effectués aux profondeurs choisies dans un tube d'accès et les échantillons destinés à la détermination par gravimétrie de la teneur en eau en tant que fraction volumique (conformément à l'ISO 11461) sont prélevés à ces différentes profondeurs autour du tube d'accès, mais à une distance d'au moins 1 m. Répéter cet exercice plusieurs fois de sorte que les données soient représentatives de toute la gamme des conditions hydrologiques du sol du site. Les étalonnages ainsi obtenus sont spécifiques au tube d'accès du site. On peut raisonnablement croire que, pour un mesurage ponctuel dans un sol homogène, la variabilité dans l'espace est en général « saturée » au bout de quelques mètres (c'est-à-dire au bout de la distance où l'on a atteint la variabilité maximale sur une faible distance). Il convient que les sites d'échantillonnage soient répartis dans un cercle de 2 m de rayon environ, ce qui réserve, en général, assez de place pour des échantillonnages répétés sans altération notable du profil hydrologique des environs du tube d'accès.

#### B.2.2 Tubes d'accès temporaires; méthode d'étalonnage ambulatoire

Un ou plusieurs tube(s) d'accès est (sont) installé(s) à proximité du site de mesurage. Les comptages sont effectués dans chacun d'entre eux aux profondeurs choisies et ensuite les échantillons sont prélevés aux mêmes profondeurs à proximité immédiate des tubes (c'est-à-dire dans le volume de mesurage de la sonde),