

## Développement théorique

Le travail bibliographique du chapitre I montre qu'il vaut mieux utiliser la succion pour décrire physiquement le processus d'évaporation, car la succion représente la capacité de rétention d'eau du sol et la courbe de rétention d'eau joue un rôle important dans l'analyse du phénomène. Dans ce chapitre, on développe d'abord une approche théorique dans laquelle la succion est utilisée comme variable principale pour l'analyse du phénomène d'évaporation et notamment pour l'estimation du taux d'évaporation. Ensuite, on présente des procédures de validation de l'approche ainsi que son application au calcul du taux d'évaporation.

### IV.1 Développement d'une nouvelle approche

#### IV.1.1 Effet de la succion à la surface du sol sur l'évaporation

On a montré dans le chapitre I que la teneur en eau n'est pas le paramètre approprié pour estimer le taux d'évaporation. En revanche, la succion  $s$  semble être le paramètre pertinent dans la description du phénomène d'évaporation des sols. De plus, l'étude bibliographique montre également une simplification du développement tant que le rapport  $AE/PE$  est utilisé (Chanzy et Bruckler 1993; Wilson et al. 1997). Ainsi, dans notre développement, la corrélation entre le rapport  $AE/PE$  et la succion du sol est étudiée, qui est notée  $AE/PE(s)$ .

Premièrement, la relation  $AE/PE(\theta)$  est révisée à travers les résultats disponibles dans la littérature. Quand la courbe de rétention d'eau est disponible, la teneur en eau est ensuite convertie en succion. Enfin, le taux d'évaporation maximal  $PE$  est calculé s'il n'est pas disponible. Faute de données, seuls les résultats de Chanzy et Bruckler (1993) et de Kondo et al. (1990) sont analysés.

L'analyse est réalisée en deux étapes. La première étape consiste en une conversion des relations  $AE/PE(\theta)$  en  $AE/PE(s)$  et en une comparaison entre ces deux relations.

Les travaux de Chanzy et Bruckler (1993) sont considérés à cette fin et les résultats sont présentés sur les Figure IV.1(a,b,c,d). Il s'agit en abscisses de la teneur en eau volumique moyenne et de la succion moyenne d'une couche de sol de 30 mm pour la Figure IV.1(a) et la Figure IV.1(b) respectivement. De même, la Figure IV.1(c) et la Figure IV.1(d) présentent les variations de  $AE/PE$  en fonction de la teneur en eau volumique et de la succion respectivement, pour une couche plus petite de 10 mm. Dans cette étude, trois sols différents sont étudiés : un terreau, une argile et un terreau argileux limoneux.

Premièrement, on y observe, quelque soit la profondeur moyenne considérée, un grand écart entre les corrélations des rapports  $AE/PE(\theta)$  (Figure IV.1(a) et Figure IV.1(c)). En revanche, avec la succion, les courbes se rapprochent, voire se superposent (Figure IV.1(b) et Figure IV.1(d)). Et le rapprochement de ces courbes correspondant aux trois matériaux différents montre que  $AE/PE(s)$  pourrait être indépendant du type de sol, ce qui n'est pas le cas pour  $AE/PE(\theta)$ .

Deuxièmement, si l'on compare les courbes utilisant la succion, c'est-à-dire les rapports  $AE/PE(s)$ , entre les deux cas : succion moyennée sur 30 mm de sol (Figure IV.1(b)) et succion moyennée sur 10 mm de sol (Figure IV.1(d)), il semblerait que les courbes se rapprochent davantage quand la succion est moyennée sur une épaisseur plus petite, de 10 mm.

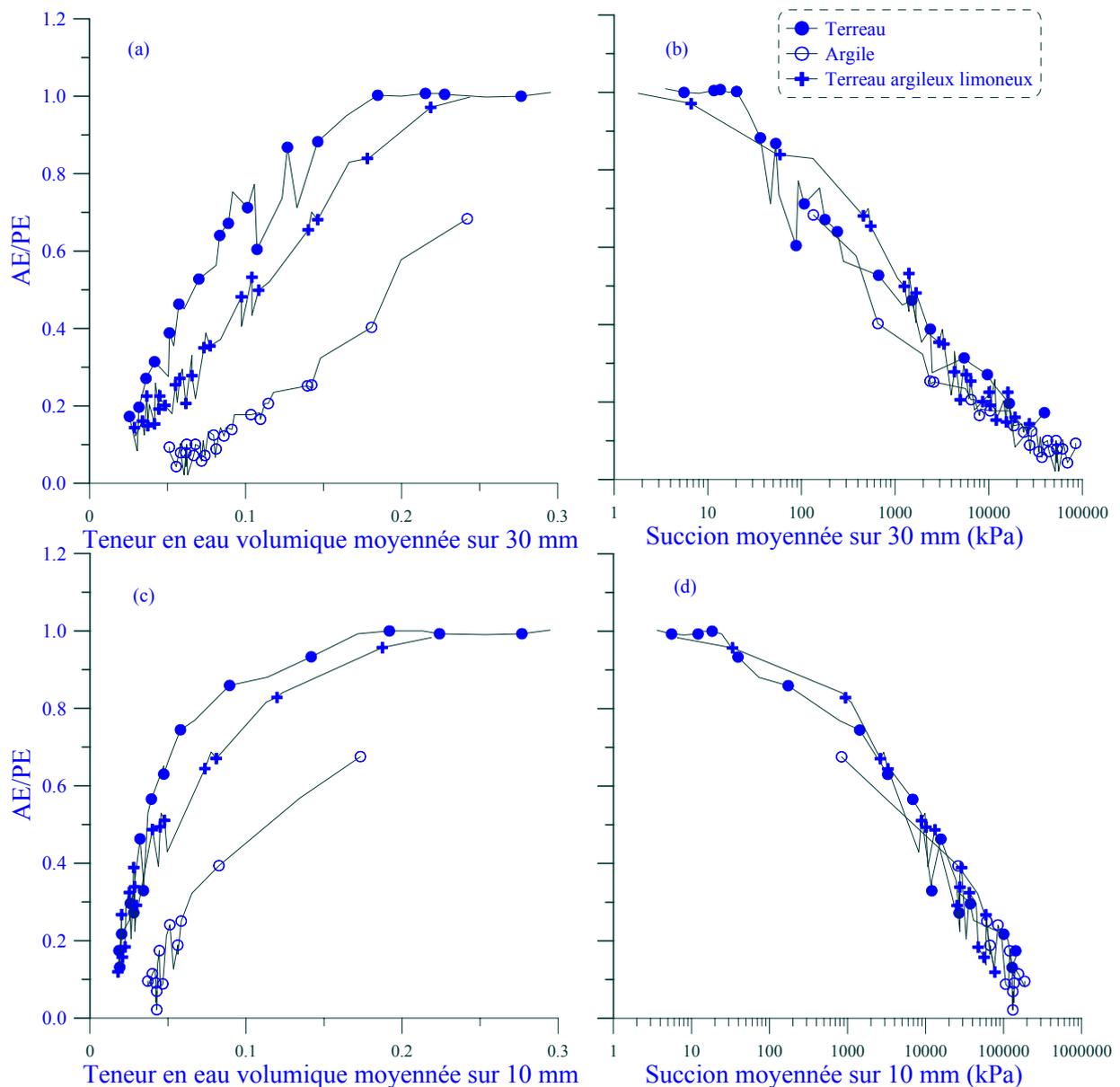


Figure IV.1.  $AE/PE$  en fonction de la teneur en eau volumique moyennée sur une couche de 30 mm (a), de 10 mm (c), et en fonction de la succion moyennée sur une couche de 30 mm (b), de 10 mm (d) (à partir des données de Chanzy et Bruckler 1993)

La deuxième phase de cette analyse des résultats de la littérature est de vérifier la forme de ces courbes  $AE/PE(s)$  tant que la succion est mesurée à la surface du sol. Les données de Kondo et al. (1990) sont utilisées à cette fin. Les courbes  $AE/PE(s)$  avec  $s$  à 20 mm de profondeur et  $s$  à la surface sont présentées sur la Figure IV.2.

La Figure IV.2 montre une tendance nette d'un déplacement ascendant des courbes  $AE/PE(s)$  quand la position de mesure de succion s'approche de la surface. En effet, les courbes moyennées sur 20 mm sont largement en dessous des courbes avec la succion mesurée à la surface. De plus, on observe à nouveau que les courbes se superposent quand la succion est relevée à la surface.

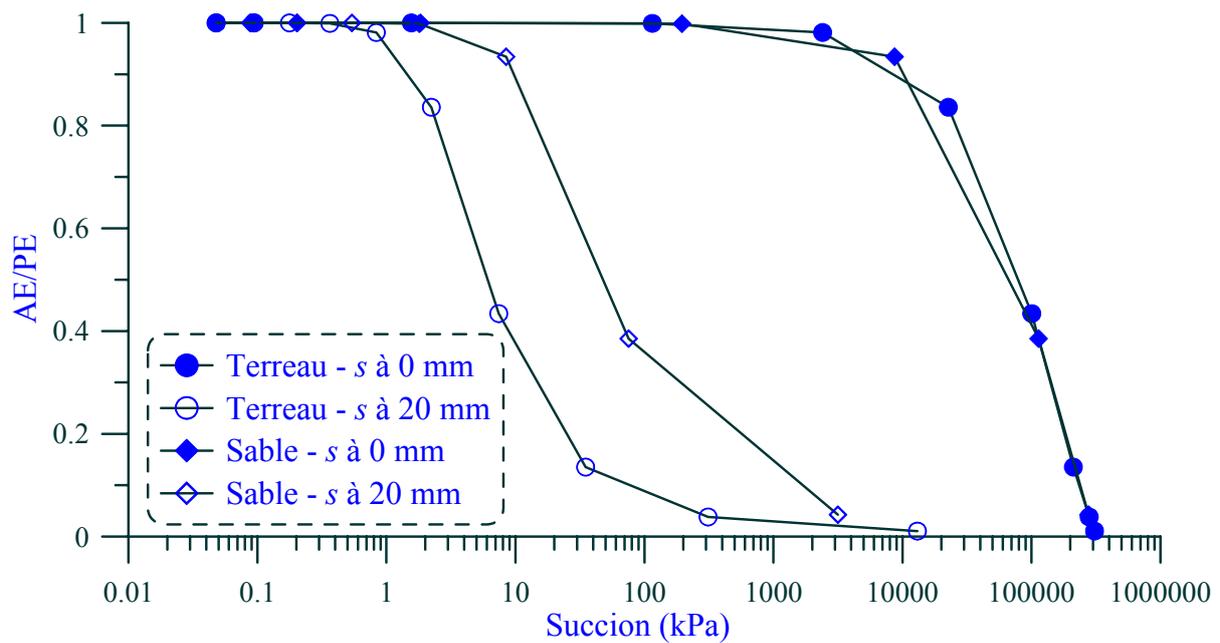


Figure IV.2.  $AE/PE$  en fonction de la succion moyennée sur une couche de 20 mm proche de la surface et de la succion à la surface (à partir des données de Kondo et al. 1990)

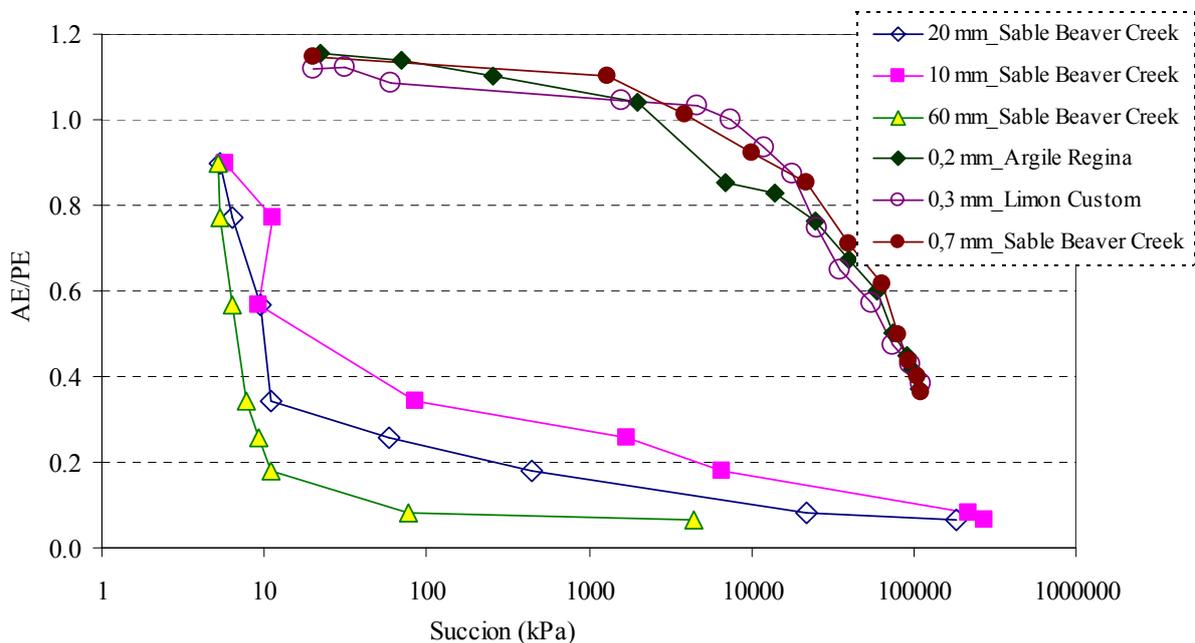


Figure IV.3.  $AE/PE$  en fonction de la succion d'une couche mince proche de la surface (à partir des données de Wilson et al. 1994; Wilson et al. 1997)

Afin de vérifier cette observation, les résultats de Wilson et al. (1994) sont analysés, ensemble avec les résultats de Wilson et al. (1997). Cette analyse est présentée sur la Figure IV.3. On observe que plus la couche de sol où la succion est considérée est mince, plus la position de la courbe correspondante est élevée. Autrement dit, à la même valeur de succion, plus le point de mesure de

succion est proche de la surface, plus le rapport  $AE/PE(s)$  est grand. De plus, cette figure indique une superposition nette des courbes de très faibles épaisseurs : 0,2 ; 0,3 ; 0,7 mm ; ceci pour trois sols différents : l'argile Regina, le limon Custom et le sable Beaver Creek, respectivement.

Enfin, toutes les courbes  $AE/PE(s)$  avec la succion mesurée à la surface ou proche de la surface (profondeur inférieure à 0,7 mm) sont placées ensemble sur la Figure IV.4. On note qu'il y a 5 sols différents : un terreau et un sable de Kondo et al. (1990) ; une argile, un limon, un sable de Wilson et al. (1997).

On constate une superposition nette de ces courbes sur une large gamme de succion (de 1000 à plus de 100 000 kPa). De plus, on observe quelques points dans les résultats de Wilson et al. (1997) avec le rapport  $AE/PE$  qui dépasse 1. Cela peut être expliqué par le fait que dans les essais de Wilson et al. (1997), le taux d'évaporation potentiel  $PE$  est mesuré sur un bac d'eau à côté du bac de sol et qui n'est pas calculé avec la méthode de résistances adoptée par Kondo et al. (1990).

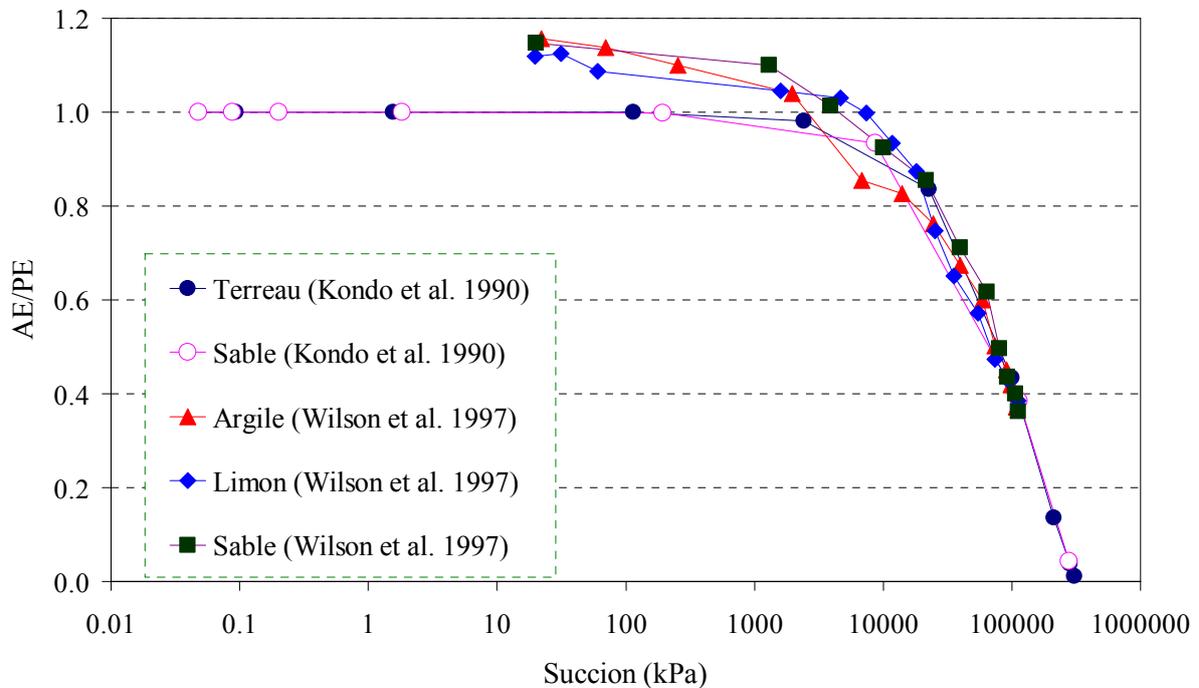


Figure IV.4.  $AE/PE(s)$  avec  $s$  mesurée en surface (à partir des données de Kondo et al. 1990; Wilson et al. 1997)

En conclusion, ces résultats confirment que :

- L'utilisation de la succion permet de s'affranchir de l'influence du type de sol dans l'estimation du rapport  $AE/PE$ . Ce n'est pas le cas avec l'utilisation de la teneur en eau.
- Les courbes  $AE/PE(s)$  montent quand l'épaisseur de la couche où la succion est mesurée diminue, c'est-à-dire ; à la même valeur de succion, plus le point de mesure est proche de la surface, plus le rapport  $AE/PE(s)$  est grand. Ces courbes se confondent quand les points de mesure sont très proches de la surface du sol.

#### IV.1.2 Démonstration théorique de la relation $AE/PE(s)$

Comme l'indique le chapitre I, la formule de Dalton (1802) fait l'objet d'un grand nombre d'études pour estimer le taux d'évaporation. Dans notre étude, cette formule est également développée pour aboutir à la relation  $AE/PE(s)$ . Cette formule décrit le taux d'évaporation en fonction du vent ( $f(u)$ ) et de la pression de vapeur d'eau dans l'air proche de la surface du sol ( $P_{va}$ ) et de la pression de vapeur d'eau à la surface du sol ( $P_{vs}$ ) [IV.1].

$$AE = f(u)(P_{vs} - P_{va}) \quad [IV.1]$$

La forme de  $PE$  est similaire, avec l'utilisation de la pression de vapeur d'eau saturante à la surface ( $P_{vs}^s$ ) à la place de la pression de valeur d'eau partielle. Ainsi, le rapport  $AE/PE$  peut être écrit comme :

$$\frac{AE}{PE} = \frac{f_1(u)(P_{vs} - P_{va})}{f_2(u)(P_{vs}^s - P_{va})} = \frac{f_1(u)(P_{vs}/P_{vs}^s - P_{va}/P_{vs}^s)}{f_2(u)(1 - P_{va}/P_{vs}^s)} = \frac{f_1(u)(P_{vs}/P_{vs}^s - P_{va}/P_{va}^s \times P_{va}^s/P_{vs}^s)}{f_2(u)(1 - P_{va}/P_{va}^s \times P_{va}^s/P_{vs}^s)}$$

Où  $P_{va}^s$  est la pression de vapeur d'eau saturante dans l'air.

Par définition de l'humidité relative, on a :

$$h_s = P_{vs}/P_{vs}^s \quad \& \quad h_a = P_{va}/P_{va}^s$$

Et finalement

$$\frac{AE}{PE} = \frac{f_1(u)(h_s - h_a \times g(Ta)/g(Ts))}{f_2(u)(1 - h_a \times g(Ta)/g(Ts))} \quad [IV.2]$$

Où la pression de la vapeur d'eau saturante  $P_v^s$  dépend de la température  $T$  et elle est calculée selon cette fonction :

$$g(T) = -6096,938 \times T^{-1} + 21,240 - 2,711 \times 10^{-2} \times T + 1,673 \times 10^{-5} \times T^2 + 2,433 \times \ln(T) \quad [IV.3]$$

L'utilisation de la fonction  $g(T)$  a pour but de faciliter la présentation des formules développées dans cette étude.

Si l'on suppose que l'effet du vent dans les deux cas, évaporation potentielle ( $PE$ ) et évaporation réelle ( $AE$ ), est identique, on a

$$f_1(u) = f_2(u)$$

Si le point de mesure de température de l'air ( $T_a$ ) est proche de la surface, cette valeur  $T_a$  devrait être théoriquement proche de celle mesurée à la surface  $T_s$ . Les pressions de vapeur d'eau saturante mesurées à partir de ces deux températures sont donc également proches.

Ainsi,  $g(Ta) = g(Ts)$

Le rapport  $AE/PE$  peut être donc simplifié comme suit :

$$\frac{AE}{PE} = \frac{h_s - h_a}{1 - h_a} \quad [IV.4]$$

On note que l'humidité relative  $h_s$  est fonction de la succion du sol par l'équation de Kelvin :

$$s = \frac{RT_s}{gM} \ln h_s \quad [IV.5]$$

On a donc :

$$\frac{AE}{PE} = \frac{\exp\left(\frac{gM}{RT_s} s\right) - h_a}{1 - h_a} \quad [IV.6]$$

La formule [IV.6] est utilisée pour calculer le rapport  $AE/PE$  avec la succion  $s$  variant de 0,1 à 200 000 kPa. Dans ces calculs, on suppose que la température  $T_s = 20^\circ\text{C}$  et on considère trois valeurs d'humidité relative de l'air : 10, 40 et 70%. On note que l'humidité relative de l'air dans le travail de Wilson et al. (1997) varie de 30 à 70% et celle dans le travail de Kondo et al. (1990) n'est pas communiquée. Ces résultats sont confrontés aux résultats expérimentaux (Figure IV.5).

Sur cette figure, on observe un bon accord entre les résultats de calcul et ceux expérimentaux. Ce bon accord confirme que la succion est un bon paramètre dans l'estimation du rapport  $AE/PE$ . Puisque la succion peut être convertie facilement en humidité relative, cette dernière peut être également utilisée dans le calcul du rapport  $AE/PE$  [IV.4].

En fait, parmi les trois facteurs nécessaires pour l'évaporation, on note l'importance du gradient de l'humidité relative entre le sol et l'air proche de la surface, c'est-à-dire la différence entre  $h_a$  et  $h_s$ . Cela explique la présence de ces termes dans la formule [IV.4]. Dans le cas de l'évaporation potentielle, avec la présence de l'eau libre en surface, la valeur de l'humidité relative à la surface d'eau est égale à 1, ce qui explique le terme  $1 - h_a$  au dénominateur de cette formule. On note également que l'évaporation cesse quand  $h_s$  égale  $h_a$ .

De plus, considérer le taux d'évaporation avec son taux potentiel correspondant est une approche rationnelle. Car d'abord cela permet de simplifier l'effet du vent et de la température dans les calculs. De plus, comparer un taux réel au taux maximal permet de déterminer plus facilement dans quelle phase se situe le processus d'évaporation.

Dans les deux prochaines sections, on va étudier la pertinence des hypothèses de simplification lors du développement de la corrélation  $AE/PE(s)$ .

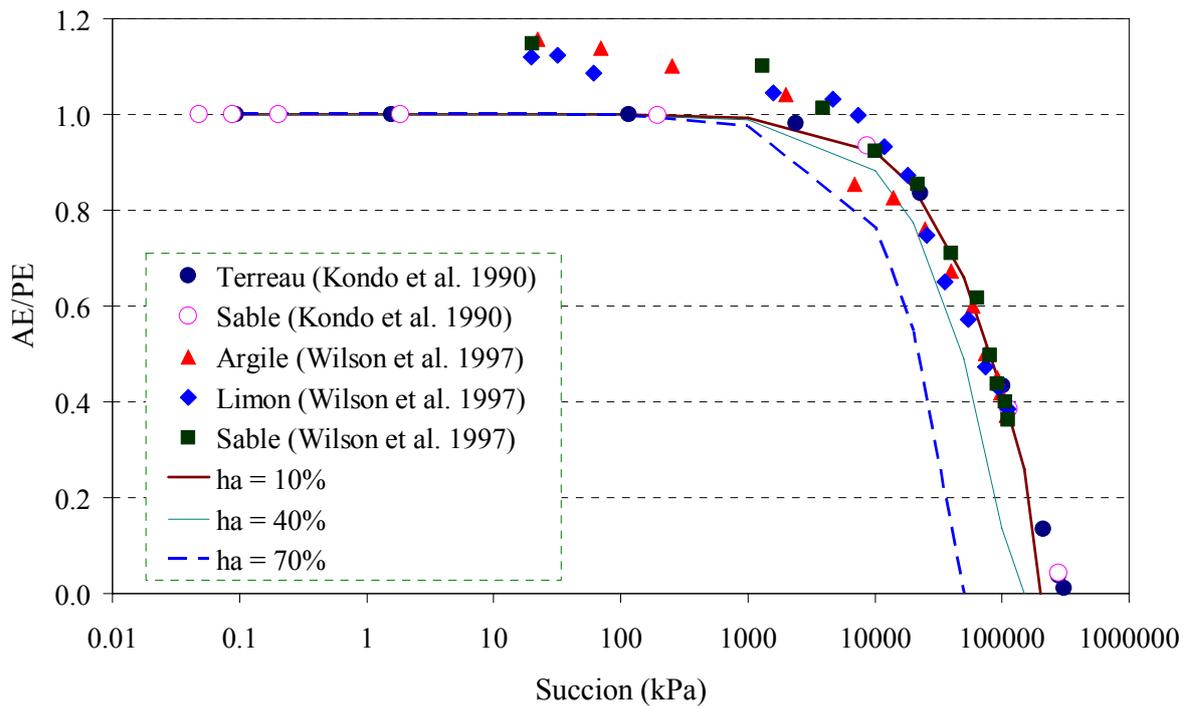


Figure IV.5. Confrontation des résultats de calcul aux données expérimentales

#### IV.1.3 Considération du profil de température dans l'évaporation

La formule [IV.4] est obtenue grâce à deux hypothèses concernant la température. La première est le faible gradient de température ; la deuxième suppose que les points de mesure de température soient proches de la surface. Ainsi, la formule [IV.4] est devenue comme ce qui suit.

$$\frac{AE}{PE} \approx \frac{h_r - h_a \times g(Ta) / g(Ts)}{1 - h_a \times g(Ta) / g(Ts)} \approx \frac{h_r - h_a}{1 - h_a}$$

Afin de vérifier ces hypothèses, le profil de température dans une journée donné par Blight (1997) est choisi. Les profils journaliers de température et d'humidité relative obtenus par Blight (1997) sont présentés sur la Figure IV.6. On y constate bien que ces gradients de température et d'humidité relative varient considérablement tout au long de la journée, en particulier, au dessus de 500 mm de la surface et dans la zone non saturée peu profonde (de 100 mm). Cette observation montre qu'il est nécessaire de prendre des précautions dans la simulation numérique des profils de température et d'humidité relative dans la zone proche de la surface.

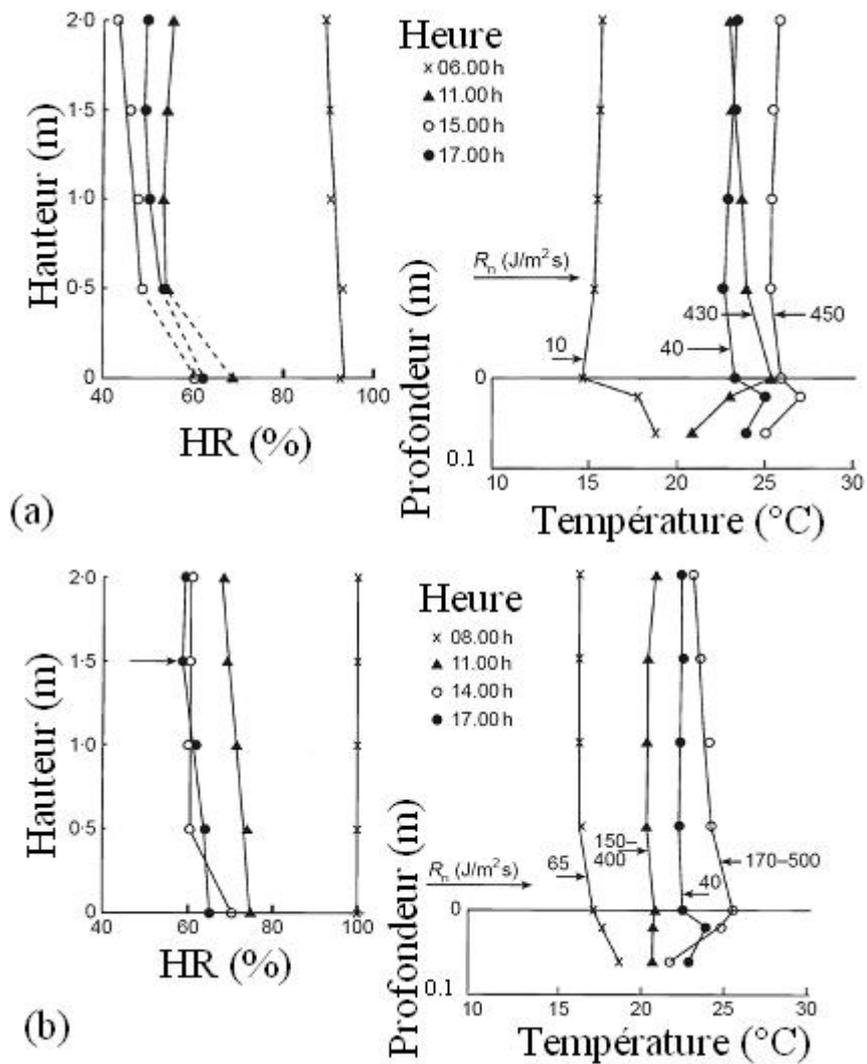


Figure IV.6. Profils de température et d'humidité relative dans une zone proche de la surface (couverte d'herbes et sans limite d'eau) ; a) dans une journée sèche et ensoleillée et b) dans une journée ensoleillée et humide (Blight 1997)

La pression de la vapeur d'eau saturante est calculée comme suit (Brutsaert 1988) :

$$P_v^s = g(T) = 101,325 \times \exp(13,3185 \times t_R - 1,9760 \times t_R^2 - 0,6445 \times t_R^3 - 0,1299 \times t_R^4)$$

Où :  $t_R = 1 - (373,15/T)$ ,  $T$  est en K

D'abord, on définit  $x = g(T_a) / g(T_s)$  et  $y = \frac{AE}{PE}$ . La fonction  $y = \frac{h_r - h_a x}{1 - h_a x}$  est analysée.

Quatre jeux de température ( $T_a$  dans l'air à 50 cm de la surface du sol ;  $T_s$  à la surface) sont utilisés : (15,0 ; 15,7) ; (22,8 ; 23,4) ; (24,0 ; 25,4) ; (25,5 ; 26,1). On observe que l'écart de température varie entre 0,5 et 1,3 °C. Ceci conduit à une variation de  $x$  (le rapport  $g(T_a) / g(T_s)$ ) entre 0,92 et 1,04. On considère maintenant deux jeux de valeurs d'humidité relative et on calcule

le rapport de  $y$  entre deux cas : le cas de l'hypothèse ( $x = 1$ , c'est-à-dire  $T_a = T_s$ ) et le cas des données expérimentales :

$$h_a = 0,5 ; h_r = 0,9 ; y(x)/y(l) = 0,98 - 1,14 \text{ avec } x = 0,92 - 1,04.$$

$$h_a = 0,5 ; h_r = 0,65 ; y(x)/y(l) = 0,89 - 1,31 \text{ avec } x = 0,92 - 1,04.$$

Ces résultats montrent qu'on risque d'avoir une erreur sur l'estimation du taux d'évaporation jusqu'à 30% si la petite différence de température n'est pas prise en compte.

De plus, on note que, dans cette analyse, la température  $T_a$  est inférieure à  $T_s$ . Or, ce n'est pas toujours le cas. On a observé durant les quatre séchages de cette étude, la valeur  $T_s$  est plus petite que la valeur  $T_a$  et elles peuvent avoir une différence de 5 °C. Pour vérifier l'impact de cette condition, une analyse est réalisée en gardant la température  $T_s$  à 17°C et en augmentant la température  $T_a$  de 17 à 22°C, ce qui correspond à une différence de température de 0 à 5°C. Dans cette analyse, l'humidité  $h_a$  est gardée constante à 0,5 et l'humidité  $h_s$  est augmentée de 0,6 à 1,0. La relation obtenue entre  $y$  et  $h_s$  est présentée sur la Figure IV.7.

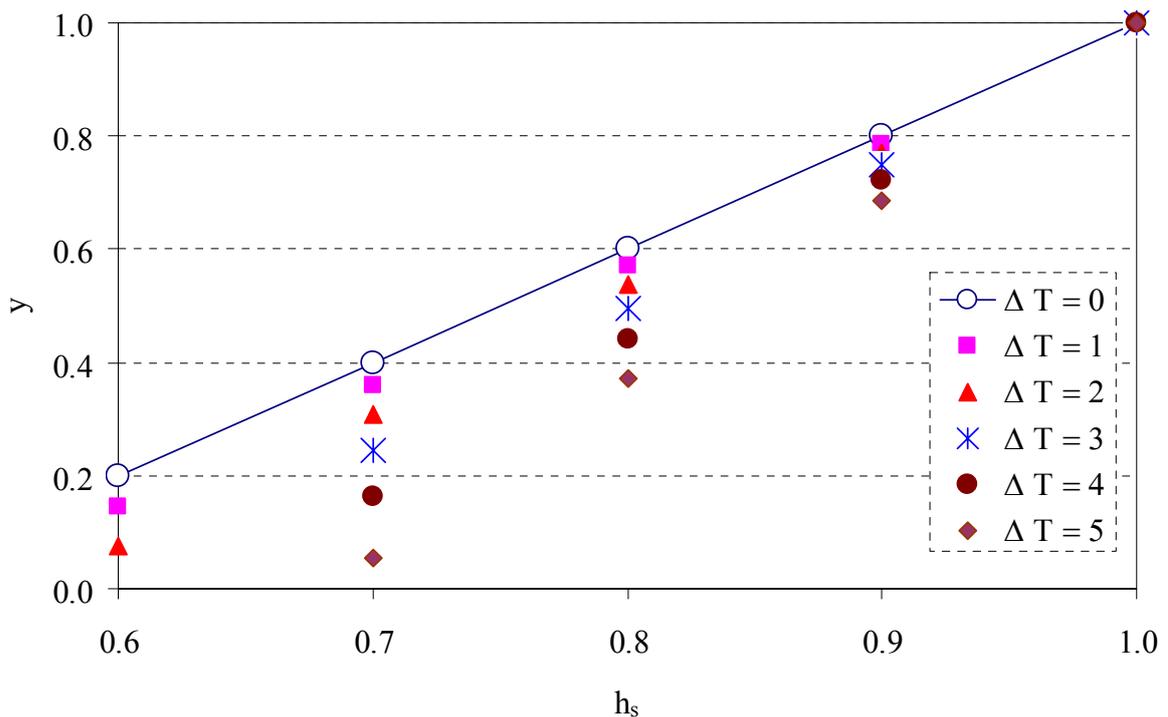


Figure IV.7.  $y$  en fonction de  $h_s$  en faisant varier la différence de température

Sur cette figure, on constate que l'augmentation de la différence de température diminue le rapport  $AE/PE$  ( $y$ ). En effet, la diminution est d'autant plus importante que la différence est grande. En outre, cette diminution est inversement proportionnelle à  $h_s$ . En effet, quand le gradient d'humidité relative est faible ( $h_s = 0,7$ ), la différence de  $y$  entre  $\Delta T = 0$  °C et  $\Delta T = 4$  °C peut dépasser 100%.

Il semble que l'effet de la température soit plus prononcé quand le gradient d'humidité  $h_s$  est faible, et réciproquement.

A travers cette analyse, on conclut

1. qu'il est nécessaire de tenir compte du profil de température dans la formule [IV.4] quand l'humidité relative est relevée à une hauteur importante,
2. et que les valeurs de  $h_a$  et de  $T_a$  doivent être relevées proches de la surface pour une petite différence de température.

#### IV.1.4 Influence du vent sur le taux d'évaporation

La deuxième grande hypothèse pour aboutir à la formule [IV.4] concerne l'effet identique de la vitesse du vent sur  $AE$  et  $PE$ . Autrement dit, on suppose que le vent présente le même effet sur une surface de sol non saturé que sur une surface couverte d'eau :

$$f_1(u) = f_2(u)$$

Il est important de rappeler que le vent est le facteur essentiel dans le processus d'évaporation et il joue donc un rôle prépondérant dans la détermination du taux d'évaporation. On note que cet effet du vent est fortement conditionné par l'état de la surface du sol caractérisé principalement par la rugosité de la surface. En effet, l'étude dans le chapitre I indique un rôle important de l'état de la surface sur le profil de la vitesse du vent, donc sur l'évaporation. Cette notion de rugosité de la surface est complexe puisque qu'elle dépend fortement du type de sol et de son état hydrique. De plus, avec l'évaporation, la surface du sol présente une métamorphose plus ou moins importante en fonction de la durée et de l'intensité de l'évaporation, ce qui engendre plus de variations de la rugosité de la surface du sol.

En conclusion, l'hypothèse d'un même effet du vent sur  $AE$  et  $PE$  tout au long de l'évaporation mérite une précaution particulière.

Certaines formules existent avec la prise en compte de l'effet du vent. Ces formules considèrent l'état de surface via la rugosité de surface. En comparant la formule de Dalton avec une formule dans le groupe de méthodes des résistances, on obtient :

$$f(u) = 1/R_a$$

La résistance  $R_a$  est ainsi inversement proportionnelle au taux d'évaporation. Différentes expressions existent pour  $R_a$  et une des plus simples est donnée par Choudhury et Monteith (1988) :

$$R_a = \frac{1}{K^2 u_a} \left[ \ln \frac{z_a}{z_o} \right]^2 = \frac{1}{K^2 u_a} \left[ \ln \frac{z_a - d}{z_o} \right]^2$$

On considère deux valeurs de  $z_o$  qui sont souvent prises par la plupart des chercheurs pour une surface de sol non saturée :  $10^{-2}$  et  $10^{-3}$  (m), et une troisième valeur de  $z_o$  pour une surface d'eau libre :  $10^{-4}$  (tableau 1, chapitre I). On suppose dans l'analyse qu'on a la même vitesse du vent à la même hauteur  $z_a = 2$  m.

Par un calcul simple, on obtient :  $\frac{R_a(z_0 = 10^{-2})}{R_a(z_0 = 10^{-4})} = 0,29$  et  $\frac{R_a(z_0 = 10^{-3})}{R_a(z_0 = 10^{-4})} = 0,59$

Comme la résistance  $R_a$  est en relation directe avec le taux d'évaporation, ces rapports correspondent aussi aux rapports des taux d'évaporation entre les deux cas suivants : prise en compte de l'effet de la vitesse du vent et non prise en compte de cet effet. On note d'abord que ce rapport est loin de 1, ce qui signifie donc un risque d'erreur importante dans l'estimation du taux d'évaporation quand le même effet du vent est considéré pour  $AE$  et  $PE$ . Néanmoins, cette analyse est basée sur une formule de calcul et non sur des données expérimentales. Il serait ainsi intéressant de la vérifier expérimentalement.

## ***IV.2 Proposition des procédures de calcul et de validation***

### *IV.2.1 Développement d'une formule de calcul du taux d'évaporation potentiel*

L'estimation du taux d'évaporation réel nécessite la connaissance du taux d'évaporation potentiel [IV.6]. Certes, comme l'indique le chapitre I, un grand nombre de formules de calcul du taux d'évaporation potentiel existe dans la littérature mais aucune n'est universelle et un calage spécifique est en général nécessaire.

Le jeu complet des paramètres déterminés avec les données expérimentales de la chambre environnementale va permettre dans un premier temps de caler les paramètres des formules existantes et ensuite de vérifier la pertinence de ces formules. Dans un deuxième temps, ces données expérimentales seront utilisées pour développer de nouvelles formules prenant en compte un plus grand nombre de paramètres.

### *IV.2.2 Validation de la formule [IV.6] avec des données expérimentales en tenant compte de la température et de la fissuration*

La validation consiste en la comparaison entre  $AE$  mesurée par le bilan de vapeur d'eau (III.2.1) et  $AE$  calculé par la formule [IV.6]. On note que le calcul de  $AE$  nécessite des données de température et de succion à la surface du sol. La température à la surface du sol est mesurée directement par le thermomètre à infrarouge, tandis que la succion à la surface du sol sera estimée à partir des profils de succion dans le sol ou en considérant la similitude entre le séchage 3 et le séchage 4.

La fissuration sera également considérée dans le calcul de  $AE$  en introduisant dans la formule le taux de fissures et la largeur pondérée.

### *IV.2.3 Proposition d'un algorithme généralisé de calcul numérique pour calculer le taux d'évaporation*

Une des finalités de ce travail est de développer un modèle de calcul permettant d'estimer le taux d'évaporation et en même temps décrire l'évolution de l'état thermique et hydraulique du sol. Dans un premier temps, seul l'aspect hydraulique est considéré. Cela est rendu possible par le développement et la validation précédents. La Figure IV.8 schématise l'algorithme proposé.

Les données d'entrée sont : l'état réel de l'air (l'humidité relative et la vitesse du vent (1)) et l'état initial du sol (profil hydrique du sol comme celui de succion (3)). Ensuite, le taux  $PE$  est calculé

par une formule type Penman (2) où l'humidité relative et la vitesse du vent sont utilisées. La formule [IV.6] est utilisée pour calculer le taux d'évaporation réel  $AE$  (4).

Par la suite, ce taux  $AE$  est utilisé comme un flux d'eau imposé à la surface du sol dans un modèle hydrique simple (5) afin de déterminer de nouveau la valeur de succion à la surface du sol (6).

Les résultats sortant sont le taux  $AE$  et l'évaporation cumulée  $CAE$  (8) ainsi que l'état hydrique du sol (7).

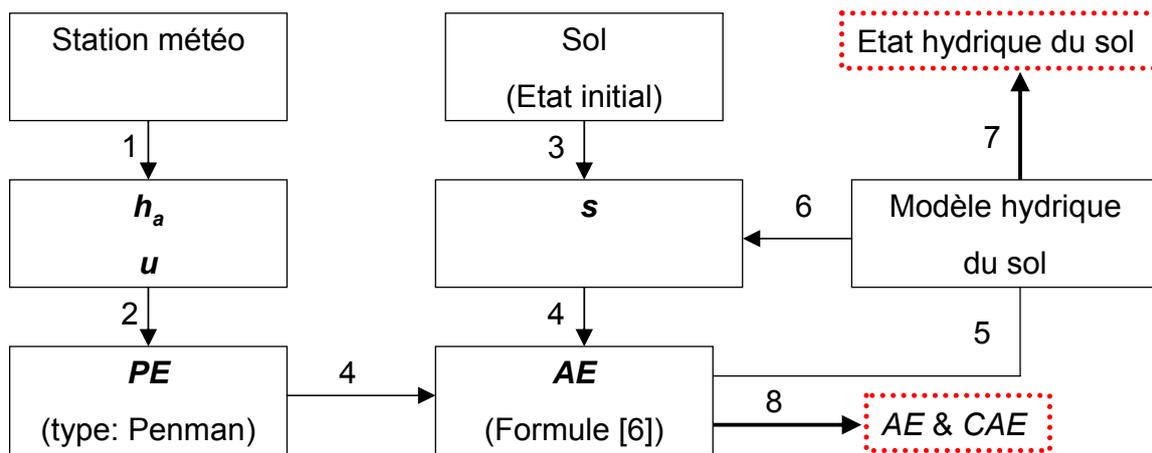


Figure IV.8. Algorithme de calcul

Il est important de noter que les paramètres de l'air sont des paramètres permanents tandis que le paramètre du sol n'est que nécessaire pour le premier cycle de calcul. En effet, le nouvel état hydrique du sol est déterminé par le modèle lui-même.

La section IV.1.3 a mis en évidence l'effet de la température dans le calcul du taux d'évaporation. De plus, au cours d'évaporation, ce profil de température peut connaître de changements notables. Ainsi, dans cette deuxième étape, l'effet de température est considéré, tandis que celui du vent est ignoré :

$$\frac{AE}{PE} = \frac{h_r - h_a \times g(T_a) / g(T_s)}{1 - h_a \times g(T_a) / g(T_s)} \quad [IV.7]$$

L'utilisation de la formule [IV.7] nécessite deux nouveaux paramètres : la température de l'air,  $T_a$  et la température à la surface du sol,  $T_s$ . En principe, la température  $T_a$  est fournie par les stations météorologiques. En revanche, la température  $T_s$  est un paramètre difficile à déterminer et par conséquent elle n'est pas toujours disponible. La détermination de cette grandeur nécessite donc un modèle de transfert couplé avec le transfert thermique où les paramètres de transfert de chaleur et d'eau sont introduits (voir par exemple Cui et al. 2005).

Deux modifications sont faites dans l'algorithme initial. D'abord, au niveau des données d'entrée, les températures  $T_a$  et  $T_s$  sont ajoutées. Puis, au niveau du calcul, la formule [IV.6] est remplacée par la formule [IV.7] et un modèle de comportement couplé thermo-hydraulique est indiqué (Figure IV.9).

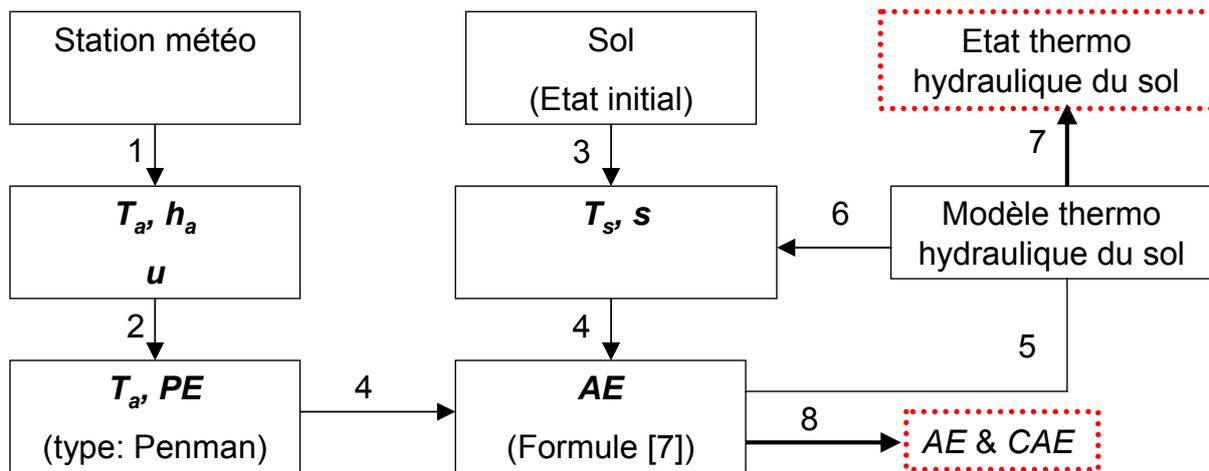


Figure IV.9. Algorithme de calcul modifié

### IV.3 Conclusions

Ce chapitre met en évidence par des développements à la fois théoriques et expérimentaux le rôle important de la succion dans la description du processus d'évaporation : la succion s'avère être le paramètre plus pertinent que la teneur en eau volumique qui est utilisée dans la plupart de travaux trouvés dans la littérature. En effet, notre étude montre que l'utilisation de la succion dans le rapport  $AE/PE$  permet de s'affranchir du type de sol étudié et rend possible l'élaboration d'une formule avec un champ de validité plus large. De plus, quand la succion est relevée à la surface du sol, le rapport  $AE/PE$  est en relation exponentielle avec la succion.

Une étude théorique sur le rôle des autres paramètres comme la température, la vitesse du vent dans la relation  $AE/PE(s)$  montre que :

1. la prise en compte de la température est nécessaire quand le gradient de température est important ou quand le point de mesure dans l'air se trouve loin de la surface du sol ;
2. l'effet du vent diffère entre le cas de  $AE$  et le cas de  $PE$  via la rugosité de surface,  $z_0$ . L'ignorance de ce paramètre pourrait conduire à une erreur importante. Malheureusement, l'étude sur la rugosité de surface paraît complexe et elle est loin d'être aboutie. La pratique courante consiste à choisir une valeur de  $z_0$  de façon empirique et parfois arbitraire (chapitre I). Ainsi, pour une raison de simplicité dans cette étude, l'effet du vent dans les deux cas,  $AE$  et  $PE$ , est considéré être similaire.

En ce qui concerne la finalité du travail, deux validations nécessaires sont développées et elles valideront simultanément les développements théoriques et expérimentaux. De plus, un algorithme de calcul est également proposé permettant de prévoir numériquement le taux d'évaporation d'un sol ayant un état hydrique donné en utilisant seulement des données météorologiques.