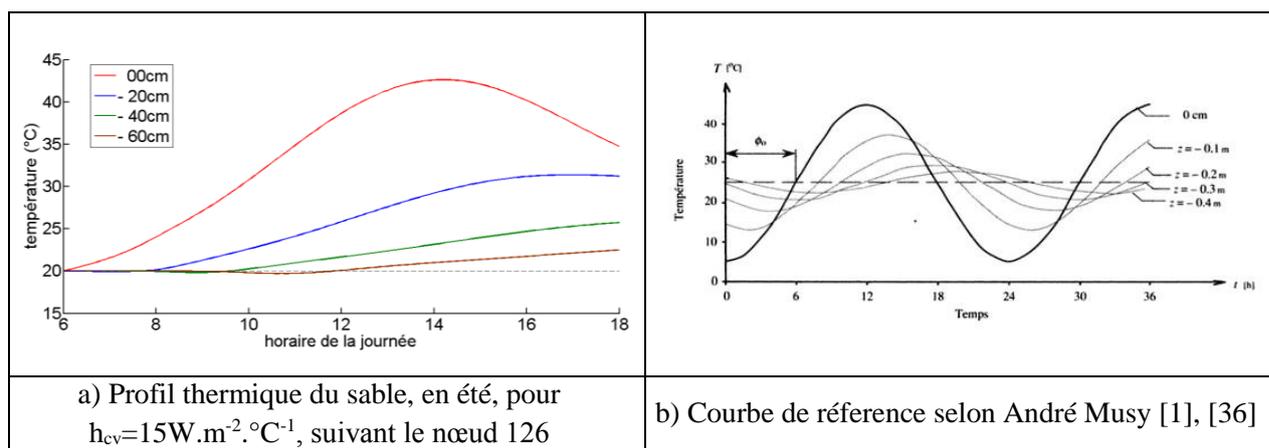


### Comparaison des profils thermiques calculés avec ceux de référence

Dans cette deuxième série de calculs, la comparaison porte sur l'allure d'évolution des profils thermiques. Pour ce faire, le matériau considéré est le sable et la charge thermique, le flux solaire variable  $\phi(t)$  dont l'expression est définie par la relation (III.1). Ces conditions de calcul ont été choisies pour être conformes à celles qui caractérisent les courbes de référence.

Les résultats obtenus sont portés dans la figure III.4a et les profils de référence dans la figure III.4b.

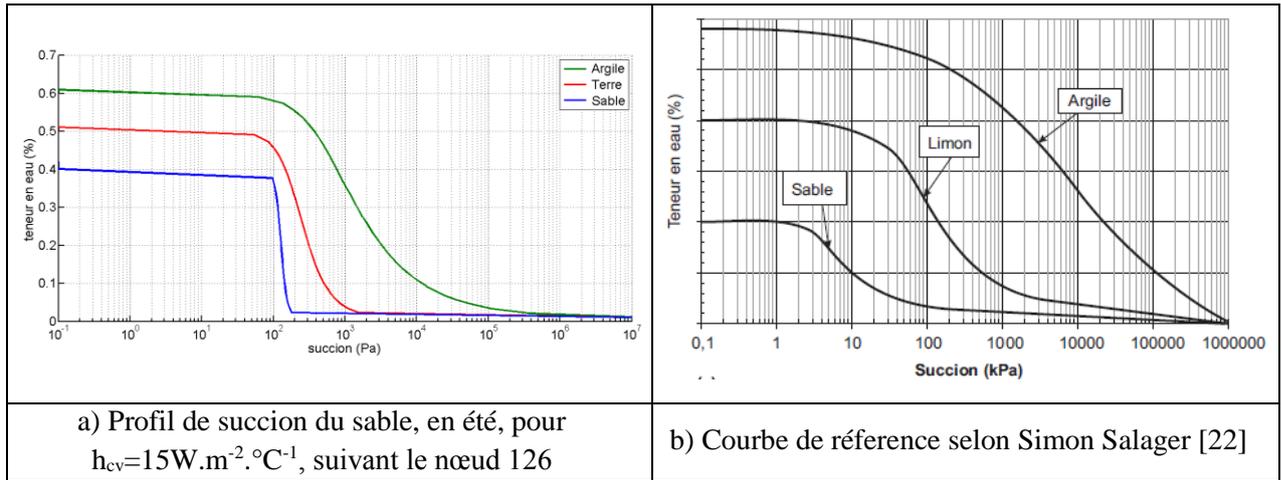


Si les courbes de référence reproduisent les profils thermiques pour plusieurs cycles diurnes, les résultats de nos calculs ne correspondent qu'à une exposition diurne allant de 06H à 18H des courbes de référence. Dans cette portion de profil, moyennant un décalage de niveau le long de l'axe des températures, on peut remarquer que l'allure de l'évolution des profils de référence est retrouvée par celle des profils établis par le calcul. Cette similarité valide l'outil mathématique de simulation utilisé, ce qui nous a amené à l'adopter pour la suite de l'étude.

#### III.2.1.3- Profil de succion

Selon un procédé analogue à celui qui a été utilisé pour établir les deux profils précédents, nous avons comparé l'allure des courbes simulées, exprimant la variation de la succion en fonction de la teneur en eau, avec celle des courbes de référence établies par Simon Salager [22].

Les résultats obtenus, portés dans la figure III.5a, représentent les variations calculées en trois heures de temps. Les courbes de référence, présentées dans la figure III.5b, reproduisent les mêmes variations qui ont été prises dans des conditions similaires.



**Figure III. 5: Comparaison des profils de succion du sable**

La comparaison des allures des deux séries de courbes nous semble concluante pour pouvoir admettre la validité de l'outil de simulation choisi.

### Etude paramétrique de la répartition de la succion et de son évolution

La succion est définie en fonction de la teneur en eau et de la température, par conséquent, il est nécessaire de passer par l'étude des répartitions de la température et de la teneur en eau pour accéder à la description de sa répartition ainsi que de son évolution dans le modèle.

Pour mener l'étude, nous avons considéré les trois paramètres suivants :

- la porosité du sol
- le coefficient d'échange thermique par convection avec le milieu ambiant
- les conditions climatiques (température, précipitation, vitesse du vent)

#### III.2.2.1- Paramètre : porosité $f$

Pour analyser l'impact de ce paramètre sur les propriétés dynamiques du processus d'infiltration, nous avons considéré trois types de sol : le sable, la terre et l'argile. Le but est de dégager, à partir du tracé des profils de succion, le rôle du degré de compacité du sol sur la répartition des charges internes engendrées par l'infiltration.

Les calculs relatifs à l'étude de ce paramètre ont été effectués dans les conditions suivantes:

- Période saisonnière : été
- Teneur en eau initiale  $\theta_0$  : 0,01
- Flux hydrique rentrant  $q_e$  :  $5 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$

- Flux d'évaporation  $q_s$  :  $2 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$
- Température initiale  $T_0$  :  $20^\circ\text{C}$
- Température ambiante  $T_\infty$  :  $30^\circ\text{C}$
- Flux de puissance solaire  $\Phi_0$  variable :  $120 \text{ à } 600 \text{ W.m}^{-2}$
- Coefficient d'échange thermique par convection  $h_{cv}$  :  $15 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$
- Fréquence des relevés de valeur : toutes les deux heures pendant 12h de temps

Avec ces conditions, les calculs sont effectués successivement pour les trois types de sol et, la comparaison de leurs profils hydrique, thermique et de succion respectifs permettra de déduire l'influence de la porosité  $f$  du milieu.

#### a) Analyse comparative des profils hydriques

Dans le cas général, le mouvement d'écoulement de l'eau dans le sol (infiltration) peut être initié par deux conditions :

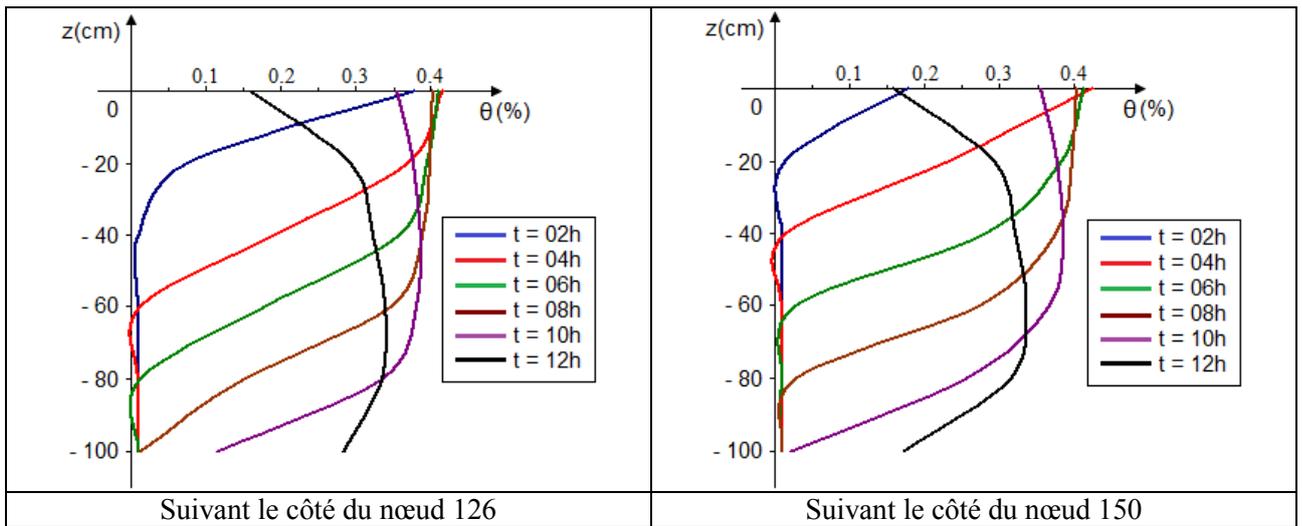
- ✓ Soit par la présence d'une répartition non uniforme de gradient de pression et/ou de teneur en eau dans le volume du milieu traversé. Ce mouvement est décrit par un terme diffusif dans l'équation générale des écoulements en milieu non saturé.
- ✓ Soit par l'effet du gradient unitaire de la pesanteur, représenté dans l'équation générale par un terme gravitaire.

D'après les fondements théoriques de la dynamique de l'infiltration, l'humidification d'un sol soumis à un régime d'alimentation en charge hydrique verticale se propage progressivement, en profondeur (infiltration verticale) et s'étale latéralement (infiltration horizontale).

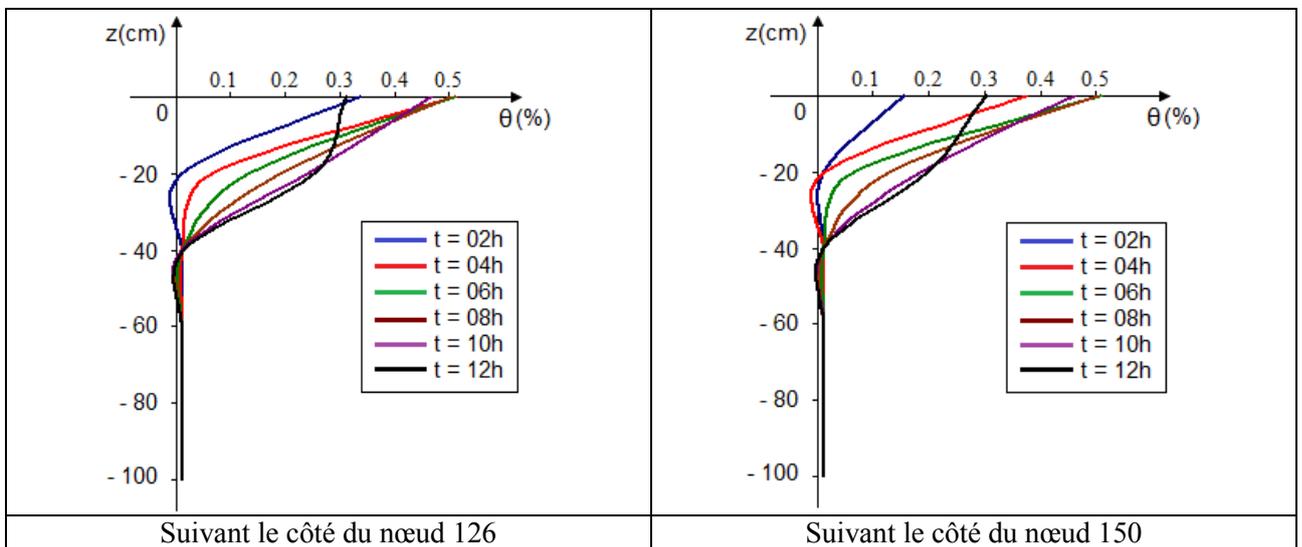
Cette première série de calculs est réalisée pour simuler l'évolution de la teneur en eau au niveau du nœud central numéro 126, afin de rendre compte de l'écoulement en profondeur et, celle au niveau du nœud extrême 150, afin d'accéder au mode d'écoulement latéral.

Les trois couples de figures ci-après représentent les profils hydriques dans le sable, la terre et l'argile pendant une durée d'étude de 12h.

a.1- SABLE



a.2- TERRE



a.3- ARGILE

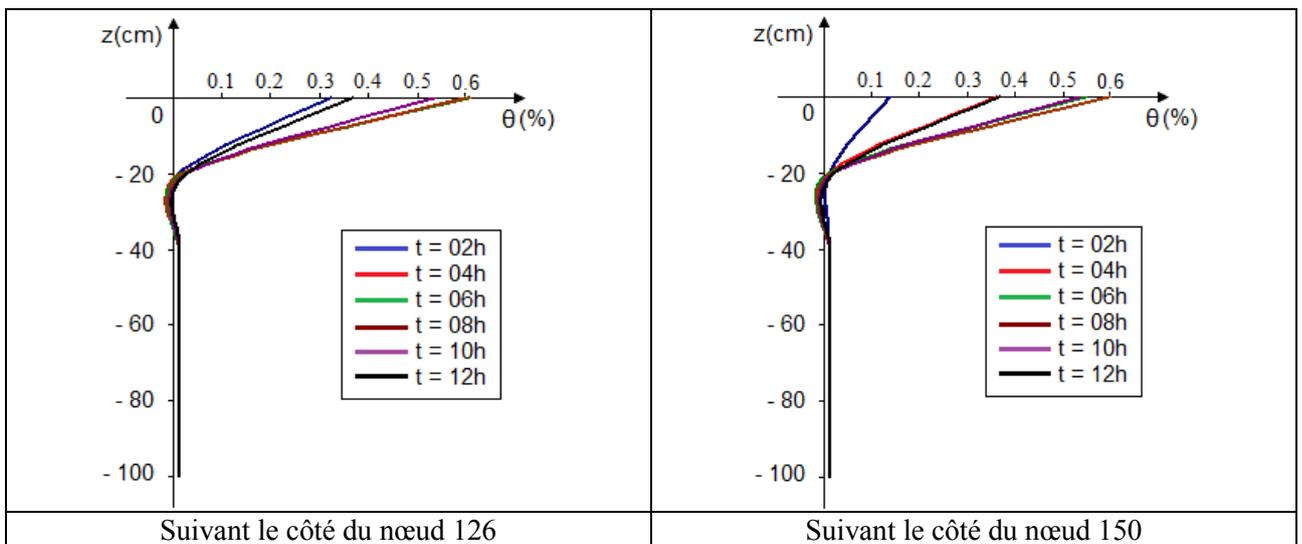


Figure III. 6: Profils hydriques du sable, de la terre et de l'argile en été, pour  $h_{ev}=15 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ .

D'après ces trois couples de réseaux de profil hydrique, on peut émettre les remarques suivantes :

☞ Sur l'infiltration horizontale et l'infiltration verticale

Après l'introduction du flux hydrique  $q_e$  au nœud 126, l'eau s'écoule plus rapidement en infiltration horizontale qu'en infiltration verticale, pour les trois types de sol. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que la teneur en eau à la surface atteigne une valeur proche de la saturation  $\theta_s$ . A partir de cet instant, l'infiltration horizontale s'arrête et, l'eau s'écoule en profondeur (infiltration verticale) sur toute la surface du sol.

Pour se donner un ordre de grandeur des vitesses d'écoulement horizontal  $V_{horiz}$  et vertical  $V_{vert}$ , évaluées selon nos conditions de calcul, citons en exemple le cas du sable.

Au bout des deux premières heures d'infiltration, la teneur en eau à la surface du sol, au niveau du nœud 150 (distant de 80cm du nœud d'application de la charge) est de 0,18. Cette même valeur est atteinte au niveau du nœud 126, à une profondeur de 15cm environ. Un calcul simple permet alors de déduire les valeurs suivantes :

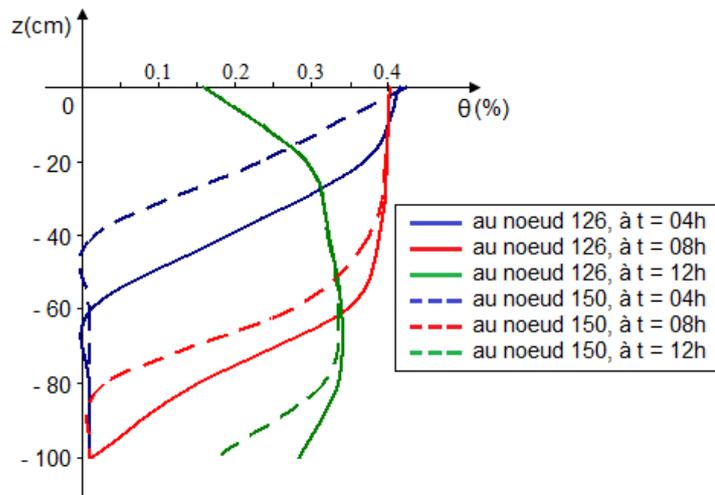
$$V_{horiz} \approx 10^{-4} m.s^{-1} \quad ; \quad V_{vert} \approx 1,4 \cdot 10^{-5} m.s^{-1}$$

Au bout de 4h d'infiltration, la teneur en eau sur toute la surface du sol atteint la valeur de saturation  $\theta_s$

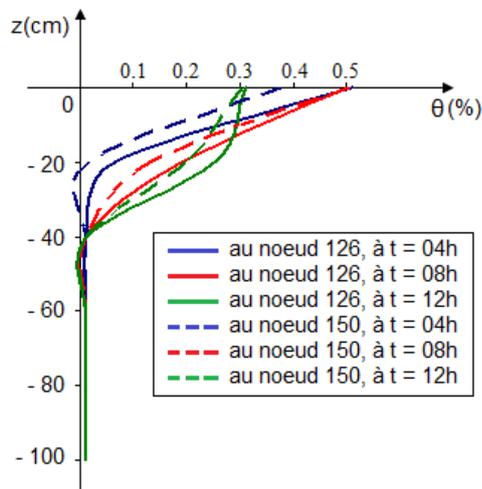
L'explication que l'on peut attacher à cette observation est que : la pénétration de l'eau dans le sol, par infiltration en surface, provoque une perturbation de la répartition des pressions dans le milieu. Cette modification fait apparaître des gradients de pression qui favorisent l'écoulement de l'eau par diffusion. Bien que l'écoulement par effet gravitaire subsiste, la contribution diffusive est plus importante, c'est-à-dire l'infiltration horizontale [14]. Ceci explique le fait qu'au début, l'étalement horizontal de l'humidification prime sur l'écoulement en profondeur. Cependant, à mesure que les couches en profondeur s'humidifient, les gradients de pression diminuent jusqu'à disparaître, ce qui élimine la contribution diffusive du déplacement. Dans ce cas, l'effet gravitaire agit seul et finit par égaliser les profils hydriques en tout point de la surface du sol (Figure III.7).

Pour cette raison, nous ne distinguerons plus, sur la surface du sol, les points de définition des profils hydriques (nœuds 126 et 150) mais, nous limiterons aux résultats obtenus au niveau du nœud central 126 pour la suite des analyses.

#### a.4- SABLE



#### a.5- TERRE



#### a.6- ARGILE

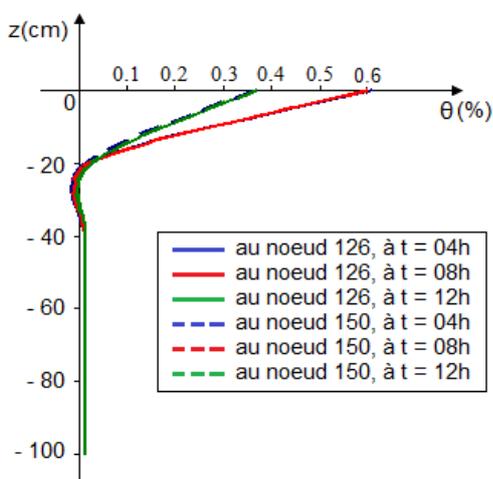
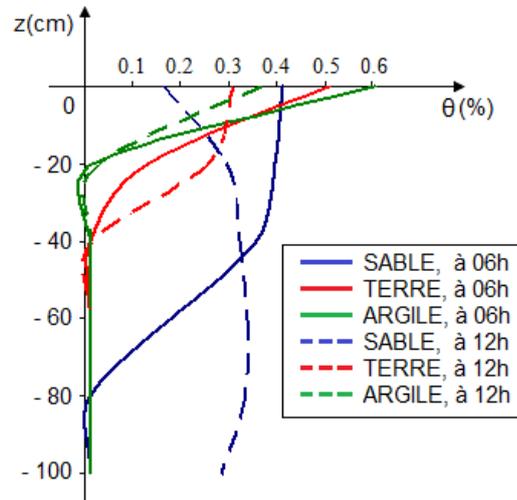


Figure III. 7: Comparaison des profils hydriques au niveau des nœuds 126 et 150

☞ Sur la variation du front d'humidification en fonction de la porosité

En raisonnant sur les profils hydriques établis au niveau du nœud central 126, on peut noter que l'épaisseur  $e_{ch}$ (cm) de la couche humidifiée diminue avec la porosité du sol considéré.

En d'autres termes, la capacité d'infiltration du sol est d'autant plus réduite que la porosité diminue (Figure III.8).



**Figure III. 8: Variation de la capacité d'infiltration en fonction de la porosité du sol (en été et avec  $h_{ev}=15W.m^{-2}.°C^{-1}$ )**

Cette observation qui implique la structuration du sol confirme la remarque émise par André Musy [1]. Mais pour se donner un ordre de grandeur basé sur nos conditions de calcul, les valeurs relevées au bout de 6h et 12h d'infiltration sont groupées dans le tableau ci-après :

**Tableau III. 5: Epaisseur de couche humidifiée en fonction de la porosité**

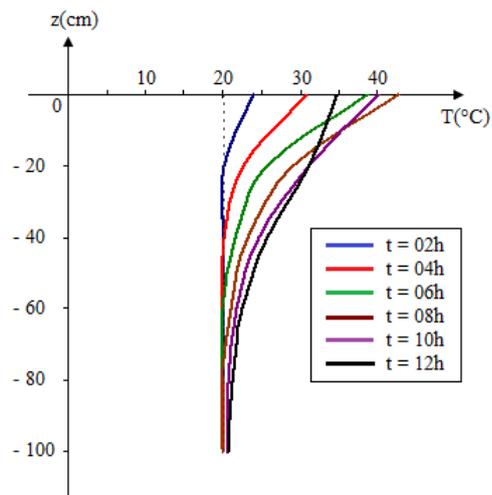
Type du sol	Porosité f	$e_{ch}$ (cm) (06h d'infiltration)	$e_{ch}$ (cm) (12h d'infiltration)
Sable	0,7	80	> 100
Terre	0,5	40	40
Argile	0,3	20	20

**b) Analyse comparative des profils thermiques**

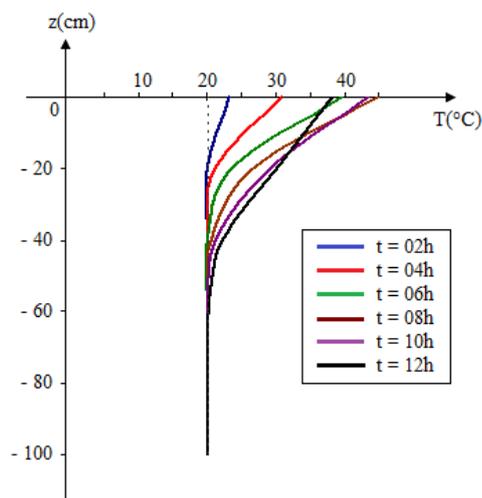
Dans ce volet, les profils thermiques considérés représentent les répartitions en profondeur de la température, le long de l'axe central du modèle géométrique (axe passant par le nœud 126). Les conditions de charge thermique prises en compte dans les calculs se limitent au flux solaire et à l'échange convectif avec le milieu ambiant à 25°C, appliqués à la surface du sol.

Les résultats obtenus pour les trois types du sol sont portés dans la figure III.9.

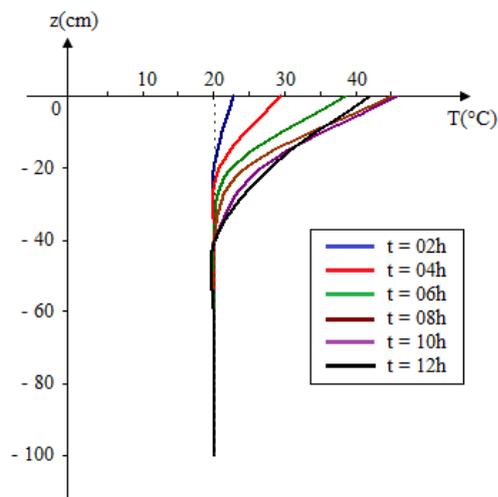
### b.1- Sable



### b.2- Terre



### b.3- Argile



**Figure III. 9: Profils thermiques du sable, de la terre et de l'argile  
(en été et pour  $h_{cv}=15W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ )**

Ces courbes de profil donnent l'allure de la transmission progressive, par diffusion, de la chaleur dans les couches en profondeur du sol. Et dans cette transmission, on peut noter que la chaleur se propage d'autant plus vite que le milieu traversé est poreux (Figure III.10)

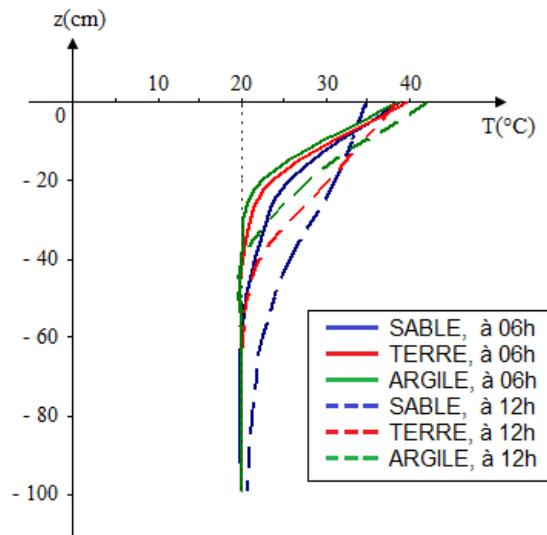


Figure III. 10: Comparaison des profils thermiques du sable, de la terre et de l'argile

Cette propriété peut être attachée à la variation de la conductivité thermique en fonction du degré d'humidité du sol si on se réfère au tableau de valeurs suivant.

Tableau III. 6: Conductivité thermique de quelques matériaux

TYPE DE SOL	CONDUCTIVITE THERMIQUE ( $W.m^{-1}.^{\circ}K^{-1}$ )
Sable sec	0,4
Sable saturé d'eau	2,4
Terre sèche	0,17 – 0,58
Terre (10% d'eau)	0,50 – 2,10
Terre (20% d'eau)	0,80 – 2,60
Argile / limon sec	0,5
Argile / limon saturé d'eau	1,7

Source : [37], [38]

On peut dire que les valeurs qui y sont répertoriées confirment le fait que l'humidité du sol y active la propagation de la chaleur, par augmentation de la conductivité thermique.

En reprenant les profils hydriques présentés dans la figure III.8, si on compare les répartitions de la teneur en eau dans les couches en profondeur, on peut relever qu'au bout de 12h d'infiltration, le niveau d'humectation diminue avec la porosité du milieu traversé. Cela pourrait alors expliquer le fait que l'échauffement atteint la couche la plus profonde dans le sable, tandis qu'il se limite à une profondeur d'environ 40cm, dans l'argile (Figure III.9).

Ajoutons que, pour certains matériaux, la conductivité thermique est une fonction décroissante de la température, ce qui pourrait expliquer la légère diminution au cours du temps, de la pente d'inclinaison des profils thermiques au voisinage de la surface du sol.

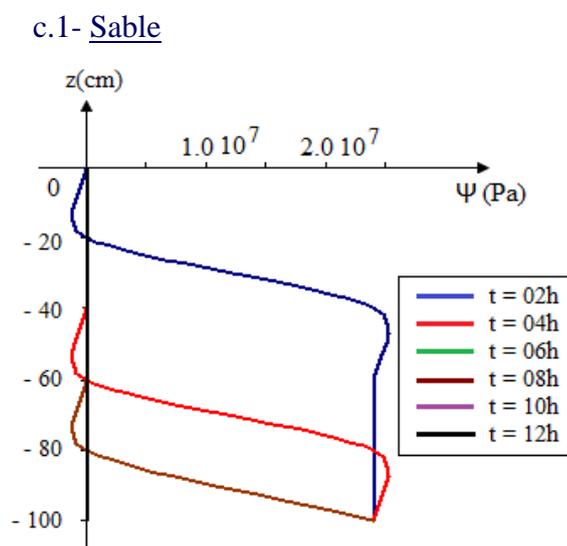
Pour récapituler les remarques déduites des résultats de nos calculs de simulation, la chaleur se propage dans le sol, d'autant plus vite que son degré d'humectation est plus élevé, ce qui caractérise les milieux de plus forte porosité.

### c) Analyse comparative des profils de succion

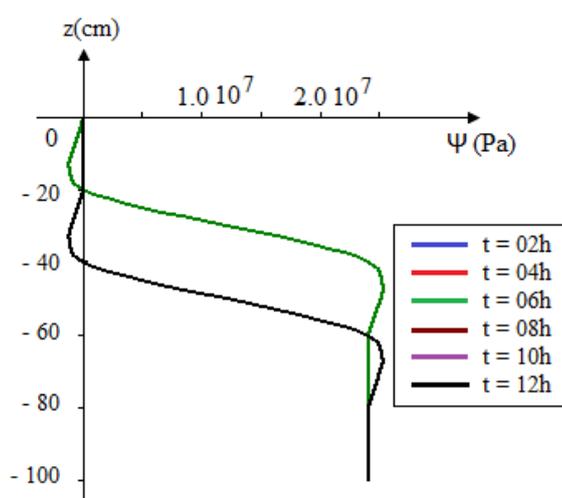
La succion représente une pression négative qui participe aux contraintes internes dans les sols non saturés. Son effet s'identifie à celui d'une force d'attraction qui s'exerce entre le sol et l'eau interstitielle (eau adsorbée entourant les particules de la matrice solide du sol). Elle contribue à maintenir les particules composant le sol à des positions stables, assurant ainsi la stabilité du volume de la structure. Son intensité, en valeur absolue, est maximale dans un milieu de saturation résiduelle (quasiment sec) et, minimale dans un milieu saturé.

D'après la formulation de l'expression de la succion, rappelée dans la première partie de ce rapport, sa valeur est définie en fonction de la teneur en eau et de la température. Par ailleurs, nos résultats de simulation relatifs aux profils hydrique et thermique ont montré que la porosité facilite l'écoulement de l'eau d'infiltration et favorise la propagation de la chaleur dans le sol. Cette observation laisse supposer que l'état de porosité d'un milieu influe sur la répartition des sucions qui le caractérise.

Une évaluation numérique de la répartition des sucions, déduite à partir des résultats obtenus sur la répartition de la teneur en eau et la répartition de température de notre modèle, a conduit aux courbes de profil ci-après.



### c.2- Terre



### c.3- Argile

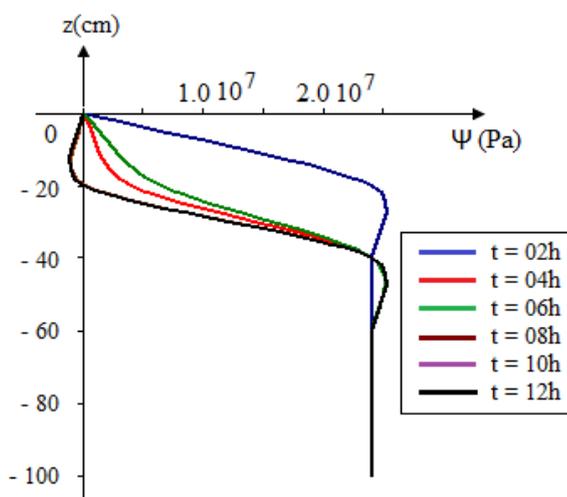
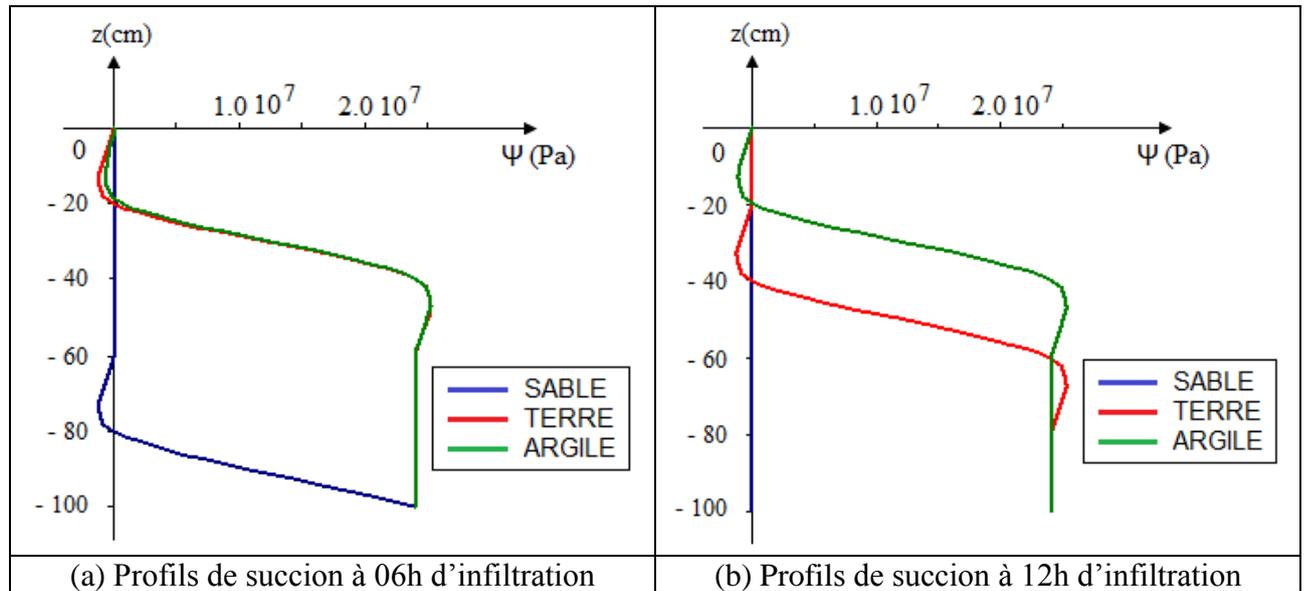


Figure III. 11: Profils de succion (en été,  $h_{cv}=15W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ )

D'après la figure III.11, on peut remarquer que l'évolution des profils de succion reproduit la progression au cours du temps de l'humidification des couches en profondeur du sol. En effet, pour les couches caractérisées par une faible teneur en eau, la succion atteint la valeur maximale ( $\approx 10^7$  Pa) et pour les couches saturées, elle est réduite à la valeur minimale ( $\approx 0$  Pa). Pour les états intermédiaires, la valeur de la succion diminue d'intensité à mesure que les pores et les interstices se remplissent d'eau, ce qui peut entraîner des écartements locaux, temporaires ou permanents des particules qui composent le sol. Il en résulte une augmentation du volume de la structure et, cette variation de volume est à l'origine de la déformation.

Par ailleurs, en reproduisant sur une même figure les profils de succion relatifs aux trois types de sol au bout de 06h et de 12h d'infiltration (Figure III. 12),



**Figure III. 12: Profils de succion dans le sable, la terre et l'argile au bout de 06h et de 12h d'infiltration**

on peut observer que les succions se répartissent en profondeur sur une épaisseur d'autant plus importante que le milieu est poreux. Au bout de 12 heures d'infiltration, l'effet des succions affecte une couche de 100cm d'épaisseur pour le sable, de 60cm pour la terre et de 40cm pour l'argile.

#### III.2.2.2- Paramètre : coefficient de convection thermique $h_{cv}$

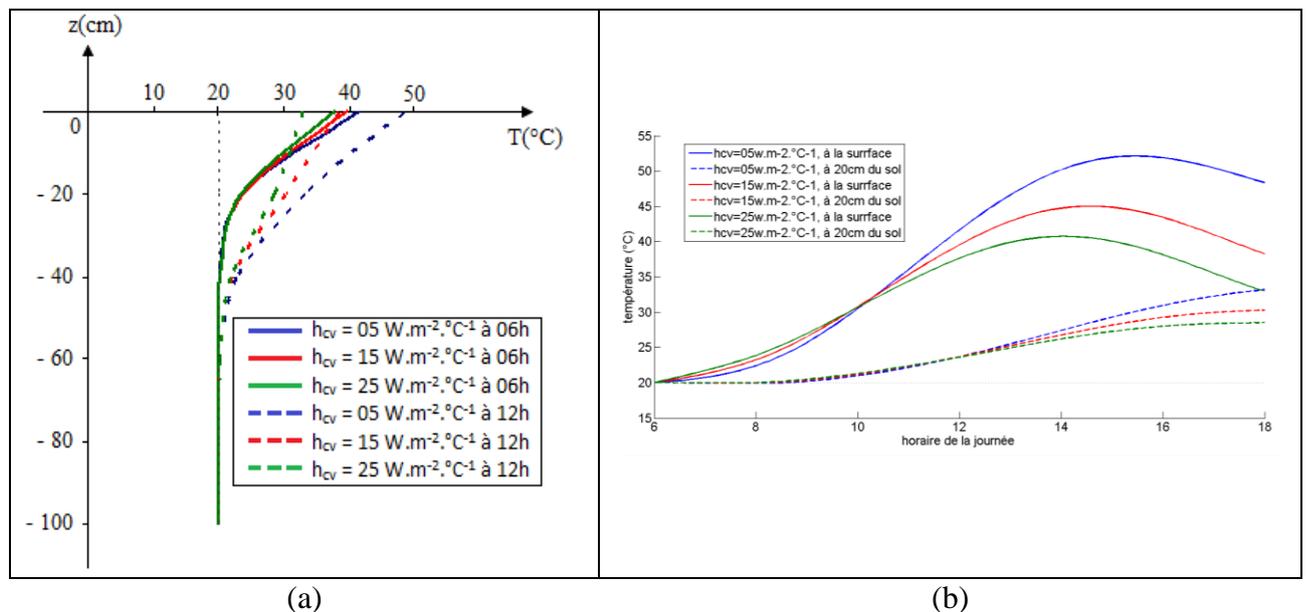
La répartition interne des succions dans le volume du sol influe sur sa stabilité mécanique, à l'échelle macroscopique, or cette répartition dépend de l'état thermique du milieu. Ainsi, on peut se demander si les conditions de température du milieu ambiant ont des effets significatifs sur l'état thermique du sol, en général. Les effets attendus (rafraîchissement ou échauffement) résultent du bilan d'échange thermique par convection à la surface du sol. En présence de vent, la vitesse de l'échange sera modifiée et les conséquences vont se répercuter sur la répartition des succions dans le sol.

Pour modéliser la contribution du vent sur les variations de la répartition des succions, nous avons choisi comme paramètre de simulation, le coefficient de convection  $h_{cv}$  puisqu'il définit le flux thermique convectif échangé avec le milieu extérieur.

Pour trois valeurs du paramètre  $h_{cv}$  ( $5\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ ,  $15\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ ,  $25\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ ), nous avons alors effectué des calculs de simulation rapportés aux profils thermique, hydrique et de succion en choisissant le matériau « terre » à titre d'exemple.

### Profil thermique

Les résultats obtenus sur les profils thermiques sont présentés dans la figure III.13.



**Figure III. 13: Profils thermiques du matériau « terre » pour  $h_{cv}$  variable**

Si les courbes de profil rapportées dans la figure III.13a, on peut remarquer que le brassage thermique par échange convectif à la surface du sol, a des incidences sur la répartition de température dans les couches internes. Selon nos conditions de calcul, au bout de 12h d'exposition, les échanges convectifs en surface modifient le profil de température jusqu'à une profondeur de 60cm dans le sol et, cette modification est d'autant plus prononcée que la valeur de  $h_{cv}$  est élevée. Une augmentation de  $h_{cv}$  de 5 fois sa valeur, active l'échange du flux convectif et, réduit la température de surface de  $15\text{°C}$  environ, tandis que la réduction est de  $10\text{°C}$  pour une augmentation de  $h_{cv}$  de 3 fois sa valeur.

Ce résultat permet de placer les propriétés dynamiques du mouvement convectif, géré par la vitesse du vent, parmi les paramètres qui influent sur l'état thermique du sol, siège du processus d'infiltration. Par conséquent, il va s'ensuivre des modifications de la répartition des succions en fonction de  $h_{cv}$ .

Pour compléter la description, nous avons reproduit les résultats précédents sous un autre angle, dans la figure III.13b. Cette figure rapporte les courbes d'évolution au cours du temps du niveau de température en surface, à une profondeur de 20 cm du sol. Il en ressort la remarque

suyvante : la différence entre les impacts des trois valeurs de  $h_{cv}$  sur les courbes d'évolution temporelle de la température n'apparaît distinctement qu'aux heures de déclin de la puissance solaire incident.

Cette observation peut être due de la coexistence, à la surface du sol, de l'échange de chaleur par convection et de l'échauffement par irradiation directe sous le flux solaire incident. En d'autres termes, l'effet du paramètre  $h_{cv}$ , quelle que soit sa valeur, sur l'état thermique à la surface du sol est masqué aux heures de grande puissance d'exposition solaire. Par contre, il n'est pas négligeable aux heures de déclin du flux solaire.

### Profil hydrique

En ce qui concerne les effets sur le profil hydrique, les résultats de simulation obtenus sont présentés dans la figure III.14.

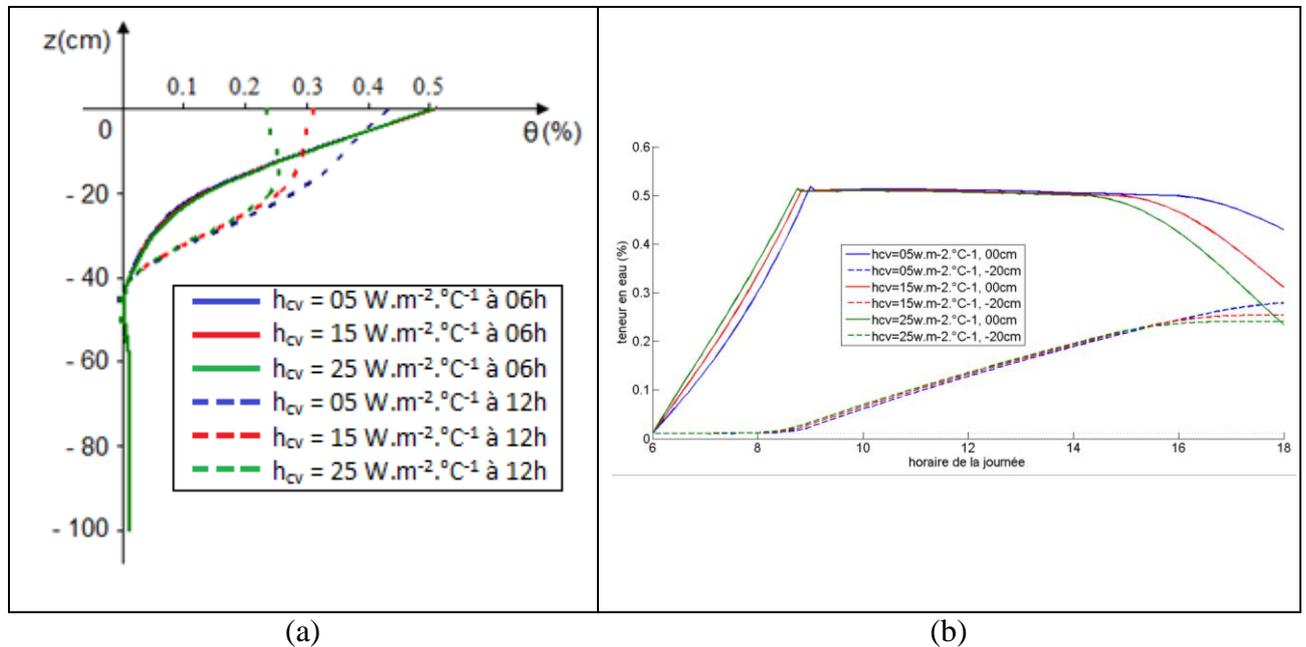


Figure III. 14: Profils hydriques du matériau « terre » pour  $h_{cv}$  variable

Sur les courbes de la figure III.14a, on peut remarquer que :

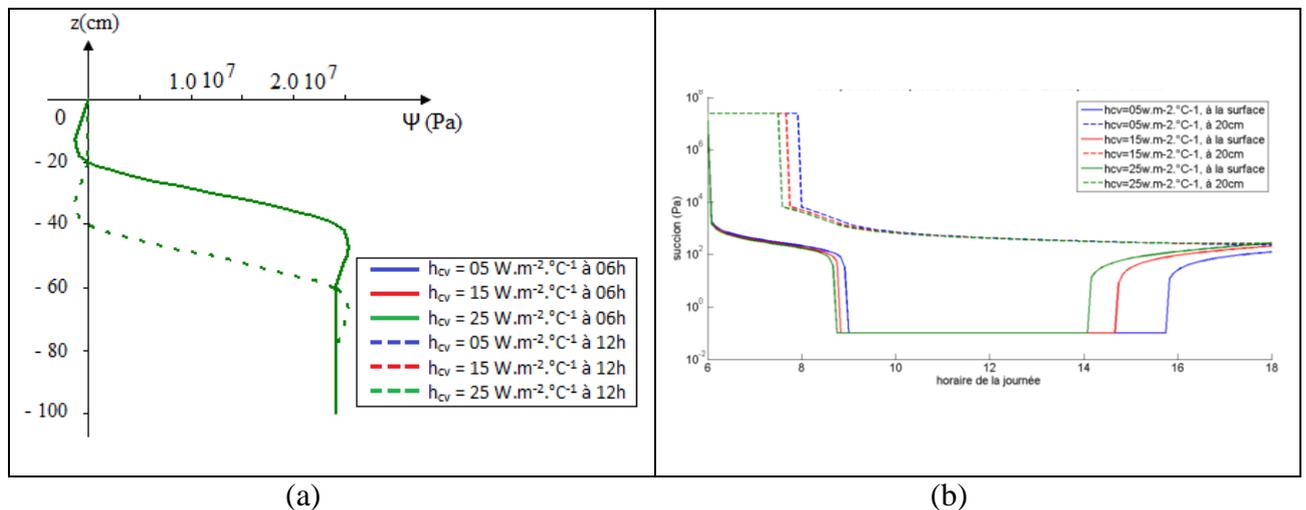
- ✓ d'une part, les variations des profils hydriques traduisent une diminution du niveau d'humidification à mesure que la valeur de  $h_{cv}$  augmente. Cette observation peut être attachée à une activation du processus d'évaporation pour  $h_{cv}$  croissant, ce qui accélère l'assèchement progressif du milieu en commençant par la surface.
- ✓ d'autre part, au bout de 12h d'infiltration, l'impact de la variation de la valeur du paramètre  $h_{cv}$  n'affecte que l'état d'humidification de la couche voisine de la surface du sol, jusqu'à 20cm de profondeur environ.

A titre d'illustration, nous avons reproduit dans la figure III.14b, les courbes d'évolution de la teneur en eau en surface et à 20cm de profondeur du sol pendant 12h d'infiltration et pour les trois valeurs de  $h_{cv}$ .

Sur les courbes obtenues, on peut noter qu'aux heures d'activité du flux solaire (de 6h à 15h) les niveaux de la teneur en eau varient de la même manière, quelle que soit la valeur de  $h_{cv}$ ; les différences d'impact de  $h_{cv}$  sur les profils hydriques ne sont observables qu'en période de déclin du flux solaire. Cette observation rejoint celle qui a été faite sur les profils thermiques comme résultat d'un masquage de l'échange convectif par l'irradiation solaire.

### Profil de succion

Les calculs effectués sur la répartition des succions ont conduit aux tracés de profil qui sont présentés dans la figure III.15.



**Figure III. 15: Profils de succion du matériau « terre » pour  $h_{cv}$  variable**

De par sa définition, l'intensité de la succion est définie en fonction du niveau de saturation (répartition de la teneur en eau) du lieu d'infiltration. Ainsi, l'interprétation des courbes de la figure III.15 doit faire référence aux profils hydriques établis dans la figure III.14.

Dans ces profils hydriques, il a été observé qu'aux heures d'activité solaire, l'effet des variations de  $h_{cv}$  est masqué par l'action de la radiation solaire, c'est-à-dire qu'il n'induit aucune modification sur le profil et, ce phénomène se répercute sur le profil de succion (figure III.15b).

Ainsi sur la figure III.15a, on peut noter que pour  $h_{cv}$  croissant, l'assèchement des couches est accéléré et la succion devient plus intense ce qui renforce l'attraction de rétention de l'eau dans les couches en profondeur.