

- Etude paramétrique sur la déformation du sol

IV.3.1- Conditions de l'étude

Dans ce paragraphe, nous avons rapporté les résultats des calculs sur la déformation d'un sol siège de l'infiltration, selon le degré de porosité, les conditions saisonnières (été/hiver) et, le coefficient de convection thermique.

Pour simuler les différentes porosités, nous avons utilisé les valeurs des grandeurs mécaniques caractéristiques des trois matériaux (argile, terre, sable) qui sont portées dans le tableau IV.1 ci-après :

Tableau IV. 1 : Valeurs des constantes mécaniques utilisées

Type de sol	Coefficient de Poisson (ν)	Module d'Young (E en Pa)
Argile	0,4	$1,3 \cdot 10^{10}$
Terre	0,3	$1,2 \cdot 10^{10}$
Sable	0,2	$1,1 \cdot 10^{10}$

Source : [44], [45]

Les conditions saisonnières ont été paramétrées par les variables suivantes (Figure IV.6) :

- ✓ la température ambiante T_∞
- ✓ l'intensité de l'action convective du vent (coefficient de convection h_{cv})
- ✓ le flux solaire ϕ_0 , le flux de précipitation q_e et le flux hydrique d'évaporation q_s
- ✓ la pression atmosphérique qui s'applique à la surface supérieure du modèle.

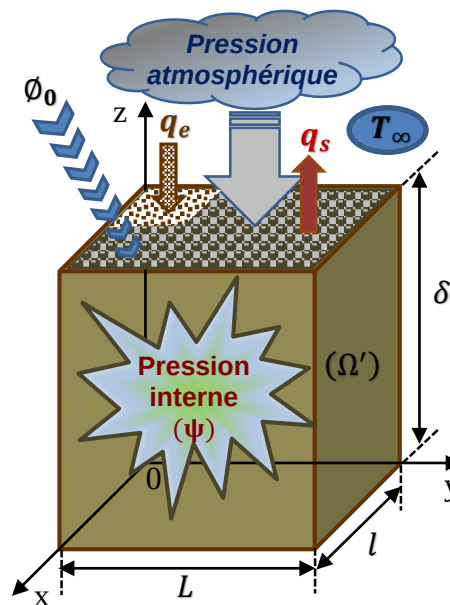


Figure IV. 7: Conditions de l'étude paramétrique

IV.3.2- Modalité de présentation des résultats

Le principal objectif des calculs est de déterminer le champ de déformation de la structure dans les conditions que nous nous sommes fixées et, dans les calculs, ce concept a été traduit par le champ de déplacement.

Pour chaque type de sol, l'accès à une description volumique de la répartition des champs de déplacement a été réalisé par le regroupement des observations relevées sur les plans nodaux $(0,x,y)$ parallèles et, situés à différentes profondeurs de la structure.

Au niveau de chaque plan nodal, les résultats en x , notées $\{u_0\}$, du vecteur de déplacement $\underline{U}$ servent à décrire le mouvement de déplacement transversal. Pour y accéder, nous avons choisi comme nœuds représentatifs de chaque plan nodal, le nœud central où la charge hydrique est appliquée et, le nœud extrême situé à la frontière du modèle.

Par exemple, les nœuds 126 et 150 sont les nœuds de description utilisés pour le plan nodal représenté par la surface supérieure (Figure IV.7).

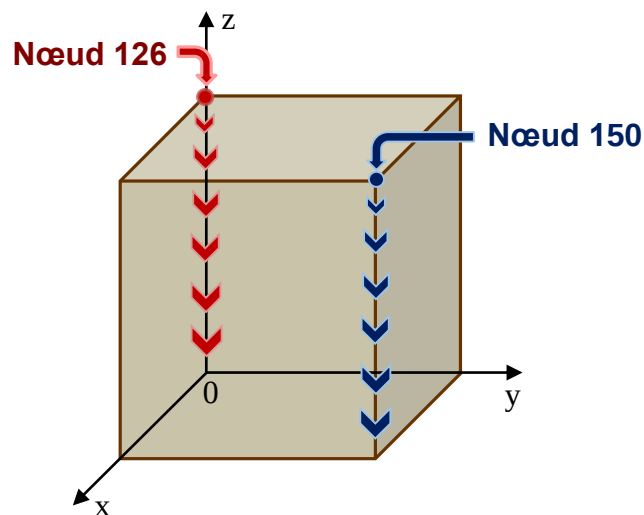


Figure IV. 8: Nœuds de repérage sur la surface supérieure

Suivant la direction verticale, les variations du champ de déplacement sont déduites des composantes en z , notées $\{w_n\}$, obtenues aux nœuds centraux de chaque plan nodal, en descendant en profondeur (126 – 101 – 76 – 51 – 26 – 1).

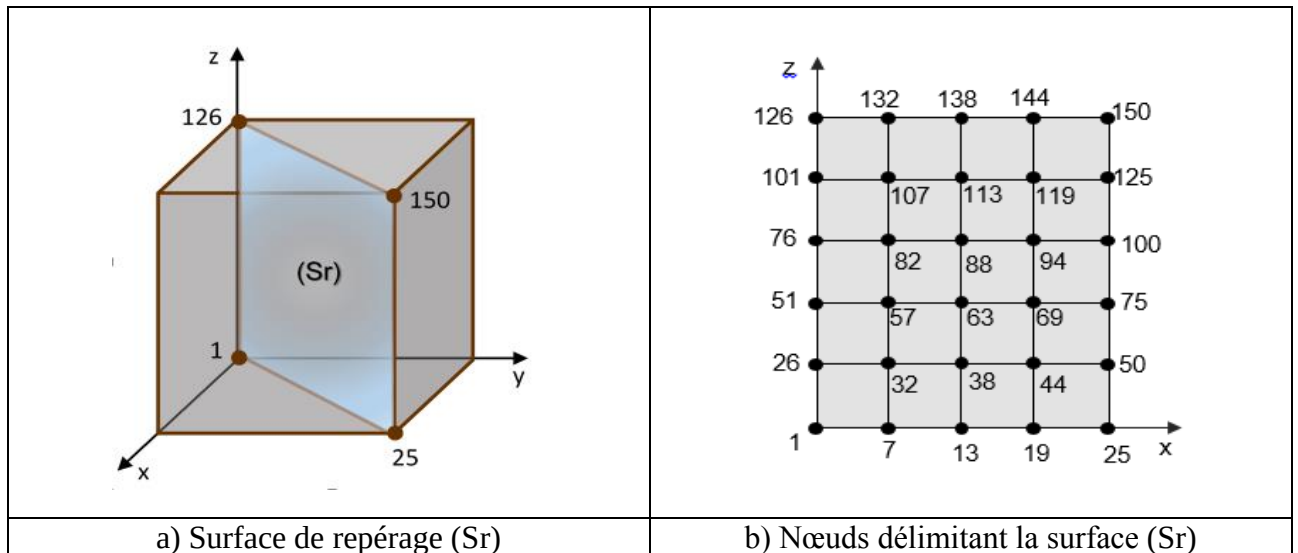


Figure IV. 9 : Nœuds de description du déplacement vertical

Dans une première série de calculs, nous avons déterminé le vecteur déplacement des nœuds situés sur le plan de repérage (Sr), dans les conditions suivantes :

- Condition saisonnière : en été
- Condition de convection thermique : $h_{cv} = 05 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$
- Types de sol : Sable - Terre – Argile

IV.3.3- Résultats

IV.3.3.1- Paramètre : degré de porosité

a) Type de sol : SABLE

a.1- Déplacement latéral

D'après les résultats des calculs, chaque nœud du modèle est caractérisé par son propre déplacement latéral. Les tracés des variations du déplacement u_n en fonction du temps, au niveau des nœuds extrêmes de chaque plan nodal (126 et 150), sont portés dans la figure IV.10a.

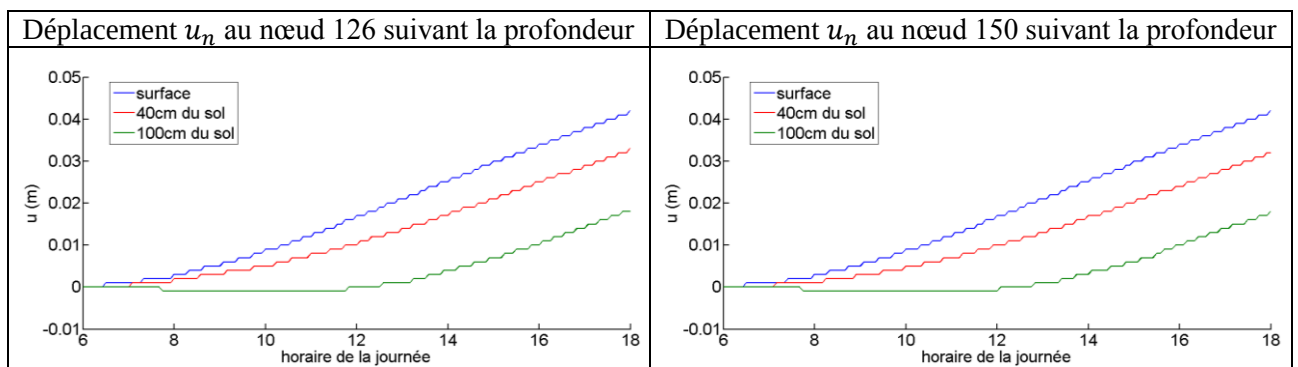


Figure IV. 10 a: Déplacement u_n dans le sable (en surface et en profondeur)

Deux remarques peuvent être dégagées de ces réseaux de courbes :

- d'une part, la vitesse de déplacement latéral des nœuds diminue à mesure que l'on descend en profondeur
- d'autre part, pour les nœuds extrêmes situés sur trois plans nodaux, de profondeurs respectives : 0cm, -40cm et -100cm à partir de la surface du sol, les réseaux de courbes de déplacement sont quasiment semblables.

L'observation faite dans la première remarque est une conséquence de la loi de dépendance qui lie la répartition des suctions à celle des teneurs en eau. En effet, étant donné que les déformations de structure considérées, résultent en premier lieu des actions mécaniques de la succion dont les valeurs dépendent du degré d'humidification du milieu, le mode d'évolution des déplacements ne peut que refléter celui de la teneur en eau, quand on descend en profondeur (cf. partie III).

Néanmoins, on peut se donner quelques ordres de grandeur de l'amplitude des déplacements latéraux $u(\text{cm})$ en fonction du temps t et, à différents niveaux de profondeur h (Tableau IV.2)

Tableau IV. 2 : Variation de $u(\text{cm})$ en fonction du temps t et de la profondeur h

$t(h)$ \ $h(\text{cm})$	0	- 40	- 100
06	0	0	0
12	~ 2	~ 1	0
18	~ 4	~ 3	$\sim 1,8$

Ainsi, d'après les calculs, tant que les contraintes mécaniques exercées par les suctions évoluent au sein du sol, ce dernier subit un écartement qui s'amplifie en commençant par la couche en surface (Figure IV.10b).

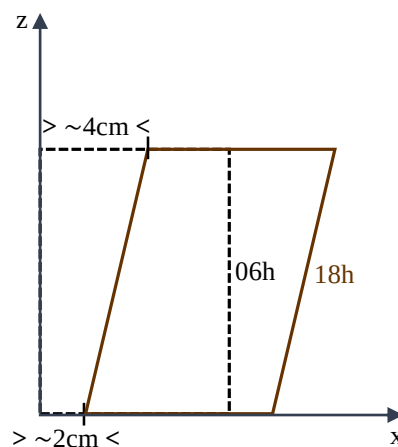


Figure IV. 10 b: Profil du déplacement latéral dans le sable au bout de 12h d'infiltration

On peut alors s'attendre à ce que le mouvement continue jusqu'à l'obtention d'un état d'équilibre hydrique du sol (arrêt du processus d'infiltration) ou, jusqu'à la suppression des charges appliquées.

❖ La deuxième remarque peut relever du fait que dans l'ensemble des valeurs du déplacement latéral $\{u\}$, celles des nœuds centraux de chaque plan nodal (nœuds d'application de la charge hydrique) sont les plus élevées. L'effet mécanique de ces maxima de déplacement s'impose aux nœuds voisins, ce qui conduit à un déplacement en bloc des nœuds de chaque plan nodal. Dans ces conditions, les variations, en fonction du temps, des déplacements des nœuds situés à un même niveau de profondeur ne peuvent qu'être identiques.

Déplacement vertical

En calculant les composantes $\{w_n\}$ du vecteur déplacement des nœuds du modèle, nous avons porté graphiquement celles des nœuds représentatifs de trois plans nodaux qui sont : le plan en surface et ceux situés à -40cm et -100cm de profondeur. Les tracés obtenus sont portés dans la figure IV.11a.

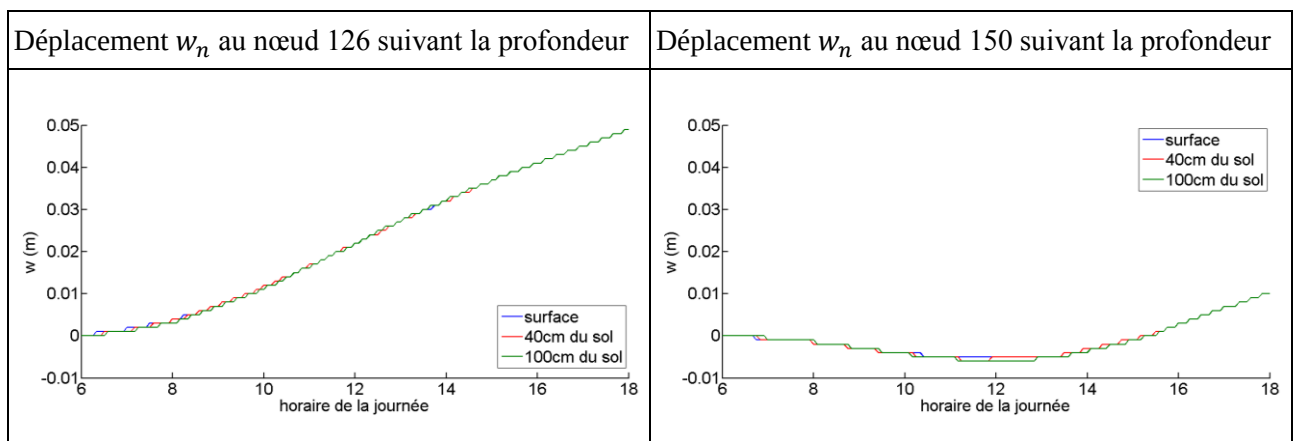


Figure IV. 11 a: Déplacement w_n dans le sable (en surface et en profondeur)

Ces profils de déplacement traduisent l'apparition d'un gonflement de la structure au niveau de la colonne des nœuds centraux (126 – 101 – 76 – 51 – 26 – 1) où la charge hydrique est appliquée. L'égalité des variations de w à différentes profondeurs, que l'on observe sur les deux profils signifie que le mouvement déforme la structure en bloc sur toute son épaisseur. De même, on note que l'amplitude du gonflement croît en hauteur au fil du temps pour atteindre 5cm environ au bout de 12heures d'infiltration.

En reproduisant la déformation sur la totalité du modèle, reconstituée à partir du modèle réduit au quart, on peut en donner la représentation en nappe dans la figure IV.11b.

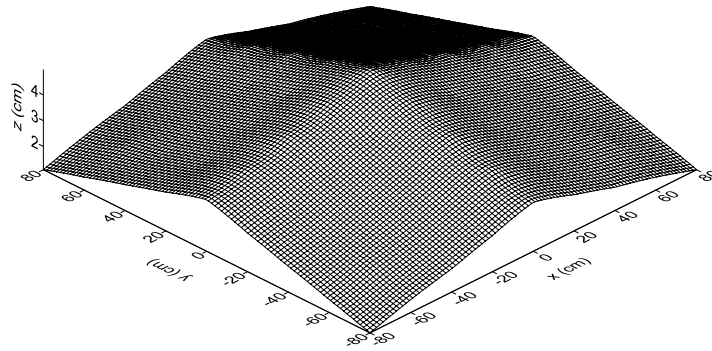


Figure IV. 11 b: Représentation en nappe du déplacement w du modèle entier (cas du sable)

En récapitulation, pour un sol de type sable qui est un milieu de forte porosité et, qui n'a pas de rigidité, la combinaison des déplacements u et w fait ressortir les points suivants :

- La variation de la répartition des suctions, qui font suite à toute variation de la répartition des teneurs en eau dans le volume du sol, induit des mouvements d'étalement de la structure, aussi bien latéralement que verticalement. Et dans ces mouvements, on peut noter que la vitesse du mouvement de déplacement vertical est légèrement plus élevée que celle du mouvement latéral. Cette différence peut être attribuée à la contribution de la pesanteur.
- L'étalement par déformation évolue en s'accroissant au cours du temps tant que l'apport hydrique est maintenu
- Puisque la température active le processus de transfert hydrique (cf. Partie III), il est prévisible que l'évolution de la déformation serait d'autant plus accélérée que le niveau de température est élevée, par exemple, en saison d'été.

Ce type de déformation peut être à l'origine du démarrage des processus d'éboulement si les bords latéraux de la structure sont libres.

b) Type de sol : TERRE

Pour ce second cas où le milieu considéré est moins poreux que le sable, nous avons effectué des séquences de calcul analogues au cas précédent afin de dégager l'impact du degré de porosité du milieu sur la déformation résultant de la présence des suctions.

b.1 -Déplacement latéral

En conservant les mêmes modes de présentation des résultats que ceux adoptés précédemment, les tracés exprimant l'évolution des composantes de déplacement u des nœuds représentatifs des trois plans nodaux, sont portés dans la figure IV.12 a.

N.B : Comme pour le cas du sable, la similitude des courbes de variation établies aux nœuds respectifs 126 et 150, est aussi observée dans le cas de la terre et de l'argile. Par conséquent, nous nous sommes limités, pour la suite, à une description basée uniquement sur les courbes relatives au nœud 126.

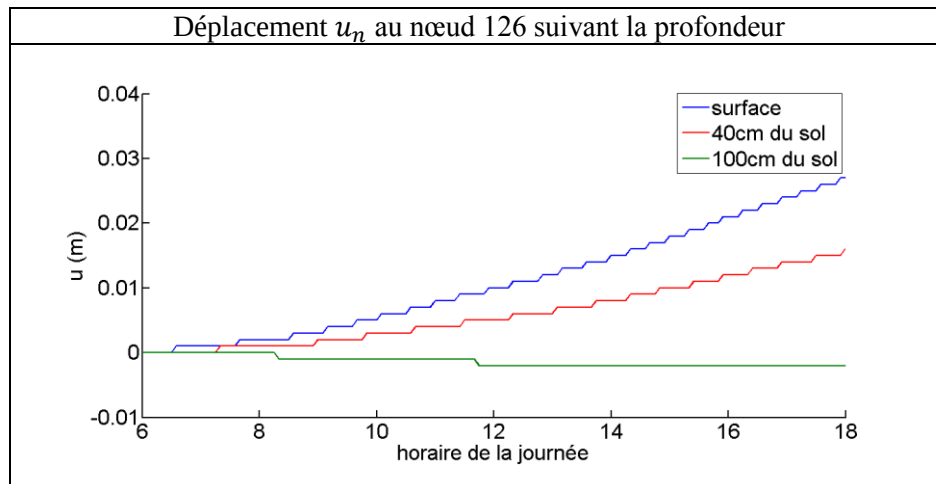


Figure IV. 12 a: Déplacement u_n dans la terre (en surface et en profondeur)

D'après ce résultat, on a pu remarquer que les modes d'évolution de la composante u du vecteur déplacement, dans la terre et dans le sable sont similaires. Ainsi, les remarques émises pour le cas du sable sont aussi valable pour le cas de la terre, à la différence que les valeurs numériques ne sont pas les mêmes.

En effet, on note que dans la terre, l'amplitude de l'étalement latéral de la surface du modèle est quasiment réduite à la moitié de celle observée dans le sable. Pour ce qui est des surfaces en profondeur, on n'observe que de très faibles déplacements, voire nuls. Ce résultat est assez prévisible puis que la diminution de la densité de porosité du milieu entraîne un ralentissement de l'écoulement hydrique dans le processus d'infiltration.

Par analogie avec le cas précédent, un schéma du profil de déplacement transversal correspondant au cas de la terre est présenté dans la figure IV.12b.

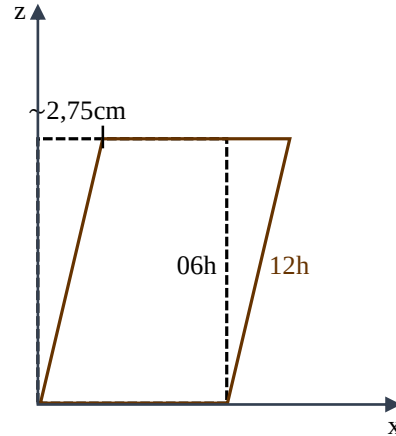


Figure IV. 12 b: Profil de déplacement latéral dans la terre au bout de 12h d'infiltration

D'après ce schéma, on retrouve le même mode de déformation que précédemment. Cependant, il faut mentionner les deux points de différenciation suivants :

- d'une part, le mouvement de déformation évolue plus lentement que pour le cas du sable,
- d'autre part, l'inclinaison en bloc de la structure est limitée en profondeur c'est-à-dire qu'elle n'affecte pas les couches profondes (à partir de 1m de profondeur dans nos conditions de calcul).

Ces deux remarques sont prévisibles si on se réfère à la loi de dépendance qui lie la teneur en eau à la succion. Ainsi, on peut avancer que la vitesse et la distance de portée de l'étalement du sol, faisant suite à sa déformation latérale, sont d'autant plus réduites que la densité de porosité diminue.

b.2 -Déplacement vertical

L'évolution du déplacement vertical de la structure peut être reproduite à partir de la variation des composantes nodales $\{w_n\}$. Les tracés correspondants sont portés dans la Figure IV.13a.

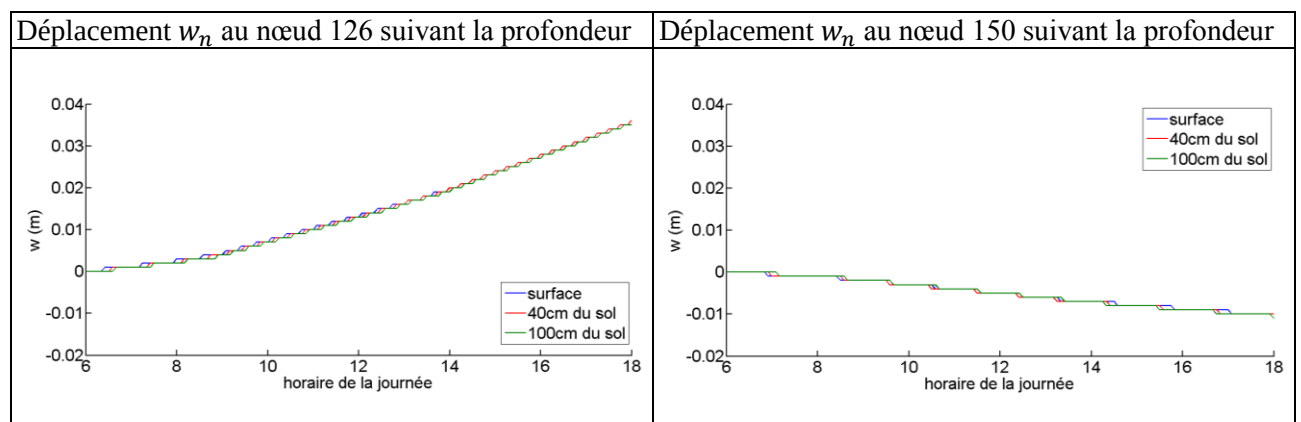


Figure IV. 13 a: Déplacement w_n dans la terre (en surface et en profondeur)

D'après ces courbes, on peut émettre les remarques suivantes :

- d'une part, on observe sur les deux profils, le fusionnement des courbes de variation de w associées respectivement à des plans nodaux de différentes profondeurs. Cela signifie que le mouvement de déplacement vertical affecte la structure en bloc, sur toute son épaisseur
- d'autre part, les amplitudes du gonflement au niveau du nœud 126 (représentatif de la partie centrale du modèle) et du creux au niveau du nœud 150 (représentatif de la limite de la partie latérale) s'amplifient au cours du temps. Dans les conditions selon lesquelles est posé le problème, au bout de 12 heures de temps de calcul, la déformation consécutive au déplacement w relève la partie centrale du modèle jusqu'à une hauteur de 3,5cm environ, tandis qu'elle abaisse la partie latérale jusqu'à une profondeur voisine de -1,5cm.

Comme précédemment, on peut donner, dans la figure IV.13b, une représentation en nappe de la déformation du modèle, rapportée à la totalité de son volume.

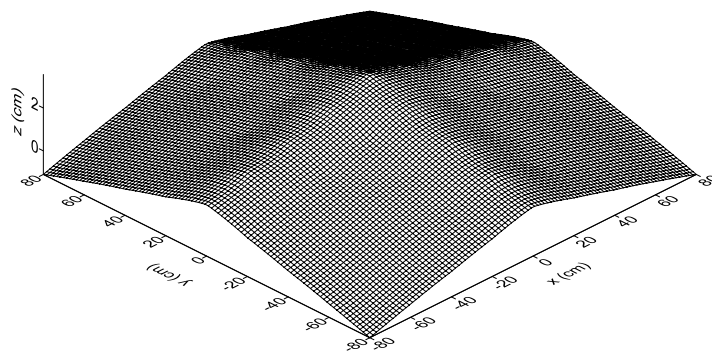


Figure IV. 13 b: Représentation en nappe du déplacement w du modèle entier (cas de la terre)

En bref, dans les résultats obtenus sur les déplacements aussi bien latéraux que verticaux, d'un sol de type « terre », on retrouve quasiment les mêmes allures de variation que celles observées pour le cas du sable, à la différence que les valeurs mises en jeu sont nettement inférieures. Cette différenciation peut être attachée à la différence de porosité entre les deux milieux, étant donné que cette dernière influe sur la répartition des teneurs en eau, donc sur celle des succions.

c) Type de sol : ARGILE

En reprenant le même raisonnement que celui adopté pour les deux cas précédents, nous avons effectué les calculs se rapportant à ce troisième type de sol qui est l'argile. Les résultats obtenus sont présentés ci-après (Figure IV.14).

c.1 -Déplacement latéral

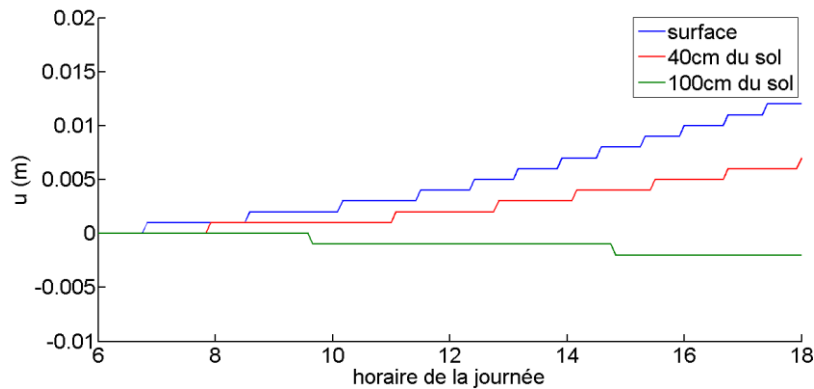


Figure IV. 14: Déplacement u_n dans l'argile (en surface et en profondeur)

Ces courbes montrent que l'étalement latéral en surface, jusqu'à une profondeur de 40cm est très réduit (≤ 1 cm), tandis qu'il est quasiment inexistant à partir de 1 mètre de profondeur.

Cette observation conforte les remarques émises pour le cas des deux types de sol considérés précédemment, sur le fait que dans un milieu faiblement poreux, l'écoulement de l'eau d'infiltration est fortement ralenti ; il en résulte un amoindrissement de l'effet de succion qui réduit l'amplitude des déformations mécaniques du milieu.

Par ailleurs, il est à noter que le prolongement en profondeur de l'écartement en surface est très réduit, s'identifiant presque à une cassure superficielle du sol.

c.2 -Déplacement vertical

Dans des conditions analogues à celles qui ont été adoptées pour les cas du sable et de la terre, les calculs relatifs au déplacement vertical w d'un sol de type argile ont conduit aux résultats qui sont portés dans la figure IV.15.

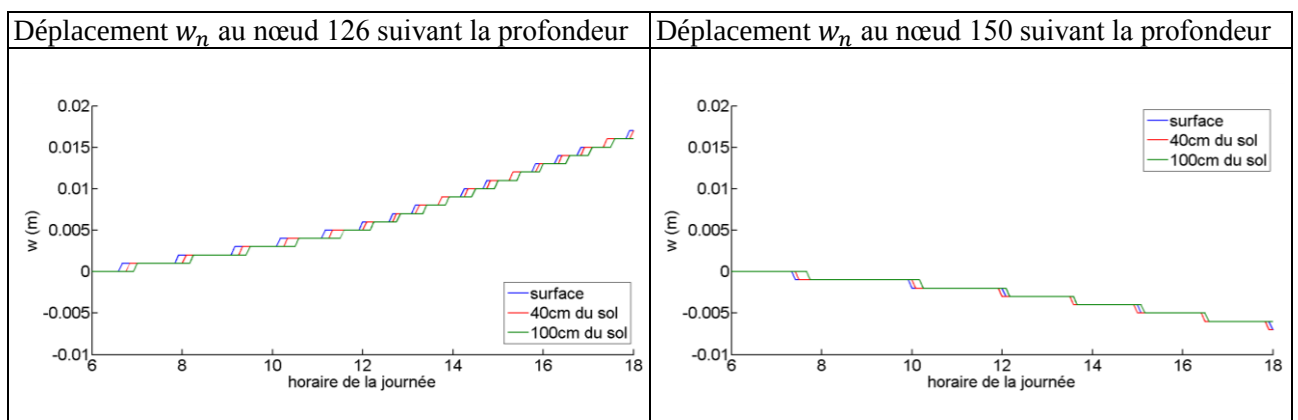
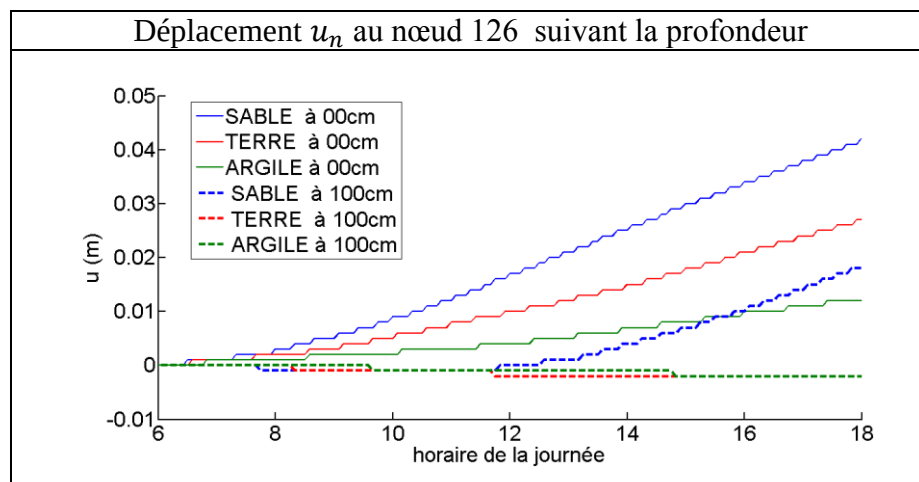


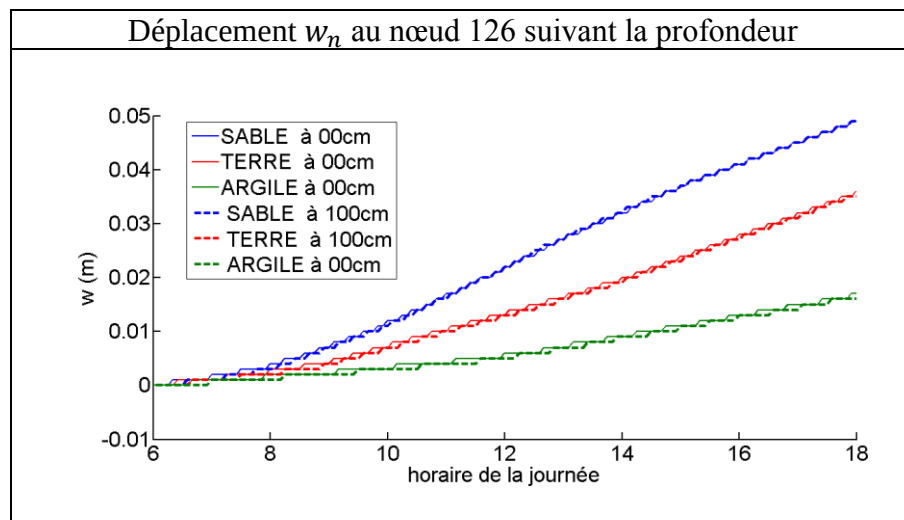
Figure IV. 15: Déplacement w_n dans l'argile (en surface et en profondeur)

D'après cette figure, l'allure des courbes de variation du déplacement vertical w d'un sol argileux ne diffère pas beaucoup de celle relative à un autre type de sol cependant, les échelles de valeurs qui caractérisent les courbes ne sont pas identiques. En effet, en passant du sable à l'argile, le déplacement maximal au nœud 126 passe de 3,5cm environ à une valeur voisine de 1,8cm et, au nœud 150 il passe de -2cm à -0,5cm environ.

Ainsi, les déformations calculées pour les trois types de sol présentent le même mode de variation mais, diffèrent par les valeurs des déplacements qui caractérisent ces déformations. En portant dans un même système d'axes, les tracés respectifs des variations des déplacements u et w , pour les trois types de sol, on obtient les courbes portées dans les figures IV.16a et IV.16b.



(a)



(b)

Figure IV. 16: Comparaison des champs de déplacement $\{u_n, w_n\}$ dans le sable, la terre et l'argile

D'après ces deux figures récapitulatives, on peut dire que dans des conditions identiques de charge hydrique, la déformation induite par la succion dans un sol est d'autant plus importante que le degré de porosité est faible.

En guise de synthèse, les remarques qui ont été dégagées à partir des résultats de calcul sur les déplacements de structure, résultant de l'action des suctions, peuvent être récapitulées comme suit.

- La réaction du sol vis-à-vis des contraintes mécaniques internes imposées par les suctions varie selon son degré de porosité et, cette réaction se manifeste par des phénomènes observables qui peuvent aller d'une simple déformation, réversible ou non, à un éboulement.

- L'apparition de ces phénomènes traduit un basculement de l'état d'équilibre du bloc de structure vers un état de déséquilibre mécanique. En effet, pour des conditions de charges hydrique et thermique où, l'action des suctions impose des forces de déplacement dont l'intensité est supérieure à celle des forces de cohésion entre les particules constituantes, l'équilibre de l'ensemble est rompu, faisant place à un état de déséquilibre tel que :

- En milieu très poreux, la forte densité d'espaces vides facilite le drainage des éléments liants initialement présents dans la structure. S'il y a un mouvement de déplacement en bloc, les liaisons deviendront vulnérables et, peuvent se rompre sans difficulté. A ce stade, même si l'application des charges est arrêtée, le déséquilibre initialement déclenché, peut évoluer en s'amplifiant, l'effet de pesanteur aidant. Dans ce cas, le processus peut aboutir au phénomène d'éboulement.

- En milieu faiblement poreux, la faible densité d'espaces vides augmente la compacité. Cette augmentation présente deux conséquences intéressantes pour l'équilibre de la structure :

- d'une part, l'écoulement en profondeur de l'eau d'infiltration sera relativement ralenti ce qui y limite l'action des suctions,
 - d'autre part, elle assure une force de cohésion plus intense pour contrer les forces de déplacement dans le milieu.

Ces deux effets jumelés conduisent à un état de déformation dont la portée se limite à une épaisseur superficielle du sol. Même dans des conditions de charges relativement poussées, les phénomènes de déplacement qui s'ensuivent peuvent apparaître sous forme de craquelures ou de cassures partielles. Dans ce cas, on peut s'attendre à ce que seule une exposition de longue durée ($\geq$ un mois) à une charge hydrique continue, peut aboutir au basculement vers un état de déséquilibre qui se manifeste par une rupture en bloc de la structure.