

INTRODUCTION

Le sol est défini comme étant la couche superficielle de la croûte terrestre. Il représente un système physique dont la composition, la structuration et la texture sont en évolution permanente à la suite des actions biologiques et des altérations causées par les agents aussi bien climatiques qu'humains.

L'étude de la physique du sol peut être menée suivant deux branches de discipline différentes :

- d'une part, celle qui est axée sur l'évolution de sa composition et de sa structuration ainsi que sur les processus physiques qui en sont à l'origine, indépendamment des charges externes (exemples : dérive des continents, mouvement des plaques tectoniques, etc.)
- d'autre part, celle qui se rapporte à l'analyse du comportement du sol vis-à-vis des actions de l'écosystème (précipitation, végétation, cyclone, etc.) et des travaux d'aménagement réalisés par l'homme (mise en place d'infrastructures routières, construction de bâtiments, creusement de tunnels, etc.)

Le travail de recherche effectué dans le cadre de cette thèse s'inscrit dans la seconde branche de discipline et, porte sur l'analyse de la déformation à court terme d'un sol poreux résultant du processus d'infiltration couplé avec le transfert thermique dont il est constamment le siège. Les éléments de description qui en ressortent, apporteront des informations indispensables à la conservation et à la protection du sol contre des dégradations éventuelles. Trois géomatériaux ont été considérés dans l'étude : l'argile, la terre et le sable.

Si l'infiltration est à favoriser, voire provoquée, dans certains secteurs du domaine agronomique, elle doit être bloquée pour tout ce qui touche les infrastructures (routes, bâtiments, pont, etc.). Mais quelle que soit la finalité des opérations, la prise de mesure requiert une bonne compréhension et une maîtrise de la description du processus physique qui se trouve à la base du phénomène. Cette phase de l'étude est cependant confrontée à des complexités qui relèvent du couplage de l'infiltration avec d'autres processus (thermique, chimique, etc.). Et à ce propos, de nombreux auteurs, dont André Musy, Zadjiaoui [1], [2], citent en particulier que l'effet thermique peut affecter, de façon significative, les propriétés dynamiques de l'écoulement de l'eau d'infiltration.

En tant que phénomène physique, l'infiltration est définie par le processus de pénétration de l'eau dans un sol poreux. Ce mouvement apparaît lorsque les charges hydriques appliquées en surface (averse, pluie, irrigation, etc.) ou les sources existant en profondeur (nappe souterraine, canal d'évacuation, etc.) se répartissent dans le volume du sol par diffusion à travers les interstices ou, par conduction entre des particules en contact. Cet apport perturbe la répartition des grandeurs d'équilibre

du sol telles que les contraintes internes (succions), les teneurs en eau et la température. Le couplage des effets résultant de ces perturbations modifie l'état global (mécanique, hydrique et thermique) du milieu, au cours du temps.

Dans ce travail de thèse, un modèle d'analyse macroscopique est proposé en considérant un échantillon parallélépipédique du sol comme support géométrique de l'étude de déformation et, les contraintes internes exercées par les succions, comme charges. L'objectif est notamment de pouvoir accéder à la détermination de la déformation subie par la structure du sol, sous l'action des succions qui accompagnent le mouvement d'infiltration. Ainsi, l'analyse du comportement mécanique du sol doit faire appel aux lois et théories qui gèrent la dynamique des structures et, celle des charges sera déduite des lois de transfert de l'eau liquide en milieu poreux et de transfert de la chaleur, à l'échelle macroscopique.

Le développement de chaque rubrique qui compose l'analyse est effectué en appliquant la Méthode des Eléments Finis (M.E.F.) pour les calculs de déformation et, la Méthode des Différences Finies (M.D.F.) pour les calculs de charges mécaniques. Dans cette seconde rubrique, la détermination de la répartition des contraintes internes est déduite à partir de celles des teneurs en eau et de la température à l'échelle macroscopique, sans tenir compte des interactions à l'échelle moléculaire.

Les calculs relatifs à l'étude sont rapportés successivement à trois types de sol qui sont caractérisés par des porosités différentes ; ceci dans le but particulier de comparer les impacts de l'état de porosité du milieu sur ses capacités de déformation, ainsi que sur l'aboutissement éventuel de l'évolution dans le temps des déformations initiées.

Le traitement numérique, par modélisation, du problème a été réalisé par l'intermédiaire d'un programme en PASCAL que nous avons conçu et, les tracés des graphiques sont établis sous MATLAB.

Le développement du travail effectué est présenté dans ce rapport selon le plan suivant :

☞ La première partie est consacrée à l'étude bibliographique de l'infiltration en milieu poreux, ce qui nous a amené à passer en revue les lois et les théories physiques sur lesquelles reposent les descriptions des phénomènes impliqués dans le problème. Il s'agit principalement du processus d'écoulement de l'eau en milieu poreux et de celui du transfert de la chaleur. La description phénoménologique ainsi que la formulation du couplage entre ces deux processus y sont établies. Pour compléter les notions physiques de base qui sont rappelées dans cette première partie, la présentation et la formulation de la succion sont fournies en dernier lieu.

☞ La deuxième partie rapporte les principales étapes d'opérations qui composent la mise en œuvre de la M.D.F. utilisée pour modéliser la répartition des succions dans le milieu considéré. Le modèle physique choisi pour représenter le milieu, ainsi que les conditions d'étude retenues y sont présentés. Pour la résolution du système couplé d'équations hydro-thermiques, un modèle de procédé de traitement numérique est proposé, avec l'algorithme et l'organigramme à l'appui. Ce deuxième volet développe le calcul de détermination des succions à partir des teneurs en eau et de la température.

☞ La troisième partie présente une analyse numérique axée particulièrement sur les conditions paramétriques qui peuvent impacter sur la répartition des succions. Toutefois, avant l'analyse proprement dite, un calcul récapitulatif de la totalité des phases d'opérations conduisant à la détermination numérique des succions est proposé ; ceci afin de vérifier la conformité des résultats obtenus à ceux qui ont été publiés dans des travaux antérieurs.

Dans les conditions de réalisation de ce calcul, mentionnons que si les valeurs de certains paramètres n'étaient pas fournies par des auteurs, nous nous sommes efforcés d'en trouver des approches réalistes à partir d'autres articles de référence ou, le cas échéant, de les ajuster aux modes de variation des paramètres en fonction des variables d'état (température, teneur en eau).

Dans l'analyse qui suit ce calcul préliminaire, les contributions respectives de trois paramètres parmi les plus fondamentaux sont étudiées. Il s'agit de : la porosité du sol (paramètre influant sur la dynamique de l'écoulement de l'eau dans le sol), le coefficient de convection thermique h_{cv} (paramètre influant sur le bilan d'échange thermique du sol avec le milieu extérieur) et la condition saisonnière (paramètre agissant sur les comportements hydrique et thermique du sol). Chacun de ces paramètres a fait l'objet d'une série de calculs, en vue de mener des études comparatives.

☞ La quatrième partie concerne le traitement numérique du problème de structure qui permettra d'accéder au calcul des déformations. Les lois fondamentales régissant la dynamique des structures (loi de Hooke, loi de comportement, etc.) sont passées en revue, afin d'établir les équations d'équilibre de la structure ; ces dernières, complétées par les équations de définition des charges mécaniques (succions), constitueront le système global d'équations qui définira le problème. Il vient ensuite la présentation des modèles discrétisés physique (géométrie et conditions physiques) et mathématique du système : ce sont les éléments de base nécessaires à la mise en œuvre du traitement par la Méthode des éléments finis.

Les étapes de calcul de résolution ainsi que le travail de programmation correspondant, effectué en langage PASCAL, sont rapportés avant la présentation des résultats obtenus et les discussions qui s'ensuivent.

Enfin, une conclusion générale est présentée pour clore le présent rapport du travail de thèse.

**PARTIE I : INFILTRATION D'EAU, TRANSFERT THERMIQUE
ET SUCCION DANS LE SOL**

Les lois qui gèrent la dynamique de l'infiltration de l'eau dans le sol sont établies sur la base des propriétés :

- du sol, en tant que milieu complexe multiphasique et poreux, dont la constitution varie dans l'espace et dans le temps,
- du mouvement d'écoulement de l'eau, en tant que fluide incompressible et caloporteur,
- du transfert de chaleur dans le sol.

A l'échelle du mois ou de l'année, le sol peut être considéré comme une structure stable ainsi, selon une première approche, sa description peut être rapportée à un état statique. Dans ce cas, la méthodologie de l'étude dynamique de l'infiltration s'appuie sur trois concepts fondamentaux qui sont : l'analyse du comportement de la phase solide du sol, la formulation des lois théoriques qui gèrent le mouvement de la phase liquide et, l'évolution des processus d'échange thermique entre ces deux phases.

Avant d'entamer l'étude proprement dite, il nous paraît indispensable de rappeler les lois et les éléments de base de description qui ont été établis jusqu'à présent.

I.1- Concepts de base

I.1.1- Le sol et ses propriétés physiques

I.1.1.1- Description générale

D'un point de vue très générale, le sol se présente comme un système naturel complexe où les parties constituantes sont présentes dans trois états de phases différentes : solide, liquide et gazeuse [3], [4].

- La phase solide correspond à la matrice solide du sol qui est le lieu des réactions physico-chimiques avec les éléments de l'écosystème. Elle est composée de particules de formes et de tailles variées ; comme le recouvrement spatial occupé par ces particules ne remplit pas nécessairement la totalité du volume de la matrice, il existe des régions interstitielles vides (pores) qui marquent aussi la structuration de cette matrice solide.
- La phase liquide est représentée par le fluide qui s'écoule dans les zones interstitielles ou qui stagne dans les pores de la matrice solide.
- La phase gazeuse désigne le mélange gazeux composé essentiellement d'air et de vapeur d'eau qui est, soit piégé dans les pores, soit circulant à travers les espaces lacunaires de la matrice solide.

La coexistence de ces trois phases dans le « système sol » n'est pourtant pas à caractère statique ni à pourcentage de composition constant car elles s'influencent et s'interpénètrent mutuellement au cours du temps. Ainsi, même si le sol apparaît comme une structure compacte et stable, un affinement de sa description consiste à inclure aussi bien les propriétés dynamiques de ses phases constituantes que celle des processus d'interférence et d'échange entre elles.

Selon une approche statique, le classement des sols en fonction des répartitions volumique et massique des phases constituantes peut être schématisé grossièrement par la figure I.1 [3], [5].

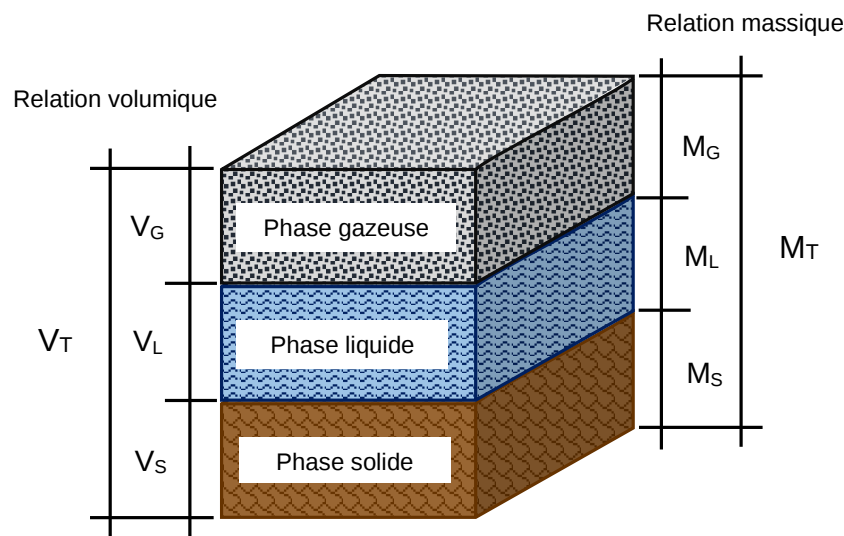


Figure I. 1 : Représentation schématique de la constitution des phases dans le sol

De cette représentation schématique peut être établi un classement des états hydro-physiques du sol, selon la proportion de la phase liquide dans l'ensemble :

- un sol sec est caractérisé par l'absence de la phase liquide
- un sol partiellement saturé est caractérisé par la présence des trois phases : solide, liquide et gazeuse
- un sol saturé ne renferme que les phases solide et liquide puisque tous les pores sont remplis d'eau.

I.1.1.2- La matrice solide

Les propriétés dynamiques du processus d'infiltration sont fortement conditionnées par les caractéristiques hydrodynamiques, la structure et la texture du sol, entre autres. Le degré d'implication de ces trois facteurs relève des particules élémentaires qui composent le sol. D'une

manière générale, ces particules peuvent être groupées en trois grandes catégories : les particules minérales, les particules organiques et les pores.

a) La partie minérale

Les parties minérales (blocs, cailloux, gravier, etc.) sont différenciées entre elles par leur volume et leur forme. Il est alors possible de définir un critère de classement des particules (texture du sol) selon leur diamètre apparent Φ (granulométrie). De cette manière, les sols peuvent être classés selon leur texture.

Citons en exemple, les trois classes texturales des terres dites « fines » qui sont retenues par la société Suisse de Pédologie.

- *Sable* : ensemble des éléments minéraux dont le diamètre apparent est compris entre 0,05mm et 2mm.
- *Limon* : ensemble des éléments minéraux dont le diamètre est compris entre 2 μ m et 50 μ m.
- *Argile* : ensemble des éléments minéraux dont le diamètre est inférieur à 2 μ m.

A partir de ces trois classes texturales de base, on peut reconstituer les autres classes par combinaison de différentes proportions de chaque classe, selon le principe du triangle des textures (Figure I.2) [1], [6].

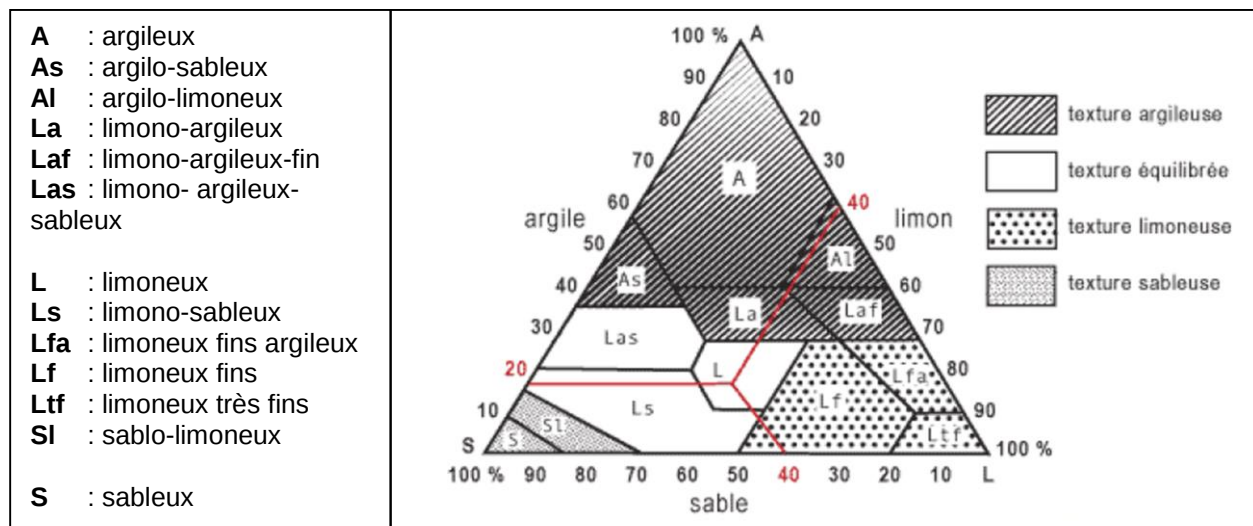


Figure I. 2 : Triangle des textures

Pour chaque type textural, le degré de compacité, ainsi que la densité poreuse du sol sont des facteurs à effet très significatif sur les propriétés dynamiques du processus d'infiltration.

b) La partie organique

Contrairement à la partie minérale, la partie organique du sol n'est pas constituée de particules distinctes les unes des autres mais, se présente plutôt comme un ensemble caractérisé par sa masse ou son volume. Leur présence dans le sol résulte des activités biologiques sur les animaux et les végétaux (champignons, bactéries, etc.).

Du point de vue de la composition, elle renferme généralement les trois composantes ci-après :

- Les résidus : matière organique fraîche résultant de la sécrétion et de l'excrétion de végétaux ou d'animaux peu décomposés.
- L'humus : sous-produit stable de la minéralisation primaire de la matière organique fraîche.
- Les produits transitoires : produits entre la matière organique fraîche et l'humus stable.

La partie organique du sol joue le rôle de substance liante pour les particules minérales.

c) Les pores et leur rôle

Les pores désignent les espaces vides (poches) ou les interstices non comblées qui marquent la structuration de la matrice solide du sol. Les propriétés caractérisant ces espaces lacunaires sont décrites à partir de la « porosité », notée f , qui est définie par le rapport du volume V_v des vides au volume total apparent V_T du sol [4], [7]:

$$f = \frac{V_v}{V_T} \quad (\text{I.1})$$

La grandeur physique f permet d'évaluer la capacité d'écoulement ou de rétention de l'eau dans le sol. La condition d'apparition de chacun de ces processus est liée non seulement au réarrangement des particules mais aussi au diamètre apparent des pores confinés à l'intérieur de la matrice solide. La valeur moyenne des diamètres des pores existants nous permet de classer les sols selon leur porosité [7], [8].

- macroporosité, lorsque les diamètres des pores sont supérieurs à 0,2mm. Pour cette structure, le déplacement de la phase liquide et celui de la phase gazeuse se réalise librement.
- mesoporosité, lorsque les diamètres des pores sont compris entre 0,2mm et 6µm. Pour ce deuxième cas, le déplacement de la phase liquide devient plus difficile et le phénomène de rétention commence à apparaître.

- microporosité, lorsque les diamètres des pores sont compris entre $6\mu\text{m}$ et $0,2\mu\text{m}$. Pour ce troisième cas, le déplacement de la phase liquide est presque impossible. Cette structure est idéale pour le stockage de l'eau dans le sol (réservoir d'eau).
- porosité matricielle, lorsque les diamètres des pores sont très fins (inférieurs à $0,2\mu\text{m}$). Le déplacement de la phase liquide n'est plus possible que pour une succion d'environ égale à - 15bars. Cette structure empêche tout mouvement de déplacement des fluides et, elle se comporte en véritable barrière à toute circulation de fluide.

I.1.1.3- L'état hydrique du sol

D'une manière générale, l'état hydrique du sol est défini en fonction du niveau de son taux d'humidité. La détermination de ce niveau est effectuée à partir de paramètres caractéristiques qui s'inscrivent dans la terminologie utilisée en Sciences du sol.

Nous rappelons ci-après, les principaux paramètres qu'on utilise dans la description de l'état hydrique du sol [9].

- ☞ Le taux d'humidité (ou la teneur en eau) représente la quantité de la phase liquide existant dans le sol ; elle permet de statuer sur l'état hydrique du sol.
- ☞ La saturation correspond à l'état hydrique lorsque tous les espaces vides du sol sont remplis d'eau. Dans cette condition, la valeur de la teneur en eau est égale à la porosité totale et le sol ne peut plus retenir l'eau.
- ☞ La capacité de rétention caractérise l'état hydrique lorsque la teneur en eau est temporairement maximale dans une certaine couche avant de s'écouler en profondeur. Cet état marque l'apparition du phénomène de rétention d'eau dans le processus d'infiltration.
- ☞ Le point de flétrissement désigne l'état hydrique à partir duquel les plantes ne disposent plus d'eau pour survivre, l'infime quantité d'humidité se trouve au niveau des micropores.
- ☞ Le point d'hygroscopicité définit l'état hydrique lorsque la teneur en eau est extrêmement réduite. Dans ce cas, l'humidité apparaît sous forme de traces qui vont devenir des éléments constitutifs du sol, appelée eau de constitution.
- ☞ L'assèchement caractérise l'état hydrique lorsque le milieu ne présente plus aucune trace d'humidité et, le sol commence à se fissurer au niveau de la surface.

I.1.2- Les grandeurs de description

Vue la diversité des éléments qui sont présents, sous différentes phases, dans le sol, les processus physiques qui s'y déroulent sont assez complexes et leur étude nécessite la considération de grandeurs de description de différentes catégories.

Lorsque la surface du sol reçoit une importante quantité d'eau (eau de pluie), une partie est, soit bloquée en surface en formant une flaque d'eau, soit emportée par ruissellement et, l'autre partie s'infiltre en profondeur.

Le but dans notre analyse étant d'étudier l'évolution de la partie infiltrée en profondeur dans le sol, nous tenons d'abord à rappeler les principales grandeurs de description qui vont servir à mener l'étude.

I.1.2.1- Teneur en eau et humidité relative

a) Teneur en eau

La teneur en eau, notée θ , est une grandeur physique sans dimension qui exprime, en pourcentage, la quantité d'eau contenue dans le sol. Deux formes d'expression de cette grandeur sont proposées dans la littérature [10], [11] :

- ☞ soit la teneur en eau massique (ou teneur en eau pondérale) qui est définie par le rapport entre la masse d'eau m et celle du sol M .

$$\theta_m = \frac{m}{M} \quad (I.2)$$

- ☞ soit la teneur en eau volumique (ou humidité volumique) qui s'identifie au rapport entre le volume v du liquide et le volume V du sol.

$$\theta_v = \frac{v}{V} \quad (I.3)$$

Remarque :

La teneur en eau θ d'un sol varie globalement dans un intervalle de valeurs limité par une valeur minimale θ_r , appelée « teneur en eau résiduelle » et une valeur maximale θ_s , appelée « teneur en eau à saturation ».

$$\theta_r \leq \theta \leq \theta_s \quad (I.4)$$

b) Humidité relative

L'humidité relative, notée Hr , est définie par le rapport entre la pression de vapeur d'eau P_v et la pression de vapeur saturante P_{vs} [12], [13].

$$Hr = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (I.5)$$

La valeur de la pression de vapeur saturante, valable à une température comprise entre 0°C à 80°C, est déduite de la relation [13]:

$$P_{vs} = \exp\left(23,5771 - \frac{4042,9}{T-37,58}\right) \quad (\text{I.6})$$

I.1.2.2- Potentiel de l'eau dans le sol

Le potentiel de l'eau dans le sol, notée $\emptyset$, est défini par l'énergie potentielle d'une unité de masse d'eau, c'est-à-dire, le travail nécessaire à exercer pour déplacer une unité de masse d'eau soumise à la pression atmosphérique, d'une certaine hauteur [1], [10].

D'une manière générale, le potentiel d'eau dans le sol comporte trois composantes :

- Le potentiel de pression qui s'identifie à l'énergie liée à la pression par unité de poids, fournie sur une lame d'eau. Cette grandeur est aussi désignée par : charge de pression ou charge piézométrique, définie par :

$$\emptyset_p = h \quad (\text{I.7})$$

- Le potentiel de gravité qui est l'énergie liée à la pesanteur lors du déplacement vertical d'un fluide d'une distance z . On le désigne aussi par « charge de gravité » et, il est défini par :

$$\emptyset_g = z \quad (\text{I.8})$$

- Le potentiel chimique, noté $\emptyset_c$, qui représente l'énergie interne due aux interactions entre les molécules d'eau et les particules du sol. Remarquons que cette dernière composante est négligeable pour une eau pure.

D'où

$$\emptyset = \emptyset_p + \emptyset_g + \emptyset_c \quad (\text{I.9a})$$

Pour estimer la valeur de $\emptyset$, il est d'usage de se placer dans les conditions simplificatrices suivantes :

- l'eau est considérée comme pure
- la matrice solide du sol est supposée homogène et indéformable
- l'échantillon de sol considéré est soumis à la pression atmosphérique
- les phénomènes liés à la phase gazeuse ont des effets négligeables

Dans ces conditions, l'expression de $\emptyset$ se réduit à :

$$\emptyset = \emptyset_p + \emptyset_g = h + z \quad (\text{I.9b})$$

On peut alors dire que le potentiel de l'eau dans le sol s'identifie à la charge hydraulique H d'expression approximative :

$$H \approx \phi = h + z \quad (\text{I.9c})$$

I.1.2.3- Grandeurs liées au transfert hydrique

a) Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique, notée K , ou $K(\theta)$, ou K_θ , est une grandeur physique qui mesure la résistance du sol à l'écoulement. Elle dépend essentiellement de la structure et de la teneur en eau du sol.

☞ **En milieu saturé**, la conductivité hydraulique est constante et, s'identifie à la conductivité hydraulique à saturation K_s telle que [1]:

$$\circ K_s = K(\theta_s) \quad (\text{I.10})$$

$$\circ K_s = \frac{\rho g}{\eta} \kappa \quad (\text{I.11})$$

$$\text{avec } \eta = \frac{0.0178}{1 + 337 \cdot 10^{-4} T + 222 \cdot 10^{-6} T^2}$$

☞ **En milieu non saturé**, la conductivité hydraulique n'est plus constante mais varie en fonction de la teneur en eau θ , selon une expression proposée par Brooks et Corey [1] :

$$K(\theta) = K_\theta = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^n \quad (\text{I.12})$$

n étant une constante liée à la porosité du sol

b) Charge de pression

La charge de pression (ou potentiel de pression) $h(\theta)$ est une grandeur qui dépend fortement de la teneur en eau et, qui joue un rôle primordial dans le processus d'infiltration de l'eau. Dans la littérature [1], [3], la courbe représentative de la fonction $h(\theta)$, appelée « courbe caractéristique d'humidité du sol » présente l'allure rapportée dans la figure I.3.