

Développement d'une formule de calcul du taux d'évaporation avec prise en compte de la fissuration

Dans ce chapitre VI, le taux d'évaporation potentiel PE est d'abord calculé pour le séchage 3 et le séchage 4. Les rapports AE/PE sont ensuite établis et étudiés. On s'efforce ensuite d'identifier l'effet de la fissuration sur l'évaporation et cet effet est considéré dans le calcul du rapport AE/PE . Une comparaison est effectuée entre les résultats de calcul avec et sans prise en compte de la fissuration.

La possibilité d'utilisation des profils de succion dans le sol pour déterminer la succion à la surface est ensuite analysée en utilisant les données expérimentales du séchage 3 et du séchage 4.

Finalement, on étudie la possibilité d'utiliser les résultats du séchage 4 en termes de variations de succion et de teneur en eau pour déterminer les profils de succion, la succion à la surface du sol puis le rapport AE/PE dans le séchage 3.

VI.1 Evolution du taux PE et des rapports AE/PE du séchage 3 et du séchage 4

La formule [V.15] développée dans le chapitre V est d'abord utilisée pour calculer le taux d'évaporation potentiel PE pour le séchage 3 et le séchage 4. Ensuite, les rapports AE/PE sont établis pour ces deux séchages. Les variations de AE , PE , AE/PE du séchage 3 et du séchage 4 sont présentées sur la Figure VI.1 et sur la Figure VI.2, respectivement.

On observe une augmentation générale du taux PE pour les deux séchages. En effet, pour le séchage 4, le taux PE augmente de 1,7 à 2,5 mm/jour, et celui du séchage 3 augmente de 1,7 à 1,9 mm/jour, l'augmentation du taux PE du séchage 4 étant plus importante que celle du séchage 3. En fait, cette augmentation est due à la diminution de l'humidité relative de l'air dans la zone proche de la surface du sol, h_a . Plus la durée du séchage est longue, plus l'humidité relative h_a est faible (Figure III.19 pour séchage 4 et Figure III.14 pour séchage 3), et plus le taux PE est grand.

Pour le séchage 4, où la première phase d'évaporation (évaporation maximale) est clairement observée sur l'évolution du taux AE , on constate également une phase de stabilisation sur le taux PE qui a la même durée de temps que la première phase du taux AE . En effet, quand le taux AE commence à diminuer, l'augmentation du taux PE débute. Il semble que pendant la phase d'évaporation maximale, un équilibre d'humidité entre le sol et l'air à l'interface est établi et comme il n'y a aucune diminution de l'humidité relative dans l'air (Figure III.19), le taux PE reste constant.

Les allures des courbes AE/PE du séchage 3 et du séchage 4 sont similaires à celles de leurs courbes respectives AE . Néanmoins, on observe une tendance de diminution plus prononcée des courbes AE/PE . En comparant les courbes AE/PE entre le séchage 3 et le séchage 4, on observe que la similitude avec le taux AE est plus nette pour le séchage 4. En fait, l'évolution du rapport AE/PE se divise clairement en trois phases : stabilisation et proche de 1, diminution et stabilisation à la valeur minimale. Ces trois phases correspondent bien aux trois phases identifiées sur la courbe AE . D'autre part, pour le séchage 3, on note une grande diminution du rapport AE/PE à la fin du séchage ($t = 30$ jours) qui correspond aussi à une chute importante relevée sur l'évolution du taux AE du séchage 3.

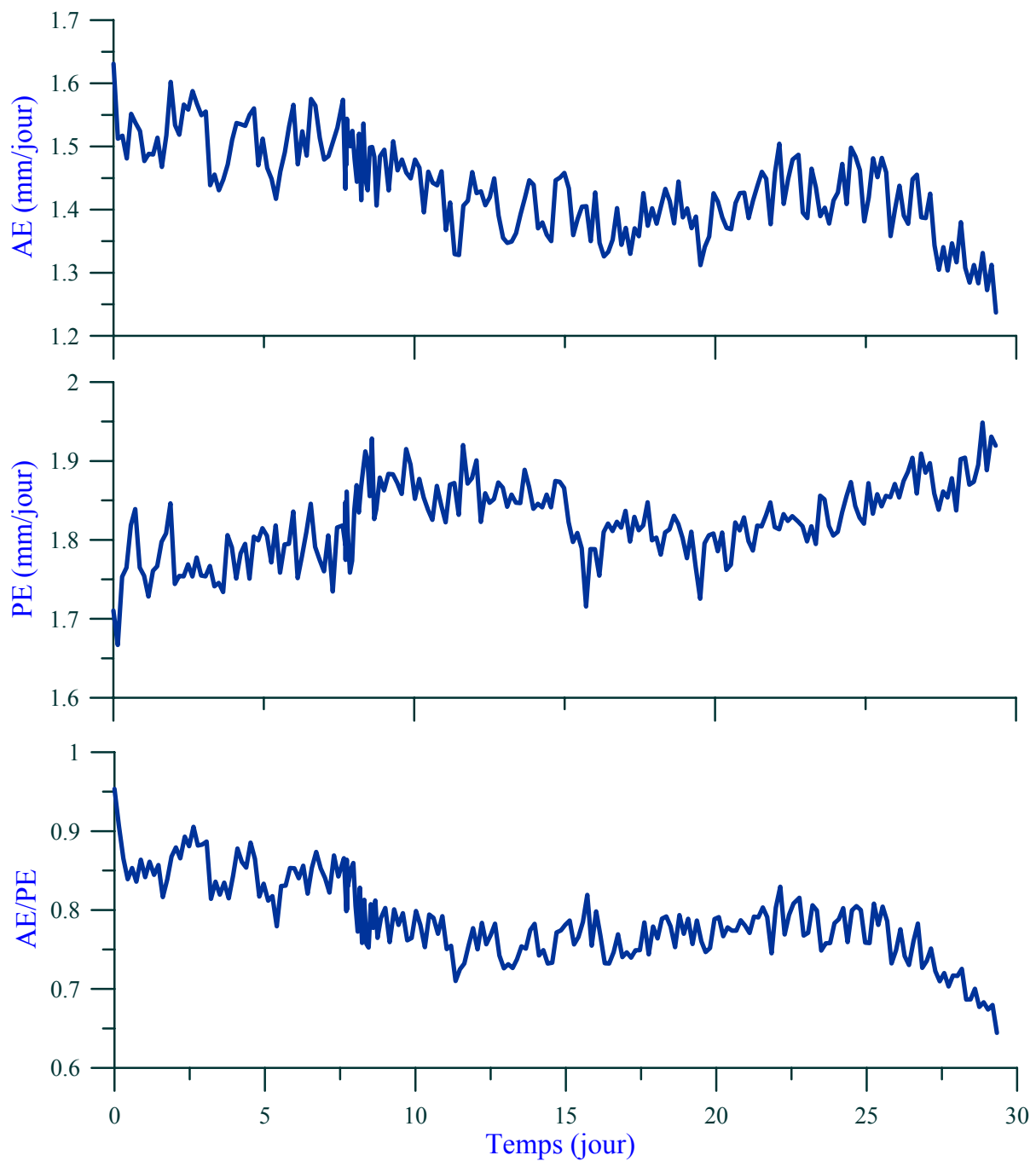


Figure VI.1. Evolutions de AE , PE , AE/PE du séchage 3

La diminution plus importante du rapport AE/PE par rapport à celle du taux AE correspondant est liée à l'augmentation du taux PE dans le temps, notamment pour le séchage 4. Pour ce séchage, le taux AE diminue de 50% : de 1,7 à 0,8 mm/jour, tandis que le rapport AE/PE diminue de 70% : de 1,0 à 0,3. Il en va de même pour le séchage 3, le taux AE diminue de 1,6 à 1,3 mm/jour (19%), tandis que le rapport AE/PE diminue de 0,95 à 0,65 (32%).

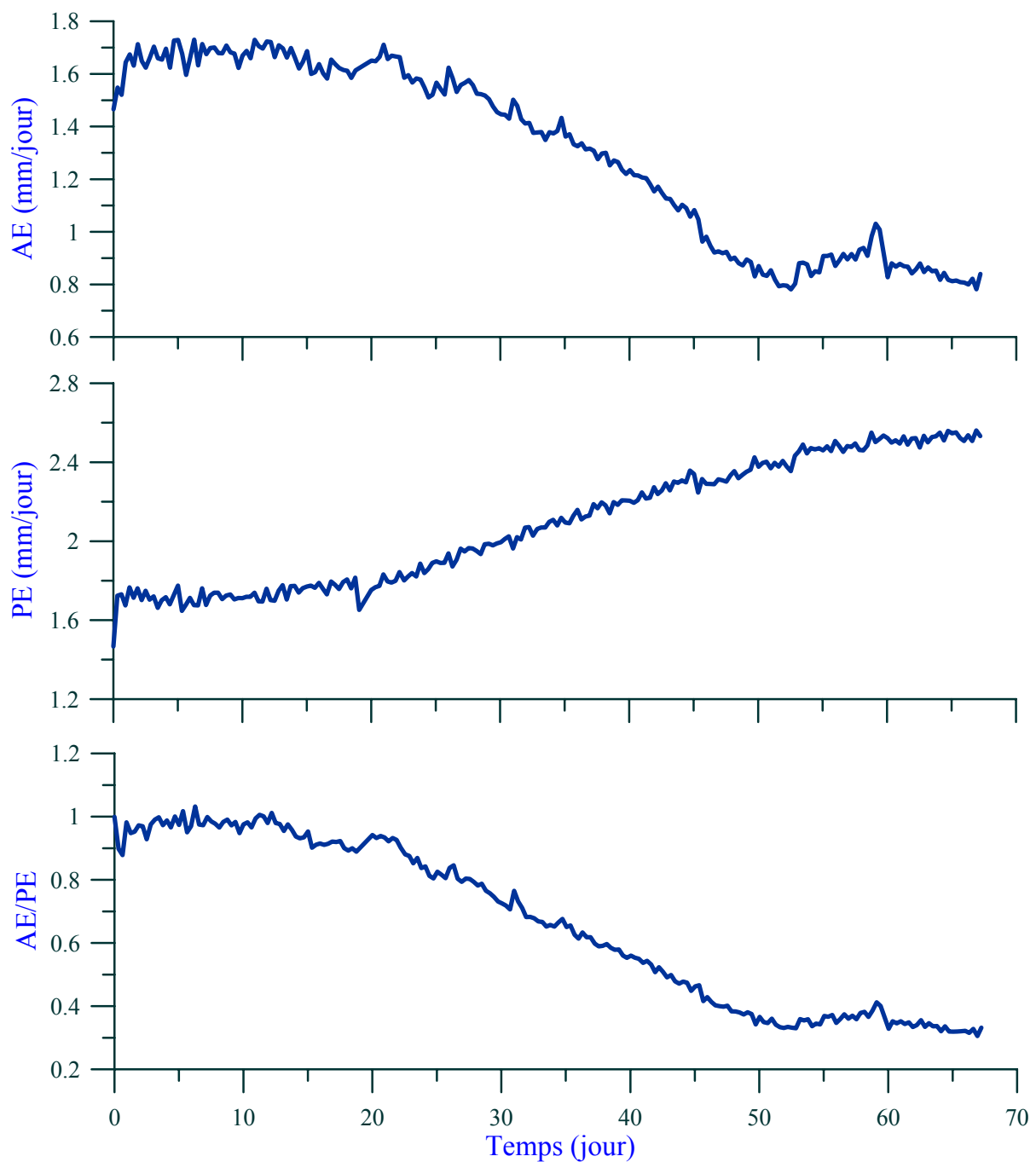


Figure VI.2. Evolutions de AE , PE , AE/PE du séchage 4

VI.2 Prise en compte de la fissuration dans le calcul de l'évaporation

La teneur en eau massique mesurée à la surface du sol à la fin du séchage 4 est de 5% (Figure III.24). Grâce à la courbe de rétention d'eau par la formule de van Genuchten (III.1.3.1), la succion correspondante est déterminée, elle est de 170 MPa qui correspond à une humidité relative de 37% ($T_s = 30^\circ\text{C}$).

Connaissant l'humidité relative de l'air h_a , le rapport AE/PE est calculé selon la formule [IV.4] :

$$\frac{AE}{PE} = \frac{h_s - h_a}{1 - h_a} = \frac{0,37 - 0,20}{1 - 0,20} = 0,21$$

Cette valeur est largement inférieure à la mesure du rapport AE/PE : 0,33 (37% de moins). Cette différence importante est probablement due à la non prise en compte de l'évaporation à partir du réseau de fissures. En effet, les résultats de la littérature (chapitre 1, partie fissuration) ont montré une contribution importante du réseau de fissures au taux d'évaporation global. Cette contribution peut atteindre 30% (Selim et Kirkham 1970), 50% (Kuhn et Zornberg 2006), voire 60% (Ritchie et Adams 1974).

Dans notre étude, à la fin du séchage 4, on a relevé un réseau de fissures ayant des profondeurs variables pouvant atteindre 200 mm et le rapport profondeur/largeur peut atteindre 12 (Figure III.23). Ce réseau de fissures crée en conséquence de nouvelles surfaces évaporatives. Il est clair que plus la surface évaporative totale engendrée par la fissuration est importante, plus la contribution de la fissuration au taux d'évaporation global est importante.

La Figure VI.3 schématise l'évaporation produite à la surface du sol incluant une fissure. Dans la fissure, l'eau s'évapore à partir de la surface interne S_{fis} ayant une humidité relative moyenne de h_{fis} . Selon le profil hydrique obtenu à la fin du séchage 4 (Figure III.24), la valeur de h_{fis} devrait être supérieure à celle de h_s à la surface du sol non fissurée vu que le sol dans la fissure est plus humide. De plus, l'eau évaporée traverse la face ouverte de la fissure S_m .

La prise en compte de la contribution de la fissuration dans le taux AE global à l'aide de la formule [IV.4] demande donc des données sur la largeur, sur la profondeur et sur le profil d'humidité dans le sol et dans l'air de la fissure. Ces données sont en réalité rarement disponibles. Afin de simplifier le calcul, on suppose que l'eau s'évapore à partir d'une surface fictive S_m ayant une humidité relative fictive h_m . Comme la surface S_m est beaucoup plus petite que S_f et afin de pouvoir reproduire le même taux d'évaporation, h_m devrait être beaucoup plus grande que h_{fis} et logiquement beaucoup plus grande que h_s . Ainsi, on peut supposer :

$$h_m - h_a = (1 + \alpha)(h_s - h_a)$$

Où α est supposé constant et il est positif.

On suppose ensuite que le réseau de fissures est relativement homogène, c'est-à-dire, la contribution au taux AE global est égale pour toutes les fissures. Ainsi, le rapport AE/PE moyenné sur l'ensemble de la surface du sol peut être écrit comme suit :

$$\left(\frac{AE}{PE}\right)_{moyen} = \left(\frac{AE}{PE}\right)_{zone_non_fissurée} \times (1 - R_{cs}) + \left(\frac{AE}{PE}\right)_{zone_fissurée} \times R_{cs}$$

En appliquant la formule [IV.4] pour chaque partie, on obtient :

$$\left(\frac{AE}{PE}\right)_{moyen} = \frac{h_s - h_a}{1 - h_a} \times (1 - R_{cs}) + \frac{h_m - h_a}{1 - h_a} \times R_{cs}$$

$$\left(\frac{AE}{PE}\right)_{moyen} = \frac{h_s - h_a}{1 - h_a} \times (1 - R_{cs}) + \frac{(h_s - h_a) \times (1 + \alpha)}{1 - h_a} \times R_{cs}$$

$$\left(\frac{AE}{PE}\right)_{moyen} = \frac{h_s - h_a}{1 - h_a} \times (1 + \alpha \times R_{cs}) \quad [VI.1]$$

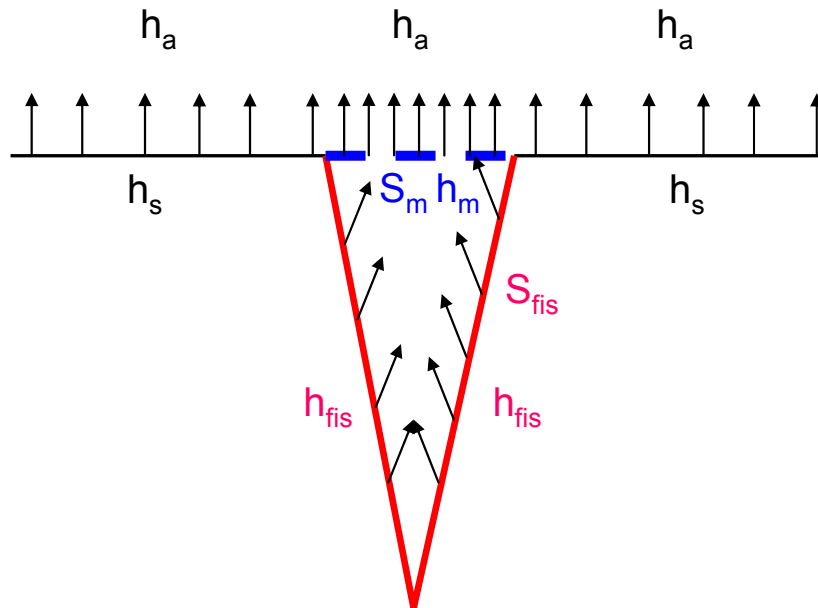


Figure VI.3. Schéma de calcul du taux d'évaporation avec prise en compte de la fissuration

En se basant sur les mesures à la fin du séchage 4 (taux de fissures de 30%), on peut déterminer la valeur de α : 1,68.

La vérification de cette formule demande la connaissance de la valeur de succion à la surface du sol. Or, elle est mesurée seulement une fois à la fin du séchage 4. Ainsi, dans les prochaines sections, deux méthodes sont proposées pour estimer la succion à la surface : la méthode de profils de succion dans le sol et la méthode de similitude entre les deux séchages 3 et 4.

VI.3 Utilisation des profils de succion dans le sol

Les suivis de succion pendant le séchage 3 et le séchage 4 sont assurés par les capteurs PT et TS. En réalité, un seul capteur PT à 50 mm de la surface et plusieurs capteurs de TS donnent des réponses significatives. En revanche, les moments de réponse des capteurs TS sont bien dispersés dans le temps.

Afin d'avoir une estimation raisonnable de la succion à la surface du sol, on considère seulement les périodes où les mesures de PT à 50 mm sont disponibles. A noter qu'il s'agit du capteur le plus proche de la surface du sol. Pour le séchage 3, cette période est entre $t = 20$ et $t = 30$ jours (Figure III.16) ; pour le séchage 4, cette période est entre $t = 25$ et $t = 30$ jours (Figure III.21).

En ce qui concerne les capteurs TS, pour le séchage 3, dans cette période, un seul TS à 200 mm répond (Figure III.16). Pour le séchage 4, deux capteurs donnent des réponses claires dans cette période : TS à 195 mm et TS à 345 mm (Figure III.21).

Dans un premier temps, des profils linéaires entre la succion et la profondeur sont appliqués pour calculer la succion à la surface. Pour le séchage 4, comme deux mesures de TS sont disponibles, deux profils linéaires sont établis. Ces profils comprennent une valeur de TS et une valeur de PS à 50 mm de profondeur.

Dans un deuxième temps, un profil parabolique est utilisé [VI.2].

$$s = az^2 + bz + c \quad \text{[VI.2]}$$

Où z est la profondeur et a , b , c sont des constantes à déterminer. En réalité, selon les données expérimentales de Ayad et al. (1997), la succion dans le sol est en bonne relation parabolique avec la profondeur (Figure VI.4). Ce profil sera développé pour le séchage 4 avec deux mesures de TS à 345 mm, de PS à 50 mm et on suppose que la valeur de succion à 600 mm soit nulle. Comme le profil de succion dans le sol évolue dans le temps, chaque jeu des paramètres de PS et de TS détermine un nouveau jeu des paramètres a , b , c , donc un nouvel profil et une nouvelle valeur de succion à la surface égale à c .

Un profil exponentiel peut être également proposé [VI.3]:

$$s = a^{b-z} \quad \text{[VI.3]}$$

Où z est la profondeur, a et b sont des paramètres à déterminer. La détermination de ces deux paramètres ne nécessite que deux valeurs de succion dans le sol. Les mesures de TS à 345 mm et de PS à 50 mm sont utilisées à cette fin.

Une fois la succion à la surface est calculée, le taux AE/PE est d'abord calculé selon la formule [IV.4], c'est-à-dire, sans la prise en compte de la fissuration. Un calcul avec la prise en compte de la fissuration selon la formule [VI.1] est ensuite effectué.

Dans le but de faciliter la présentation des résultats, un récapitulatif des rapports AE/PE calculés est présenté dans le Tableau VI-1 avec des appellations correspondantes.

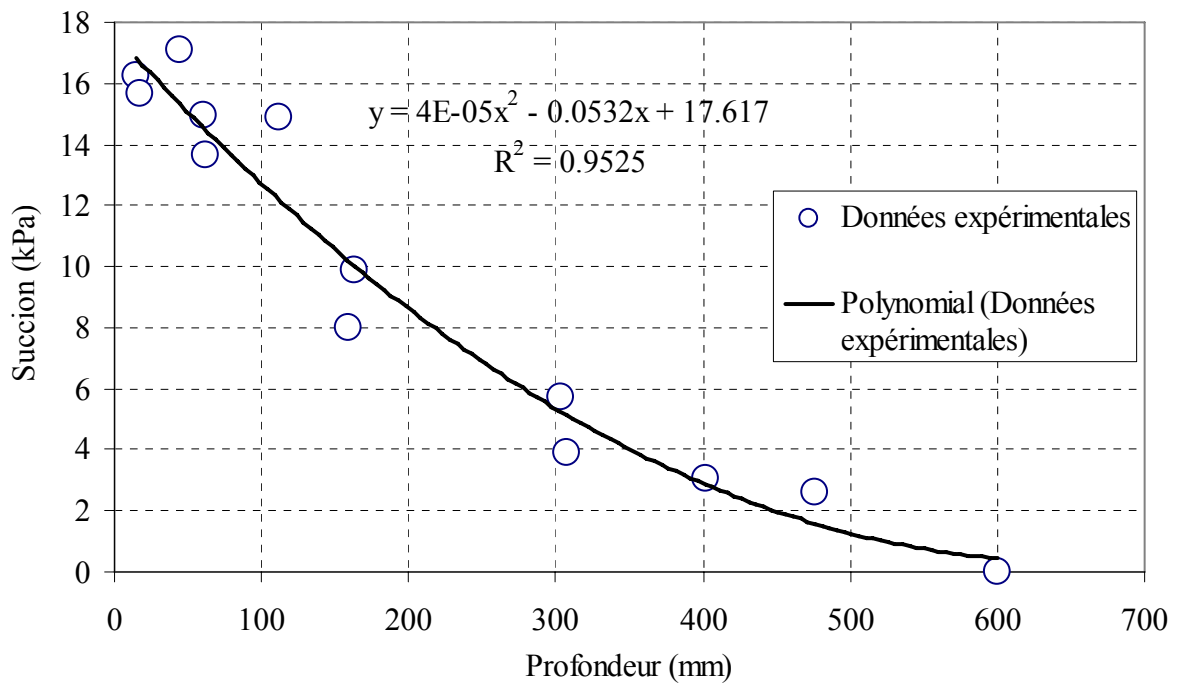


Figure VI.4. Profil de succion type établi à partir des données expérimentales de Ayad et al. (1997)

Tableau VI-1. Récapitulatif des rapports AE/PE calculés

	AE/PE	Type de profil de s	Données utilisées	Formule
Séchage 3	Calculé 1a	linéaire	PS à 50 mm, TS à 200 mm	[IV.4]
	Calculé 1b	linéaire	PS à 50 mm, TS à 200 mm	[VI.1]
Séchage 4	Calculé 1a	linéaire	PS à 50 mm, TS à 195 mm	[IV.4]
	Calculé 1b	linéaire	PS à 50 mm, TS à 195 mm	[VI.1]
	Calculé 2a	linéaire	PS à 50 mm, TS à 345 mm	[IV.4]
	Calculé 2b	linéaire	PS à 50 mm, TS à 345 mm	[VI.1]
	Calculé 3a	parabolique	PS à 50 mm, TS à 345 mm	[IV.4]
	Calculé 3b	parabolique	PS à 50 mm, TS à 345 mm	[VI.1]
	Calculé 4a	exponentiel	PS à 50 mm, TS à 345 mm	[IV.4]
	Calculé 4b	exponentiel	PS à 50 mm, TS à 345 mm	[VI.1]

La confrontation entre les rapports AE/PE calculés et ceux mesurés est présentée sur la Figure VI.5 et la Figure VI.6, respectivement pour le séchage 3 et le séchage 4.

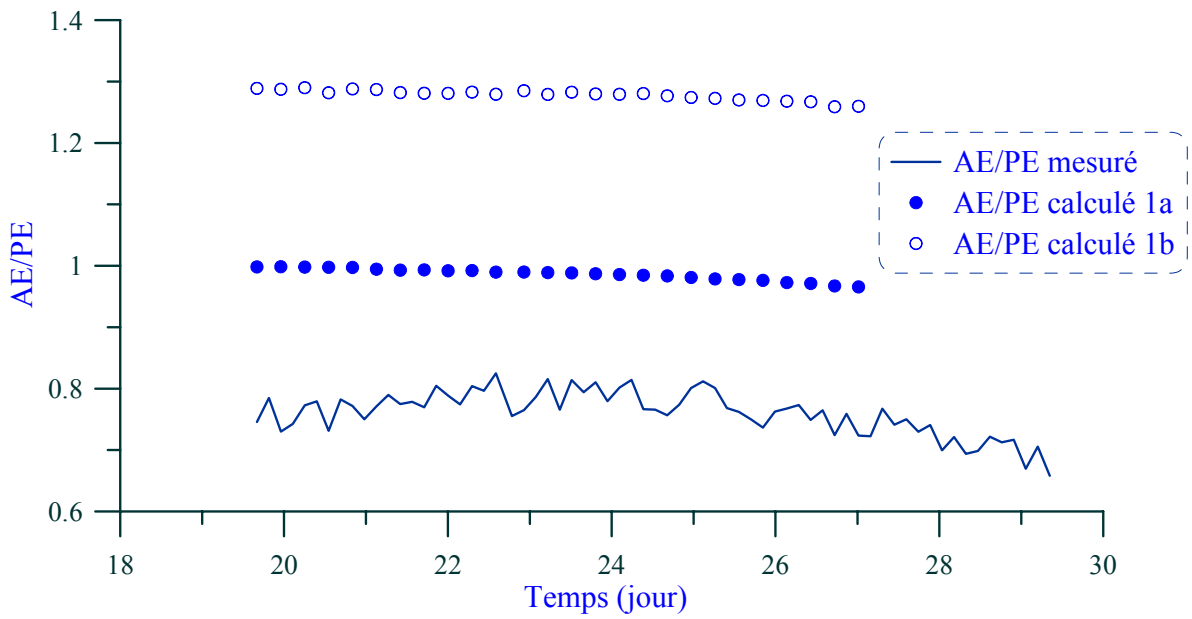


Figure VI.5. Comparaison des rapports AE/PE du séchage 3

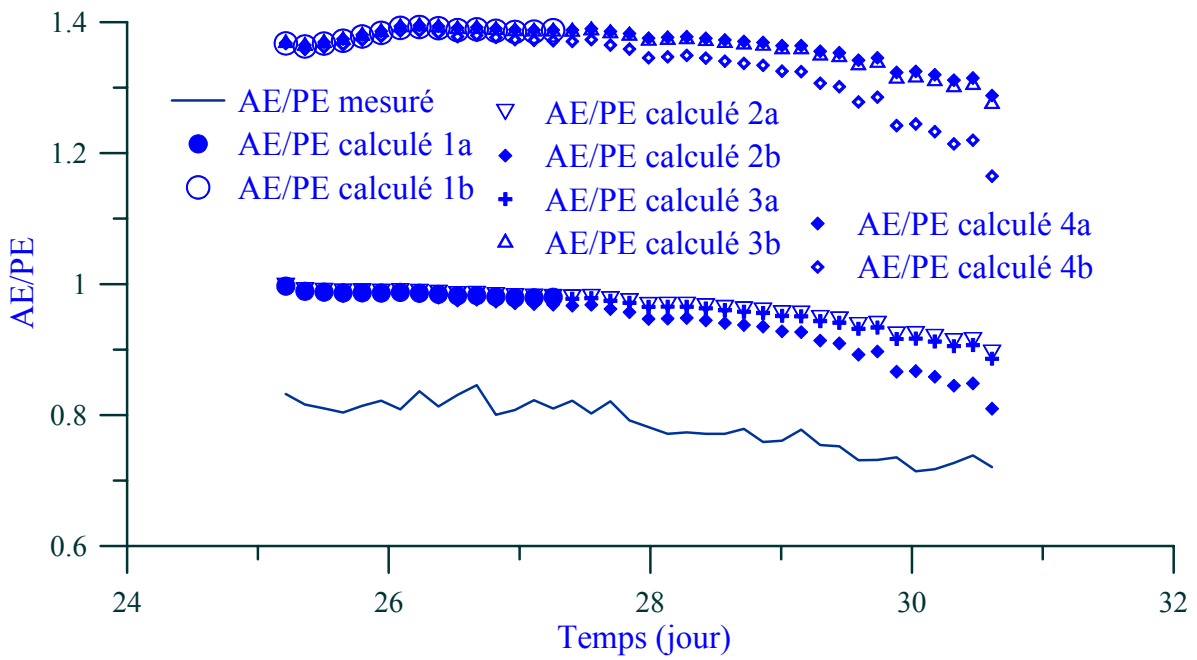


Figure VI.6. Comparaison des rapports AE/PE du séchage 4

On constate sur toutes ces deux figures un grand écart entre le résultat mesuré et le résultat calculé quand la fissuration n'est pas prise en compte (catégorie a). La prise en compte de la fissuration (catégorie b) ne fait qu'augmenter cet écart.

En outre, une petite différence est observée entre les résultats calculés avec différentes données de succion dans le sol (TS à 195 mm ou à 345 mm) et avec différents profils de succion (linéaire ou parabolique). Néanmoins, une différence significative du résultat obtenu avec un profil exponentiel

de succion peut être observée. Il semble que le profil exponentiel de succion soit plus pertinent que le profil linéaire ou parabolique. Cependant, le résultat calculé grâce à ce profil exponentiel de succion est encore loin des résultats mesurés.

Il est clair que les profils de succion du type linéaire ou parabolique ne permettent pas une bonne estimation de la succion à la surface du sol. Le grand écart entre le résultat mesuré et celui calculé peut être expliqué par une sous-estimation importante de la succion à la surface du sol. En effet, la valeur de succion à la surface doit être beaucoup plus importante que celle à 50 mm de profondeur.

VI.4 Utilisation de la similitude du profil de succion entre les deux séchages 3 et 4

VI.4.1 Profils de succion

La succion à la surface du sol du séchage 4 peut être calculée en utilisant la formule [VI.1] à partir de l'humidité relative et de la température à la surface du sol. Elle est présentée sur la Figure VI.7, ensemble avec les mesures de succion dans le sol.

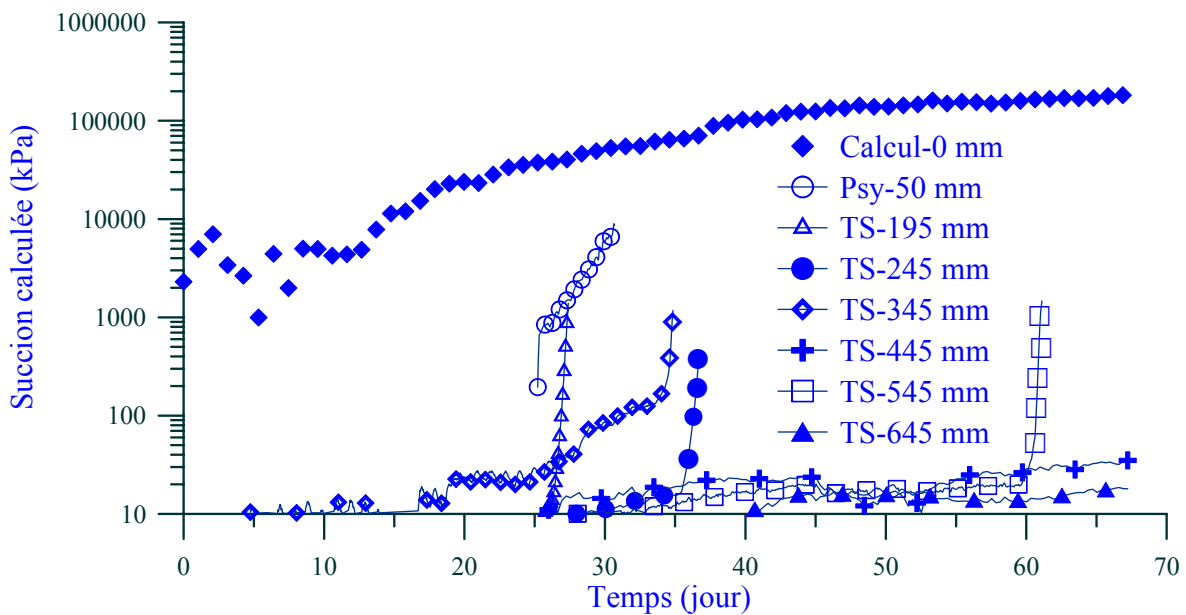


Figure VI.7. Succions du sol du séchage 4

Sur cette figure, on observe une grande différence entre la valeur de succion à la surface du sol et celle dans le sol même à une faible profondeur de 50 mm. En effet, dans la période de $t = 25$ à 30 jours, la succion à 50 mm varie entre 100 et 8 000 kPa, tandis que la succion à la surface augmente de 10 000 et 50 000 kPa. Cette grande différence explique la difficulté rencontrée dans l'estimation de la succion à la surface du sol à partir des mesures de succion dans le sol.

On utilise maintenant les valeurs de succion à 50 mm et à la surface du sol (une valeur par jour, de $t = 25$ à $t = 30$ jours) pour établir le profil de succion de 0 à 50 mm pour le séchage 4 (Figure VI.8). Puisque la différence de succion entre ces deux positions est importante, le profil est présenté deux fois avec deux échelles de succion différentes (linéaire et logarithmique) afin de mieux appréhender l'augmentation de chaque valeur. On observe qu'à 50 mm de la surface, la succion

varie entre 100 et 10 000 kPa et à la surface du sol, la succion varie entre 35 000 et 55 000 kPa durant cette période.

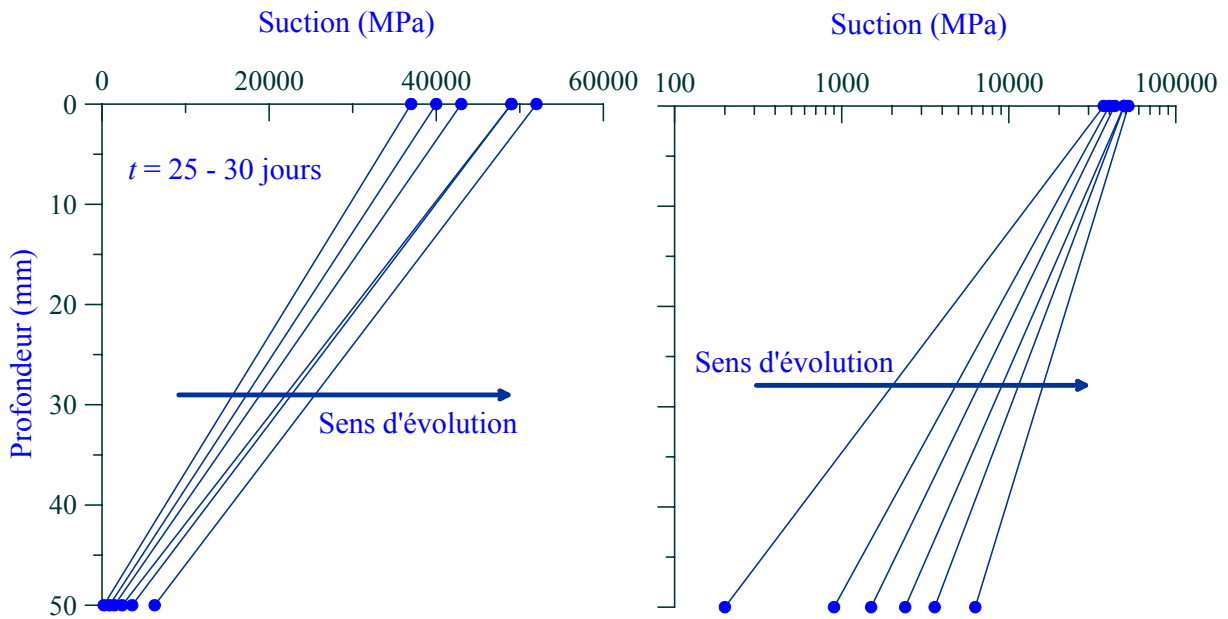


Figure VI.8. Profils de succion du séchage 4

VI.4.2 Application du profil de succion du séchage 4 au séchage 3

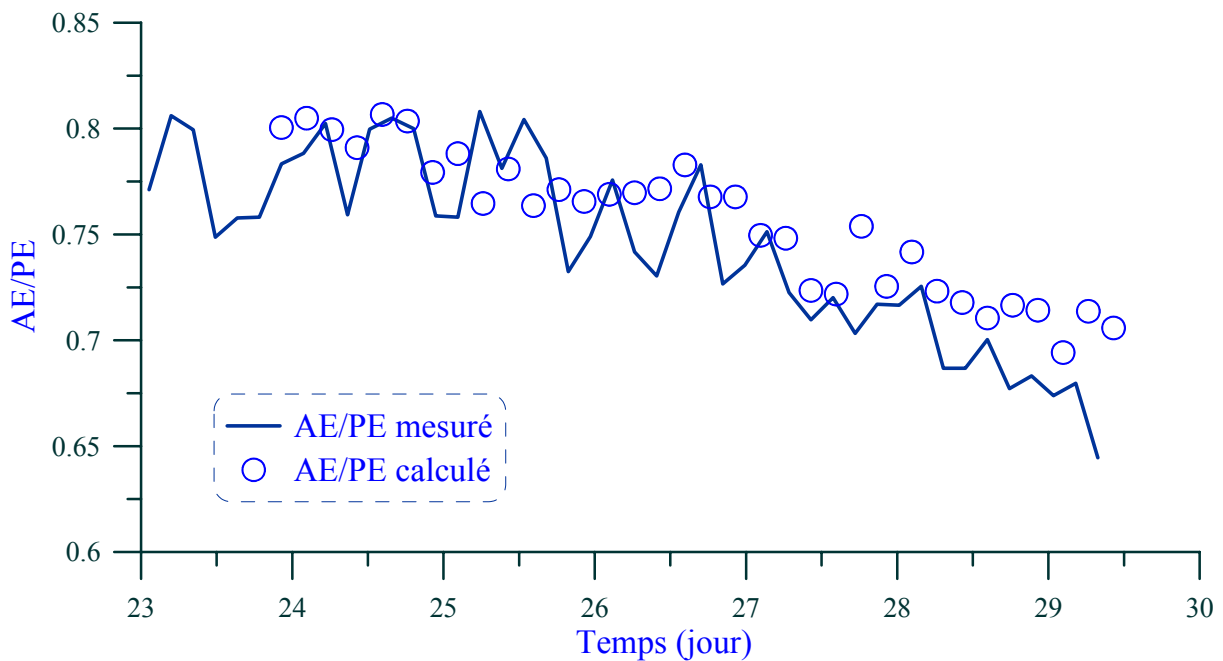


Figure VI.9. Vérification de la formule [VI.1] par les profils de succion

Afin de vérifier la pertinence de cette approche, le profil de succion déterminé pour le séchage 4 est utilisé pour calculer la succion à la surface du sol du séchage 3 dans la période de $t = 23$ à $t =$