

## Développement d'une formule de calcul du taux d'évaporation potentiel

Ce chapitre V a pour objectif le développement d'une formule de calcul du taux d'évaporation potentiel  $PE$ . Selon le développement théorique dans le chapitre IV, la connaissance du taux d'évaporation potentiel  $PE$  est essentielle pour la détermination du taux d'évaporation réel  $AE$ .

Dans ce chapitre, plusieurs formules de la littérature sont d'abord utilisées. Les résultats de calcul sont ensuite comparés avec le résultat expérimental afin de vérifier la pertinence de ces formules. A la lumière des résultats de comparaison, des modifications et des développements sont ensuite proposés.

On rappelle que deux séries de données expérimentales sont disponibles pour valider ce développement : données du séchage 2 avec quatre températures différentes et données du séchage 1 avec trois vitesses de vent différentes. Ainsi, le résultat de calcul est présenté en deux fois : 1) la comparaison des résultats de calcul avec les résultats de mesure dans la série où les données sont utilisées pour le calage des paramètres et puis 2) le même type de confrontation des résultats mais dans l'autre série. Pour le séchage 2, seuls les résultats expérimentaux obtenus pendant les huit derniers jours où la stabilisation est atteinte sont utilisés.

### V.1 Utilisation de quelques formules de la littérature

Le Tableau V-1 récapitule les formules utilisées : deux formules de Penman (1948), une formule de Rohwer (1931) et une formule de Romanenko (1961). Ces formules sont sélectionnées à partir des formules présentées dans le chapitre I. Le choix de ces formules est basé sur le fait qu'ils puissent calculer le taux d'évaporation pour une courte durée (taux d'évaporation journalier). De plus, les formules de Penman sont très utilisées dans la littérature (Wilson 1990). D'autre part, la similitude entre la formule de Rohwer et celle de Penman 1 permet d'apprécier l'effet du vent dans les calculs. Enfin, la formule de Romanenko est choisie parce que parmi les formules étudiées par Singh et Xu (1997), elle a moins de paramètre (un seul). De plus, avec les quatre sites expérimentaux considérés, ce paramètre paraît peu dépendant du site.

On précise que dans la chambre environnementale, le rayonnement n'existe pas. Ainsi, le terme  $R_n$  est nul.

Où  $\Delta$  est la pente de la courbe de la pression de vapeur d'eau saturante en fonction de la température. Elle est calculée comme suit (Brutsaert 1988) :

$$\Delta = \frac{dP_v^s}{dT} = \frac{373,15P_v^s}{T^2} (13,3185 - 3,952t_R - 1,9335t_R^2 - 0,5196t_R^3) \quad [V.1]$$

Où  $t_R = 1 - 373,15/T_a$  et la pression  $P_v^s$  est calculée en kPa.

Tableau V-1. Formules utilisées pour les calculs

Auteur	PE (mm/jour)	Paramètre
Penman (1948) - 1	$PE = 0,35(P_{vs}^s - P_{va})(1 + 9,8 \times 10^{-3} u_2)$	$u_2$ (miles/jour) : la vitesse à 2 m du sol $P_{vs}^s$ (mmHg) $P_a$ (mmHg)
Penman (1948) - 2	$PE = \frac{\Delta R_n / \lambda + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \cong \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a$ $E_a = 0,35(P_{va}^s - P_{va})(1 + 9,8 \times 10^{-3} u_2)$	$\Delta$ (kPa/°C) $u_2$ (miles/jour) $P_{vs}^s$ (mmHg) $P_a$ (mmHg) $\gamma = 0,066$ (kPa/°C)
Rohwer (1931)	$PE = 0,4(P_{vs}^s - P_{va})(1 + 4,08 u_2)$	$u_2$ (miles/jour) $P_{vs}$ (mmHg) $P_a$ (mmHg)
Romanenko (1961)	$PE = 0,6 \times 10^{-5} (25 + T_a)^2 (1 - h_a)$	$T_a$ (°C) $h_a$ (%)

On note l'importance de la cohérence des mesures dans l'air : l'humidité relative, la température et la vitesse du vent doivent être relevées à la même élévation. Dans cette étude, ces mesures sont effectuées à 50 mm de la surface du sol. On rappelle que les formules de calcul des pressions de vapeur d'eau saturante et réelle sont présentées dans le chapitre III.

Les résultats de calcul de PE et ceux mesurés sont présentés sur la Figure V.1 pour le séchage 1 et sur la Figure V.2 pour le séchage 2.

Au premier abord, on observe que les résultats de Romanenko sont écartés des autres résultats calculés et des résultats mesurés. En effet, le résultat de Romanenko représente en général un tiers des autres résultats.

La Figure V.2 montre une bonne correspondance entre les résultats calculés et ceux mesurés pendant les deux premières plages de température pour les trois formules. En revanche, pendant les deux dernières plages de température, les calculs s'éloignent d'avantage des mesures : les calculs peuvent doubler les mesures (3,4 mm/jour par rapport à 1,7 mm/jour).

D'autre part, la Figure V.1 montre en général un grand écart entre les résultats de calcul et ceux de mesure. Les calculs par les formules de Penman 1 et Rohwer sont similaires et ils doublent en général les résultats de mesure (2,6 mm/jour par rapport à 1,4 mm/jour).

On note que parmi les formules utilisées, la formule Penman 2 semble être la plus pertinente. En effet, la Figure V.1 montre que les résultats de calcul par Penman 2 suivent bien la tendance des résultats de mesure, avec un écart d'environ 30% qui est relativement faible par rapport aux résultats produits par les autres formules (d'ordre de 100%). En revanche, l'écart produit par Penman 2 dans le séchage 1 vers la fin de l'essai est aussi important (2,8 par rapport à 1,7 mm/jour).

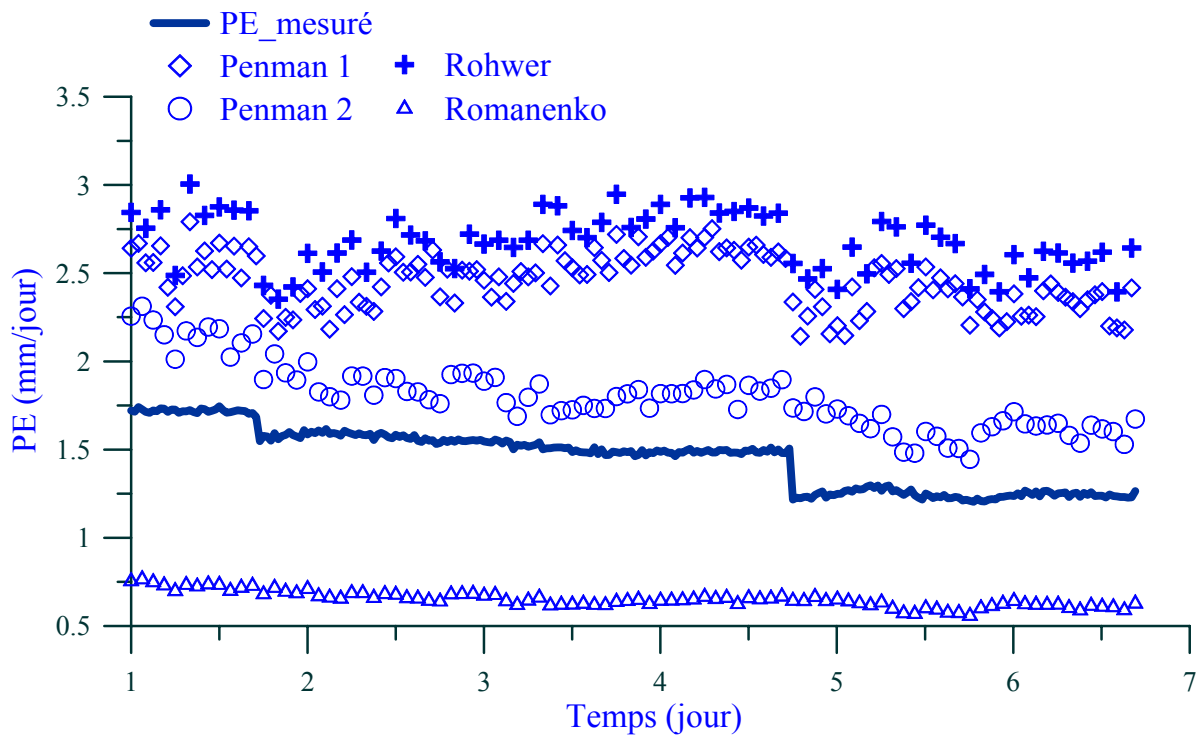


Figure V.1. Comparaison des résultats de calcul et ceux de mesure pour le séchage 1

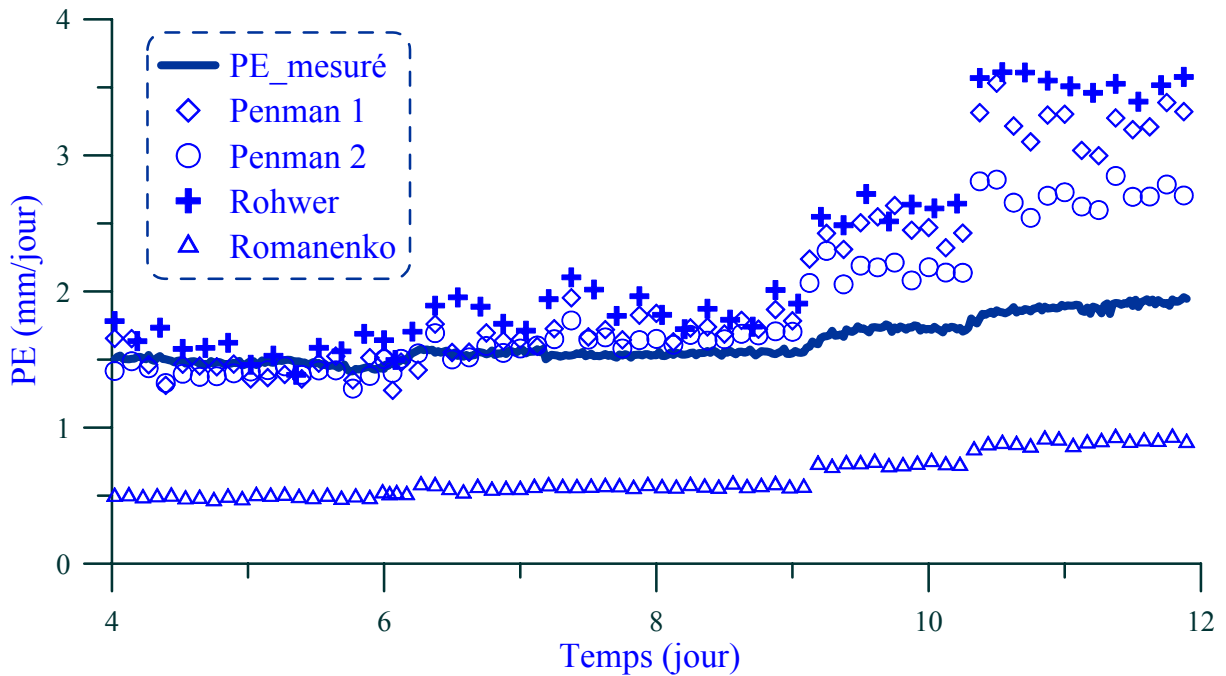


Figure V.2. Comparaison des résultats de calcul et ceux de mesure pour le séchage 2

En conclusion, l'utilisation directe des formules de la littérature ne peut pas donner des résultats satisfaisants. Une étude des paramètres de ces formules s'impose. Cette observation est en bon

accord avec celle de Singh et Xu (1997). En effet, ces auteurs travaillent avec sept formules différentes pour étudier quatre sites expérimentaux, et leurs résultats montrent que chaque site demande un jeu de paramètres spécifiques pour une formule donnée. Cette étude des paramètres est présentée dans les prochaines sections.

## V.2 Calibration des paramètres des deux formules de Penman

Vu que la formule de Rohwer est similaire à Penman 1, une seule calibration de Penman 1 est suffisante. D'autre part, on note que dans le développement de Penman, les paramètres dans les formules de Penman 1 et de Penman 2 doivent être identiques. Le choix de formules est conditionné en général par la disponibilité de données expérimentales. Dans ce travail, un calage des paramètres est réalisé sur Penman 1 et Penman 2.

La méthode de calage est la suivante : on utilise les données du séchage 1 avec trois vitesses du vent différentes pour déterminer les paramètres liés au vent. On utilise ensuite les données du séchage 2 pour la validation des nouveaux paramètres. En réalité, afin de vérifier la qualité de ce calage, le taux  $PE$  est également calculé pour le séchage 1 et il est comparé à celui mesuré. Cette méthode est utilisée pour tout le travail de détermination des paramètres.

Premièrement, on suppose que les deux formules de Penman 1 et de Penman 2 prennent les mêmes paramètres de vent. La formule généralisée de Penman 1 est :

$$PE = a(1 + bu) \left( P_{vs}^s - P_{va} \right) \quad [V.2]$$

$$a(1 + bu) = \frac{PE}{P_{vs}^s - P_{va}} \quad [V.3]$$

Afin de déterminer les deux paramètres  $a$  et  $b$ , le terme à droite de l'équation [V.3] moyennée sur les trois plages de vitesse du vent est présenté en fonction de la vitesse du vent (Figure V.3). On observe une relation parfaitement linéaire et cette relation permet de déterminer deux paramètres :  $a = 0,33$  et  $b = 11,55$ .

Etape 1 : Vérification avec le  $PE$  du séchage 1

Les valeurs de  $PE$  sont premièrement calculées avec ces nouveaux paramètres par les formules de Penman 1 et de Penman 2 pour le séchage 1. Ces résultats sont présentés sur la Figure V.4, ensemble avec le taux  $PE$  mesuré. On observe une bonne concordance entre le taux  $PE$  calculé par Penman 1 et le taux  $PE$  mesuré. En revanche, il existe un écart de 20% entre le taux  $PE$  calculé par Penman 2 et le taux  $PE$  mesuré. Ainsi, pour la validation avec la série 1, seule la formule de Penman 1 est utilisée.

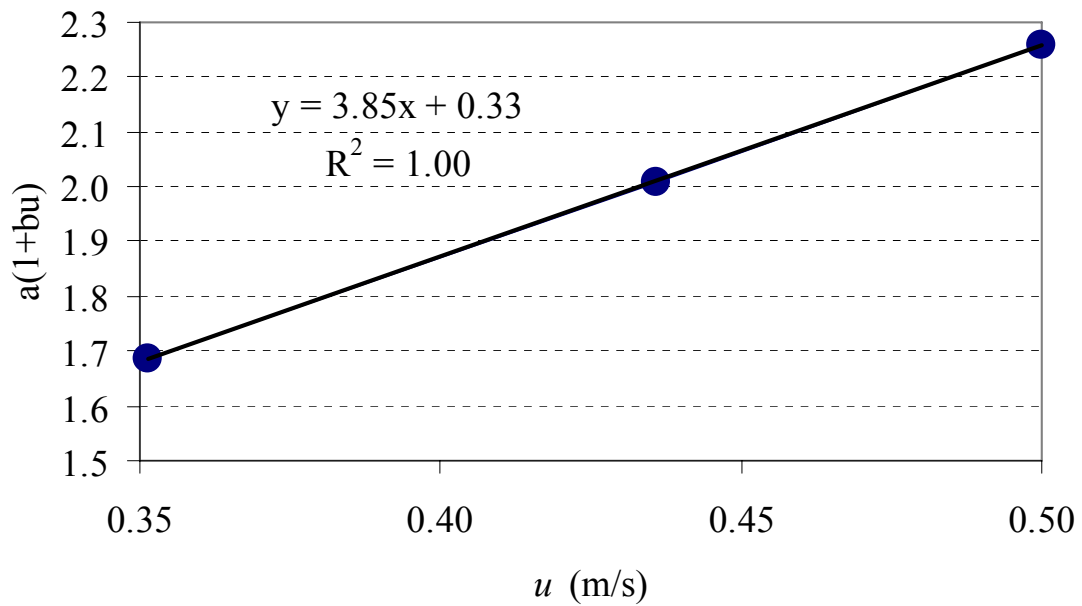


Figure V.3. Calibration des paramètres de la formule Penman 1

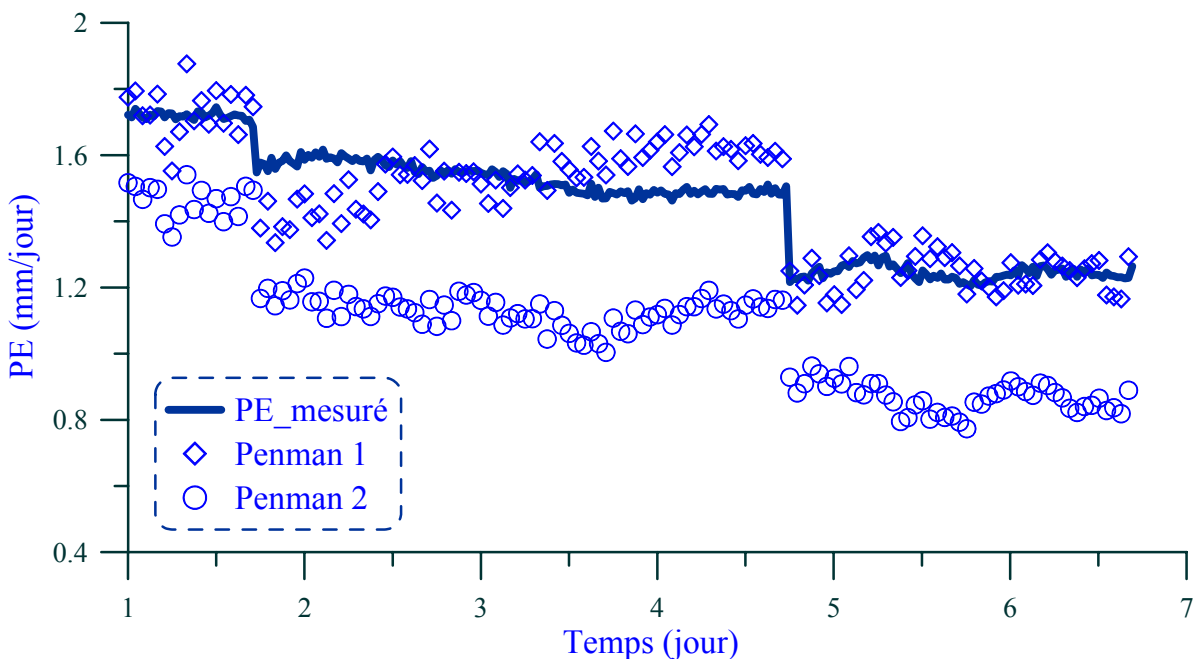


Figure V.4. Vérification des paramètres calibrés avec la même série de données

#### Etape 2 : Validation de la formule de Penman 1 avec le séchage 2

La comparaison entre le taux  $PE$  calculé par Penman 1 et le taux  $PE$  mesuré pour le séchage 2 est présentée sur la Figure V.5. On observe que le taux  $PE$  calculé peut reproduire les quatre plages de  $PE$  correspondant à quatre températures imposées. En revanche, l'écart entre les deux courbes est relativement important au début et à la fin de l'essai, de l'ordre de 33%.

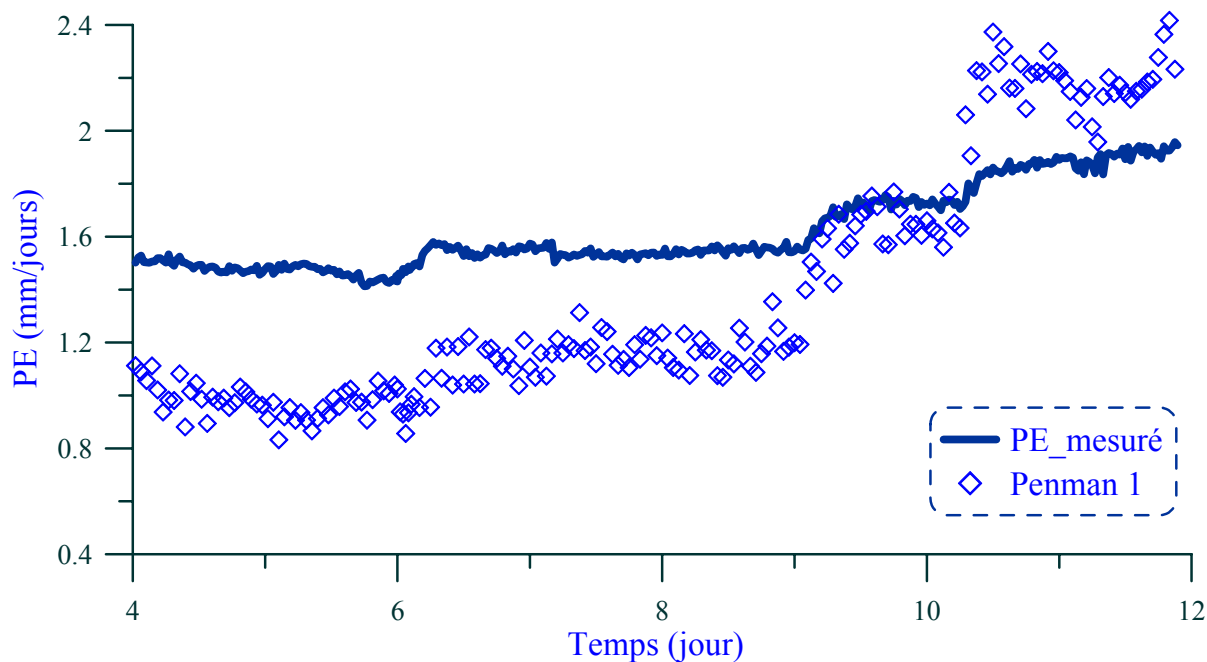


Figure V.5. Validation des paramètres calibrés de la formule de Penman 1

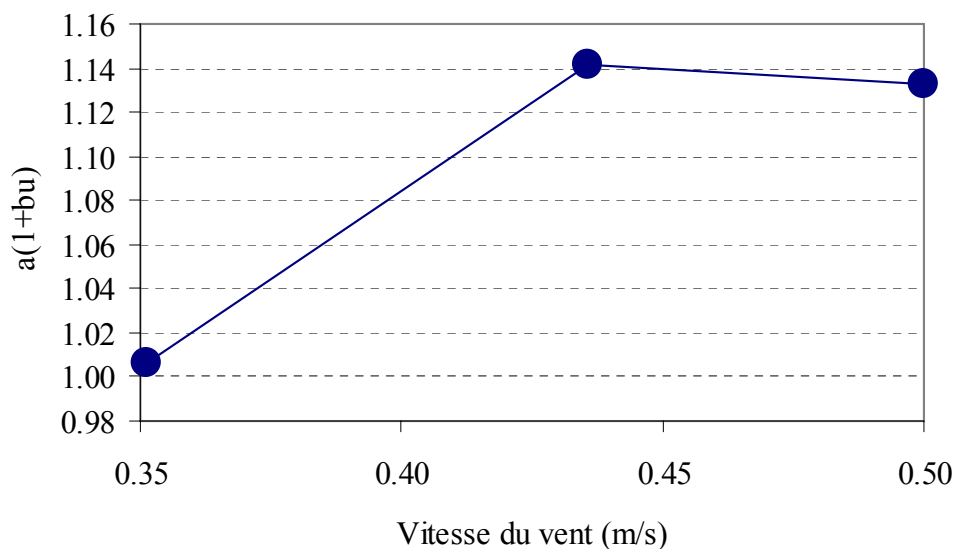


Figure V.6. Calage des paramètres de Penman 2

En conclusion, l'étude sur les paramètres réalisée dans ce travail montre qu'on peut reproduire les résultats expérimentaux avec la formule Penman 1. Cependant, l'écart reste important. D'autre part, il paraît que les deux paramètres  $a$  et  $b$  déterminés ne soient pas adéquats pour le Penman 2. Afin de vérifier ce point, le même travail de détermination de paramètres est réalisé mais avec le rapport  $PE / (P_{va}^s - P_{va})_{moyenné}$  (Figure V.6) et avec le rapport  $PE / (P_{va}^s - P_{va})_{moyenné} \times (\Delta + \gamma) / \gamma$

(Figure V.7). On observe qu'une relation linéaire est impossible à obtenir à partir de ces corrélations, ce qui montre que le remplacement de la pression de vapeur d'eau saturante à la surface du sol par celle de l'air n'est pas approprié.

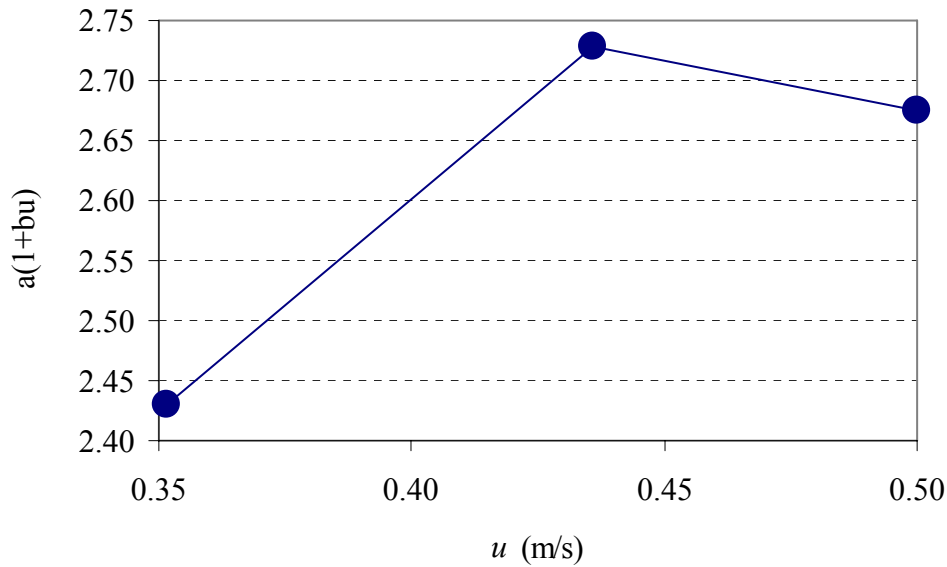


Figure V.7. Calage des paramètres de Penman 2

### V.3 Vérification et utilisation de la formule de Romanenko

La vérification de la formule de Romanenko consiste en la détermination du paramètre  $a$  présent dans la formule suivante :

$$PE = a(T_a + 25)^2(1 - h_a) \quad [V.4]$$

$$a = \frac{PE}{(T_a + 25)^2(1 - h_a)}$$

Les données du séchage 2 sont utilisées pour déterminer ce paramètre et le résultat est présenté sur la Figure V.8. On observe une diminution de  $a$  dans le temps (de 30% du début jusqu'à la fin) et cette diminution est liée à l'augmentation de la température dans la même période. La valeur moyenne de  $a$  est de  $1,59 \times 10^{-5}$ .

Etape 1. Vérification avec le séchage 2

Comme pour la vérification de Penman 1, une vérification avec la même série d'essai est réalisée et le résultat est présenté sur la Figure V.9. Malgré le fait que  $a$  évolue dans le temps et une seule valeur de  $a$  est utilisée dans le calcul, le taux  $PE$  calculé est dans le même ordre de grandeur que le taux  $PE$  mesuré. Cette remarque est seulement valable pour les trois premières plages de température car pour la quatrième, un écart de 30% est observé.

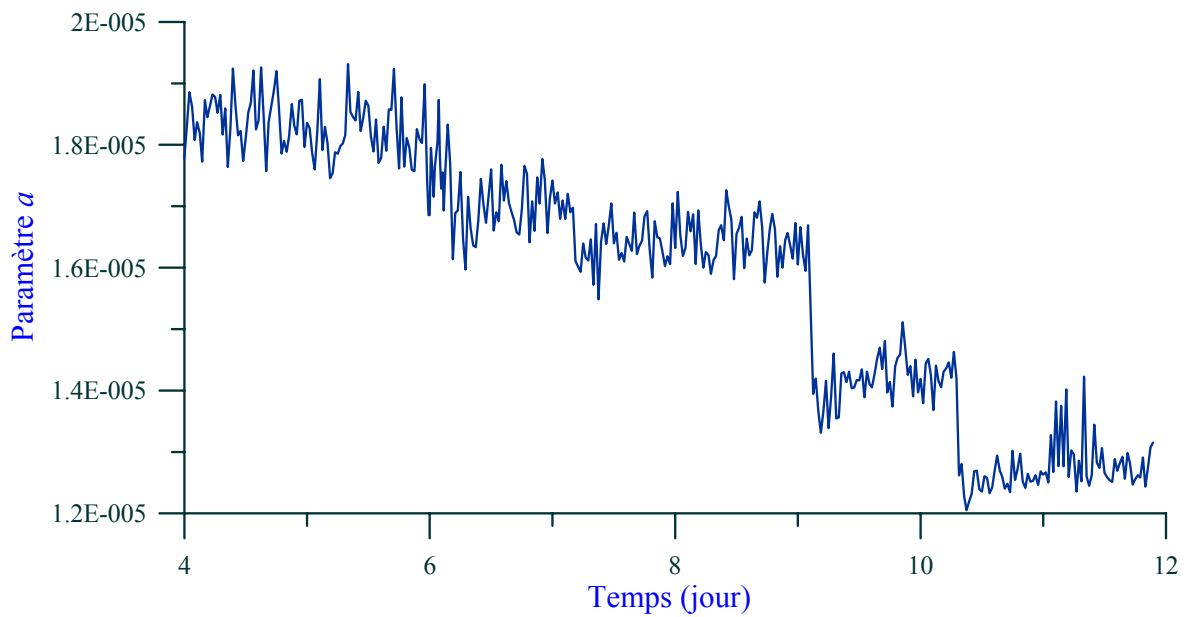


Figure V.8. Evolution de  $a$  dans le séchage 2

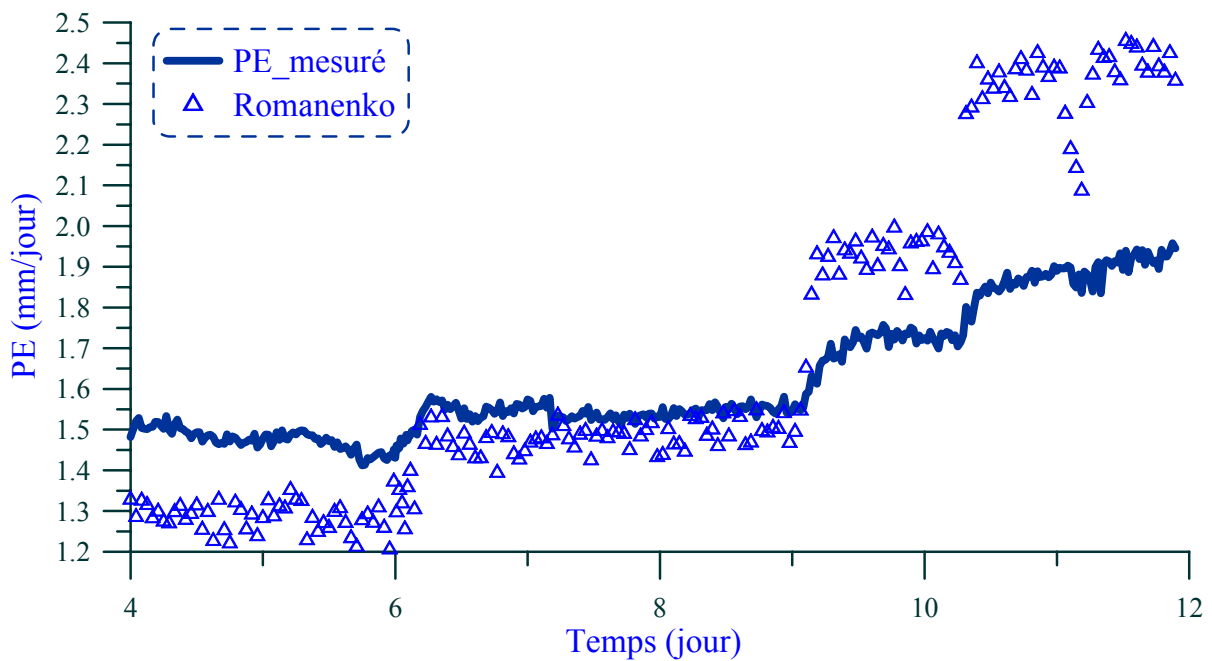


Figure V.9. Vérification de  $a$  avec les données du séchage 2

#### Etape 2. Validation avec séchage 1

La validation avec le séchage 1 est présentée sur la Figure V.10. Un écart moyen de 20% entre le taux  $PE$  calculé et le taux  $PE$  mesuré est en général observé. En fait, cet écart s'agrandit vers la fin de l'essai avec la diminution de la vitesse du vent qui cause une chute importante sur le taux  $PE$  mesuré. Cette chute n'est pas visible sur la courbe du taux  $PE$  calculé.



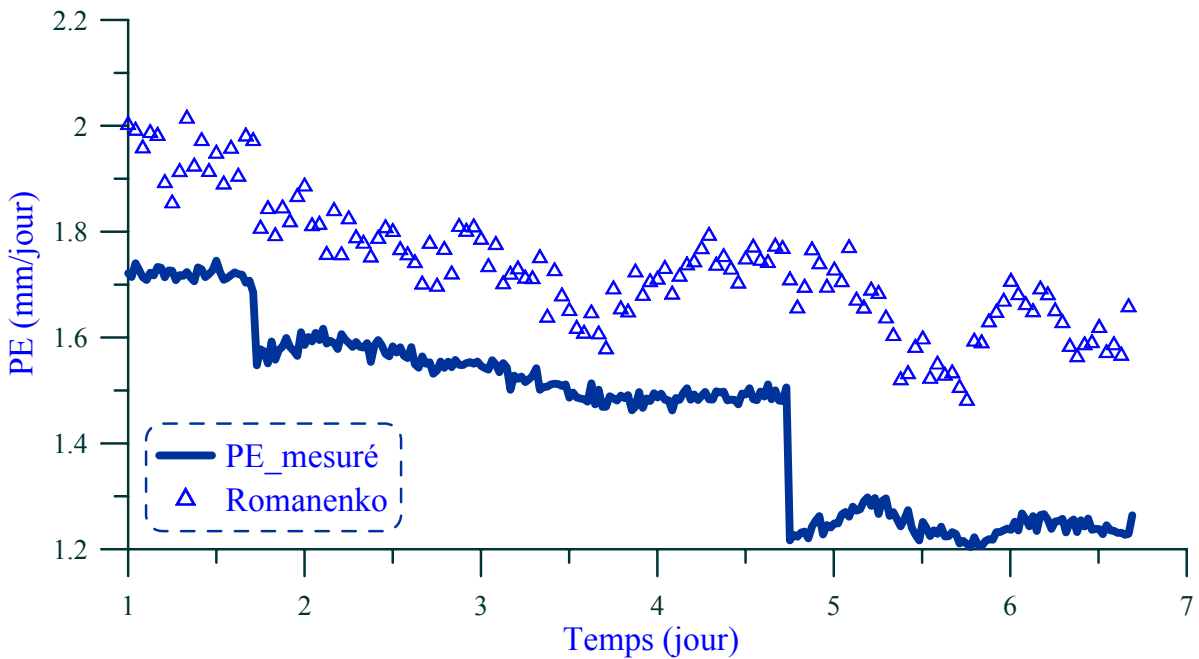


Figure V.10. Validation de la formule de Romanenko avec le séchage 1

En conclusion, la formule avec des paramètres calés de Romanenko (1961) peut reproduire les résultats expérimentaux de façon relativement satisfaisante dans le cas avec variations de température. En revanche, cette formule ne permet pas une bonne estimation dans le cas avec variations de la vitesse du vent. Ceci peut être expliqué par le manque d'un terme explicite lié à la vitesse du vent dans cette formule.

D'un autre côté, la formule de Penman 1 montre une performance inversée : bonne estimation dans le cas avec variations de la vitesse du vent et mauvaise estimation dans le cas avec variations de température. Ceci montre qu'il est nécessaire d'introduire explicitement un terme lié à la température dans cette formule.

Ainsi, dans les sections suivantes, un développement d'une formule prenant en compte explicitement la température et la vitesse du vent est effectué.

#### V.4 Développement d'une formule basée sur la formule de Choudhury et Monteith

La formule de Choudhury et Monteith est considérée et développée car elle contient explicitement la vitesse du vent, la température à la surface du sol et la température dans l'air (Choudhury et Monteith 1988) :

$$PE = (P_{vs}^s - P_{va}) / R_a \quad [V.5]$$

$$R_a = R_{wo} \frac{1}{(1 + R_l(T_s - T_a))^\eta}$$

$$\text{où : } R_{ao} = \frac{[\ln(\frac{z_a}{z_o})]^2}{K^2 u_a} \text{ et } R_i = \frac{5gz_a}{u_a^2 T_a}$$

$\eta = 0,75$  pour la condition instable ( $T_s > T_a$ ) et  $\eta = 2$  pour la condition stable ( $T_s < T_a$ ). Dans notre essai, la température  $T_a$  étant supérieure à la température  $T_s$ , la condition est ainsi stable :

$$R_a = R_{ao} \frac{1}{(1 + R_i(T_s - T_a))^2}$$

La formule [V.5] est ainsi développée comme suit :

$$\frac{PE}{P_{vs} - P_{va}} = \frac{(1 + R_i(T_s - T_a))^2}{R_{ao}} = \frac{1}{R_{ao}} \left( 1 + \frac{5gz_a}{u_a^2 T_a} (T_s - T_a) \right)^2 = \frac{K^2 u_a}{[\ln(\frac{z_a}{z_o})]^2} \left( 1 - \frac{5gz_a}{u_a^2} + \frac{5gz_a}{u_a^2} \frac{T_s}{T_a} \right)^2$$

$$\sqrt{\frac{PE}{P_{vs} - P_{va}}} = \frac{K\sqrt{u_a}}{\ln(\frac{z_a}{z_o})} \left| 1 - \frac{5gz_a}{u_a^2} + \frac{5gz_a}{u_a^2} \frac{T_s}{T_a} \right| \quad [V.6]$$

$$\text{On note } y = \sqrt{\frac{PE}{P_{vs} - P_a}} \text{ et } x = \frac{T_s}{T_a}.$$

La relation entre  $y$  et  $x$  doit être linéaire et prend la forme suivante :  $y = ax + b$ .

Les données du séchage 2 sont utilisées pour déterminer les deux paramètres  $a$  et  $b$  (Figure V.11). On trouve une relation relativement linéaire ( $R^2 = 0,63$ ), donnant  $a = 103$  et  $b = -100$ .

Ces valeurs permettent de déterminer ensuite la vitesse du vent  $u$  et la rugosité de la surface du sol  $z_o$ . En effet, si on note :

$$u = \frac{K\sqrt{u_a}}{\ln(\frac{z_a}{z_o})} \text{ et } v = \frac{5gz_a}{u_a^2}, \text{ on a :}$$

$$\begin{cases} a = uv \\ b = u(1-v) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} v = a/(a+b) \\ u = a+b \end{cases}$$

On en déduit :  $u = 3$  et  $v = 34,3$ .

On note que la détermination de  $u_a$  et de  $z_o$  nécessite la connaissance de  $z_a$ , la hauteur à laquelle la vitesse du vent  $u_a$  est mesurée. En fait, au cours de notre essai, le point de mesure dans l'air évolue en raison de l'abattement du niveau d'eau en surface. En effet, la hauteur varie entre 0,02 m et 0,1 m. Pour chaque valeur de  $z_a$ , on trouve une valeur de rugosité et une valeur de vitesse du vent

correspondantes (Figure V.12). Prenons à titre d'exemple une valeur moyenne de  $z_a = 0,06$  m, on a une vitesse du vent de 0,3 m/s et une rugosité de 0,05 m.

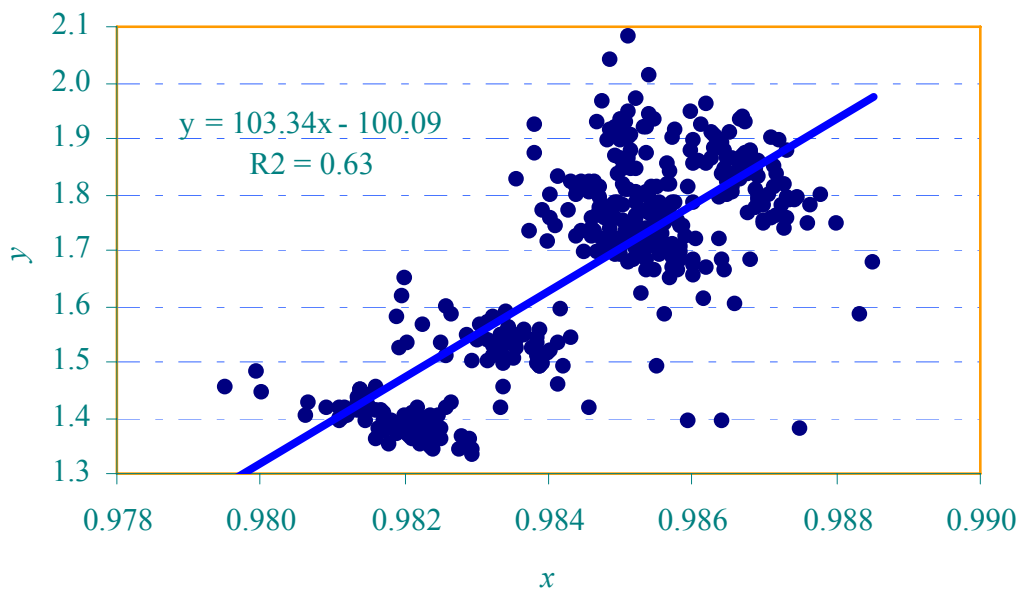


Figure V.11. Détermination de deux paramètres  $a$  et  $b$

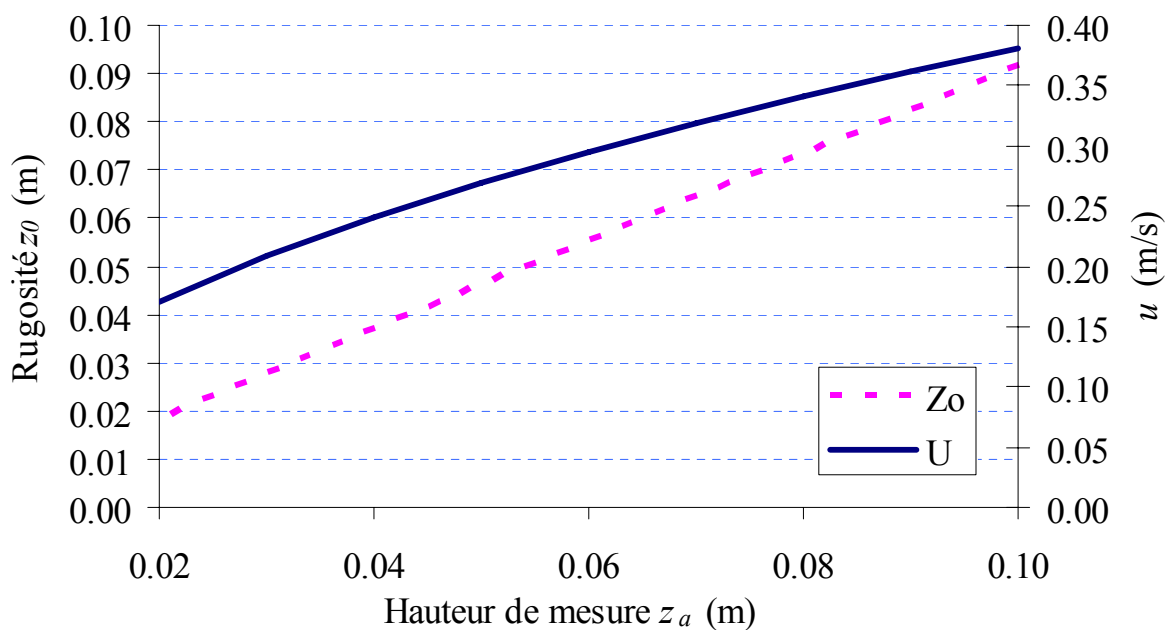


Figure V.12. Variations de la rugosité  $z_0$  et de la vitesse du vent  $u$  en fonction de la hauteur de mesure  $z_a$

On rappelle que  $z_0$  est un paramètre intrinsèque du sol. Dans cette étude où le vent est relativement faible qui ne provoque pas de vagues à la surface d'eau, la rugosité  $z_0$  doit être constante (Brutsaert

1988). La valeur de rugosité de la surface d'eau dans cette étude est ainsi estimée à 0,05 m. Cette valeur est largement supérieure à la valeur de 0,0003 m proposée par Brutsaert (1988) et Wallace et Hobbs (2006). Néanmoins, on note que dans leurs études, la valeur de 0,0003 m est utilisée pour une surface d'eau très grande (un lac, une mer calme) tandis que la valeur 0,05 m dans cette étude est trouvée sur une surface de 0,8 m<sup>2</sup> et avec du vent turbulent. Ainsi, cette valeur et quelques valeurs proches sont utilisées pour calculer le taux d'évaporation  $PE$  pour le séchage 1 et séchage 2. Les résultats sont présentés sur la Figure V.13 et la Figure V.14, ensemble avec le  $PE$  mesuré.

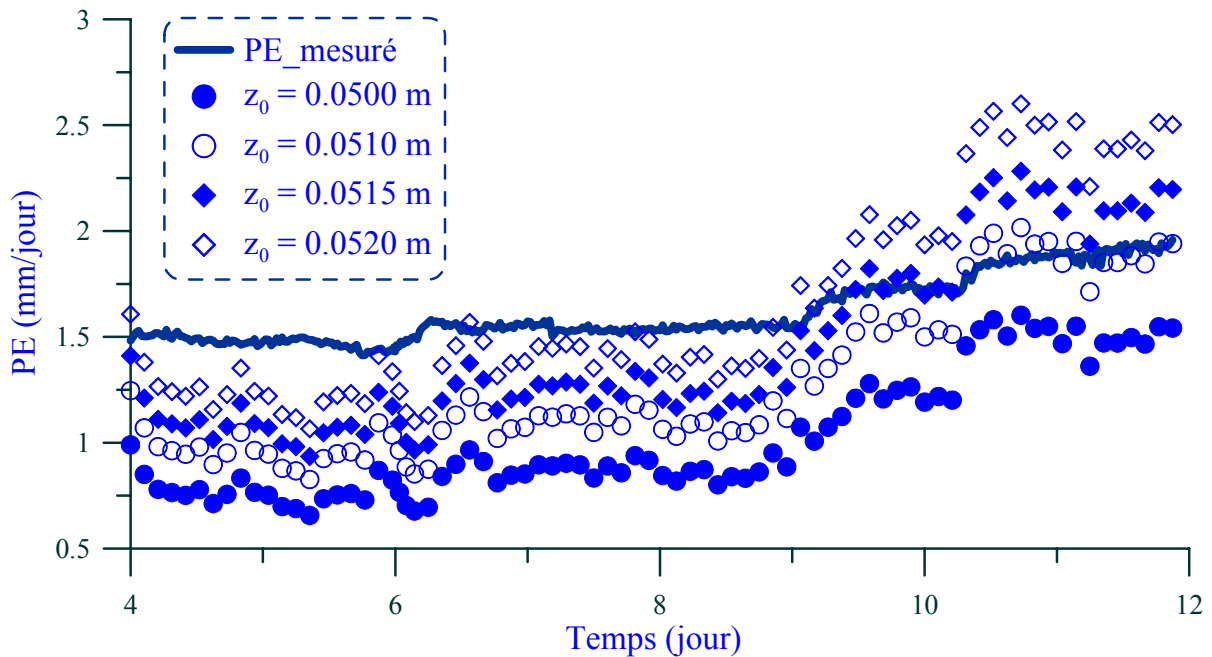


Figure V.13.  $PE$  mesuré et  $PE$  calculé avec quatre valeurs de  $z_0$  pour le séchage 2

La Figure V.13 et la Figure V.14 montrent une estimation de  $PE$  relativement satisfaisante. En effet, les valeurs calculées sont dans le même ordre de grandeur avec celles mesurées. Sur la Figure V.13, on observe quatre augmentations de  $PE$  calculé correspondant à quatre températures différentes. La Figure V.14 montre des chutes importantes de  $PE$  calculé correspondant aux chutes de vitesse du vent dans le séchage 1. Sur toutes les deux figures, on observe des fluctuations importantes de  $PE$  calculé. Cette fluctuation est probablement due à la présence explicite des températures  $T_s$  et  $T_a$  dans la formule et leurs valeurs présentent en fait des fluctuations significatives (voir Figures III.1 et III.2).

D'autre part, ces résultats avec différentes valeurs de  $z_0$  montrent une sensibilité importante du taux  $PE$  calculé par cette formule à la valeur de  $z_0$ . En effet, une différence de 4% de  $z_0$  peut engendrer une différence de 100% du taux  $PE$  calculé.

Enfin, parmi les valeurs de  $z_0$  considérées, une valeur de  $z_0 = 0,0515$  permet d'obtenir de meilleurs résultats.

En conclusion, cette méthode, dite de Choudhury et Monteith modifiée, permet d'avoir une estimation assez proche de la valeur réelle. Cependant, cette estimation dépend beaucoup de la

valeur de  $z_0$  qui n'est pas toujours évidente à estimer. Une valeur de 0,0515 semble être la plus représentative pour la chambre environnementale avec de l'eau sur la surface.

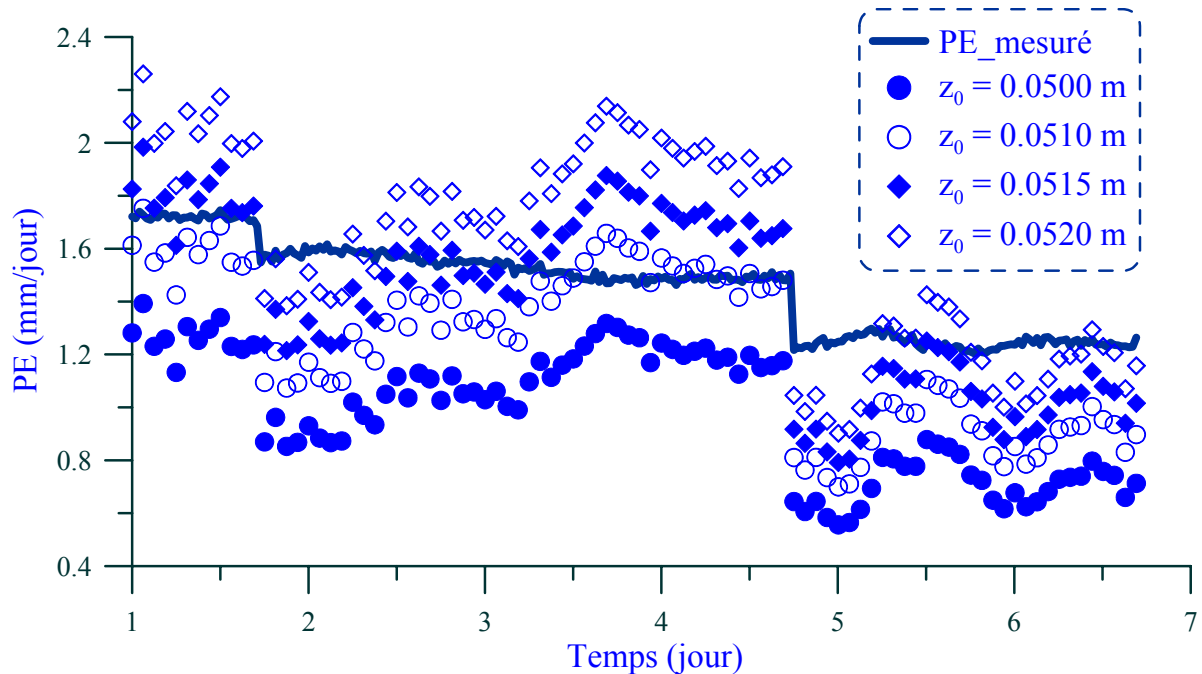


Figure V.14. PE mesuré et PE calculé avec quatre valeurs de  $z_0$  pour le séchage 1

### V.5 Développement d'une formule basée sur la formule de Penman

Deux modifications sont portées à la formule de Penman 1 [V.7] et [V.9] :

$$PE = a(1+bu)(P_{vs}^s - P_{va})(c - d(T_a - T_s)) \quad [V.7]$$

Ou

$$c - d(T_a - T_s) = \frac{PE}{a(1+bu)(P_{vs}^s - P_{va})} \quad [V.8]$$

$$PE = a(1+bu)(P_{vs}^s - P_{va})(c - dT_a) \quad [V.9]$$

Ou

$$(c - dT_a) = \frac{PE}{a(1+bu)(P_{vs}^s - P_{va})} \quad [V.10]$$

La différence entre les deux modifications réside dans la considération de l'effet de la température. Pour la première formule [V.7], la différence de  $T_a$  et  $T_s$  est considérée, tandis que dans la deuxième formule [V.9] seule la  $T_a$  est considérée. Les deux paramètres  $a$  et  $b$  sont comme avant.

Les données du séchage 2 sont utilisées pour calculer les termes à droite des équations [V.8] et [V.10]. Les résultats sont présentés respectivement sur la Figure V.15 et la Figure V.16.

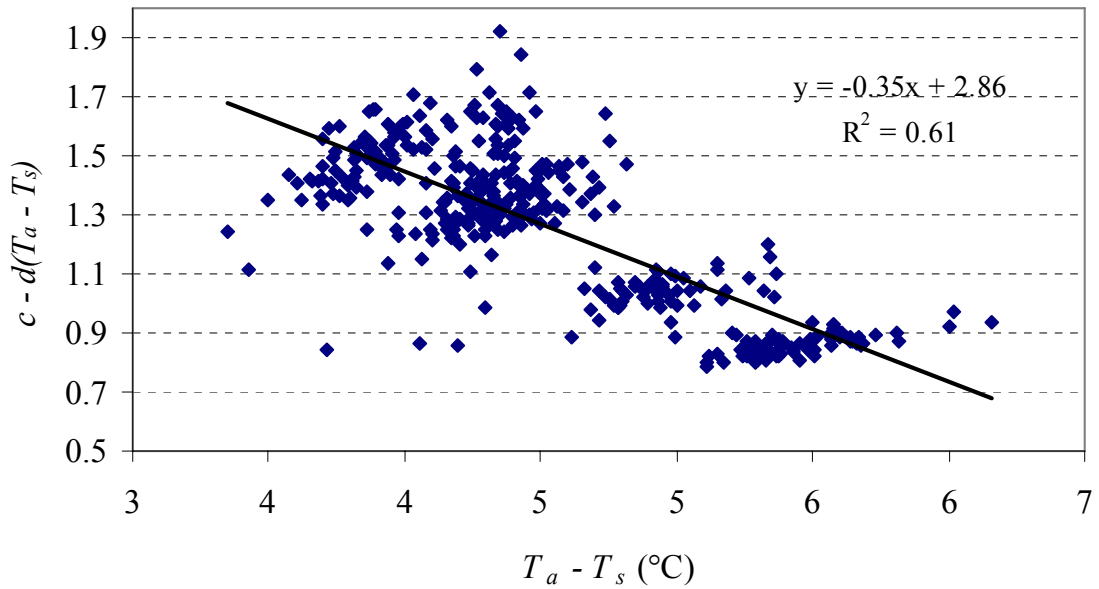


Figure V.15. Détermination de  $c$  et  $d$  de la formule [V.7]

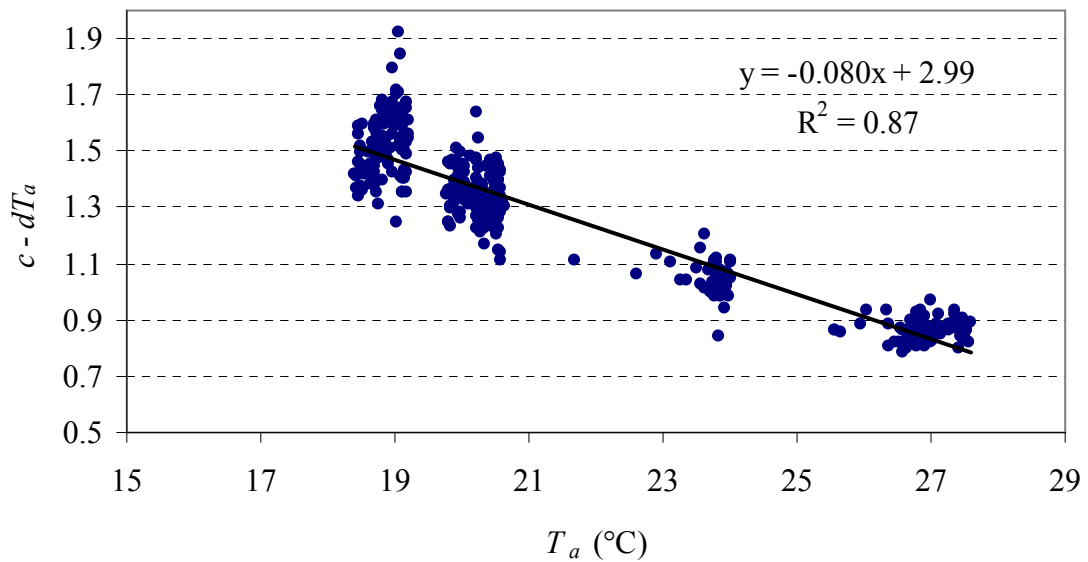


Figure V.16. Détermination de  $c$  et  $d$  de la formule [V.9]

On obtient :  $c = 2,86$  et  $d = 0,35$  pour [V.7] et  $c = 2,00$  et  $d = 0,08$  pour [V.9]. La comparaison entre les deux corrélations illustre un meilleur résultat par la formule [V.9] (avec  $R^2 = 0,87 > R^2 = 0,61$  pour [V.7]). Les expressions déterminées sont donc :

$$PE = 0,33(1 + 11,55u) \left( P_{vs}^s - P_{va} \right) (2,86 - 0,35(T_a - T_s)) \quad [V.11]$$

$$PE = 0,33(1+11,55u)(P_{vs}^s - P_{va})(2,00 - 0,08T_a) \quad [V.12]$$

Ces formules sont utilisées par la suite pour calculer  $PE$  du séchage 2 et du séchage 1 et les résultats sont présentés sur la Figure V.17 et Figure V.18 respectivement, ensemble avec les taux mesurés ainsi que les taux calculés par Penman 1.

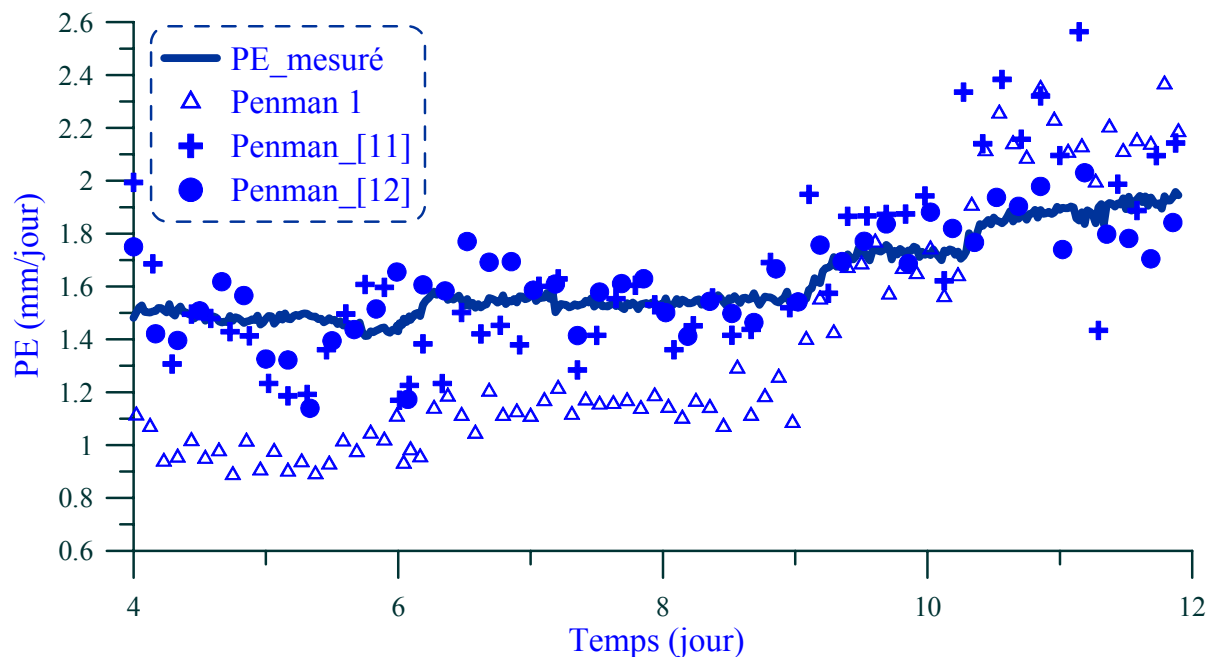


Figure V.17. PE calculé par deux formules modifiées et PE mesuré pour le séchage 2

Ces figures illustrent une meilleure performance de la formule [V.12] par rapport à la formule [V.11]. En effet, la formule [V.11] permet seulement une bonne estimation du séchage 2 ; pour le séchage 1, un écart important peut être observé entre le  $PE$  calculé par [V.11] et le  $PE$  mesuré.

La comparaison entre Penman 1 et la formule [V.12] indique une meilleure estimation de  $PE$  par Penman 1 pour le séchage 1. Cependant, sur les deux séchages, la formule [V.12] donne un meilleur résultat.

En conclusion, l'introduction explicite d'un terme linéaire de la température de l'air  $T_a$  améliore en général la formule Penman 1. On note aussi que cette introduction réduit légèrement la qualité de la prévision de Penman 1 dans le cas avec différentes vitesses du vent.

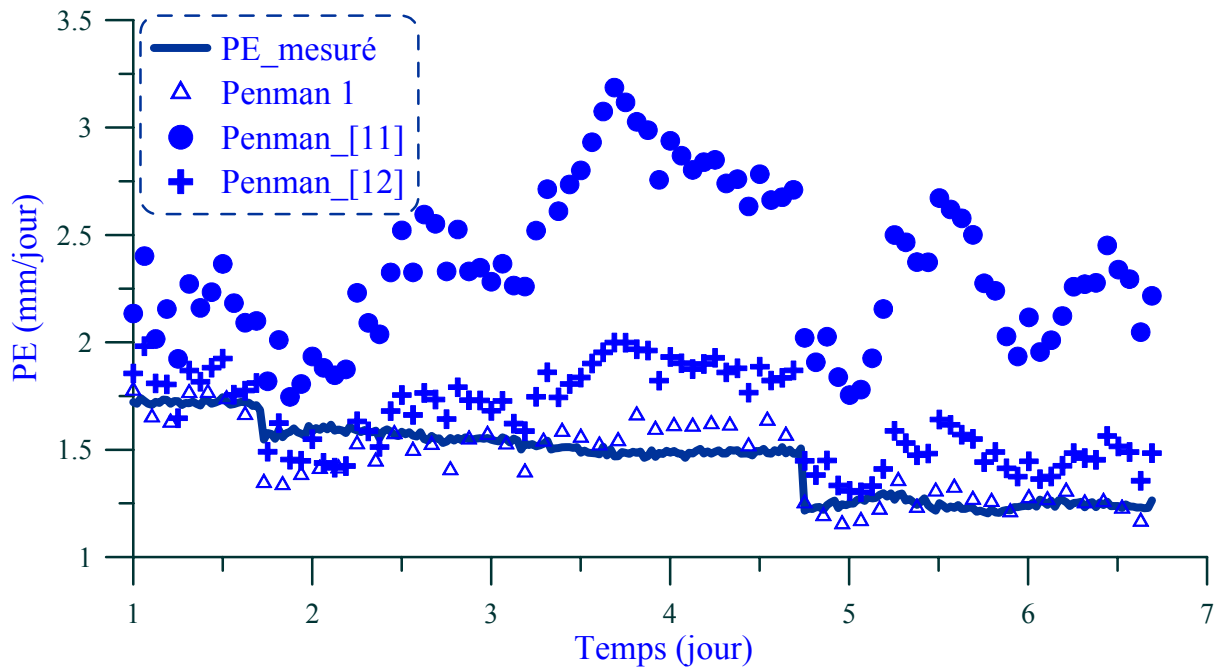


Figure V.18. PE calculé par deux formules modifiées et PE mesuré pour le séchage 1

#### V.6 Développement d'une formule basée sur la formule de Romanenko (1961)

Le développement d'une formule à partir de la formule de Romanenko (1961) est effectué en deux étapes : l'étude du paramètre  $c$  [V.13] et l'introduction de l'effet du vent.

$$PE = a(T_a + 25)^c (1 - h_a) \quad [V.13]$$

$$a = \frac{PE}{(T_a + 25)^c (1 - h_a)}$$

La nécessité d'étudier la valeur de  $c$  est liée à la diminution du paramètre  $a$  dans le temps (voir Figure V.8) pour le séchage 1 quand une valeur constante  $c = 2$  est considérée. On rappelle qu'en principe  $a$  doit être constant. Il paraît que la puissance  $c = 2$  dans l'équation soit trop grande qui engendre la diminution de  $a$ . Ainsi, dans cette étude, deux autres valeurs plus petites de  $c$  sont proposées : 1 et 0. Les deux valeurs de  $a$  correspondantes sont calculées et sont présentées sur la Figure V.19, ensemble avec le résultat du cas  $c = 2$ . On observe que dans les deux cas,  $c = 1$  et  $c = 2$ , les valeurs de  $a$  calculées varient de 50% et de 33% du début jusqu'à la fin. En revanche, dans le cas avec  $c = 0$ , on observe une fluctuation de 8% autour d'une valeur moyenne de 0,035. Ceci montre qu'il n'existe pas une relation explicite du rapport  $PE/(1 - h_a)$  avec la température de l'air.

Les  $PE$  calculés par la formule [V.13] avec trois valeurs de  $c$  (2, 1 et 0) sont présentés sur la Figure V.20, ensemble avec le  $PE$  mesuré. Cette figure montre une très bonne correspondance entre le  $PE$  mesuré et le  $PE$  calculé avec  $c = 0$ . On y observe également un éloignement du  $PE$  calculé du  $PE$  mesuré quand  $c$  augmente de 0 à 2. Cette observation confirme la non nécessité de l'introduction du terme de température dans la formule [V.13].



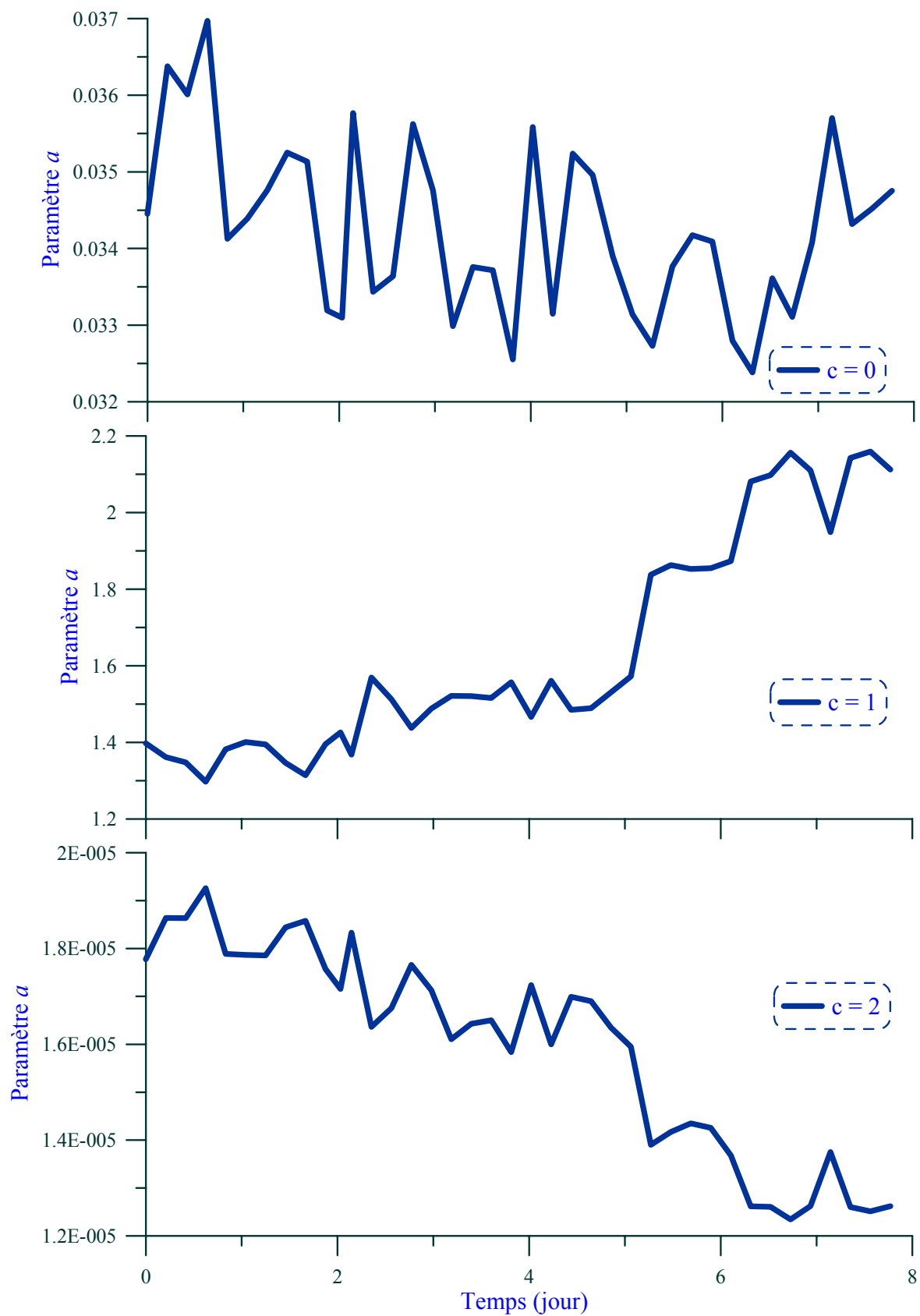


Figure V.19. Variations du paramètre  $a$  avec différentes valeurs de  $c$

A la lumière des résultats d'analyse présentés précédemment, on a adopté la formule [V.13] avec  $c = 0$  pour calculer  $PE$  pour le séchage 1. Le résultat obtenu est comparé avec  $PE$  mesuré et  $PE$  calculé par [V.13] avec  $c = 2$  sur la Figure V.21. On observe effectivement une amélioration de la formule [V.13] avec  $c = 0$  par rapport à la formule [V.13] avec  $c = 2$ . Néanmoins, cette amélioration n'est pas suffisante pour suivre l'évolution de  $PE$  pour les deux dernières plages de vitesse du vent. Pour la première plage du séchage 1, on remarque une bonne estimation avec  $c = 0$ . Mais cela peut être expliqué par la vitesse du vent identique dans les deux séchages 1 et 2 (0,5 m/s) pendant cette période.

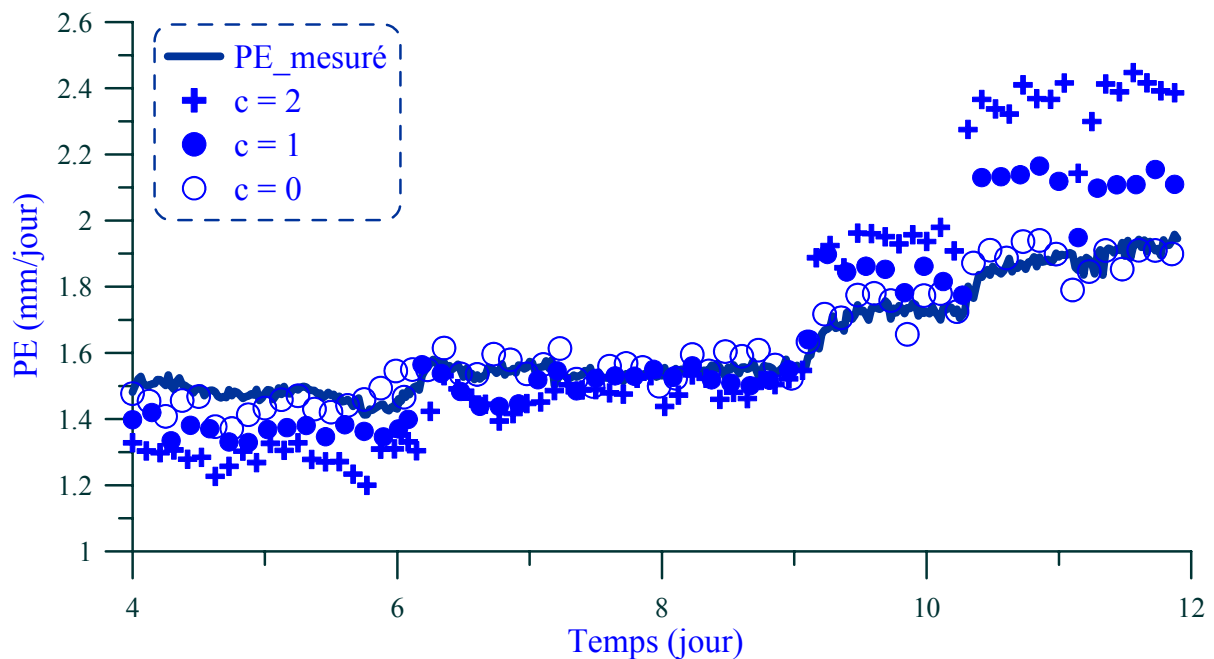


Figure V.20. Taux  $PE$  calculé avec différentes valeurs de  $c$  et  $PE$  mesurées dans le séchage 2

En conclusion, l'utilisation du terme  $(1 - h_a)$  permet de considérer de façon implicite l'effet de la température sur  $PE$ . Une bonne estimation du taux  $PE$  dans le cas de différentes températures peut être obtenue sans introduction de termes supplémentaires liés à la température. Néanmoins, il paraît nécessaire d'introduire explicitement un terme lié à la vitesse du vent. Pour ce faire, on propose une relation simple linéaire :

$$PE = (a + bu)(1 - h_a) \quad [V.14]$$

La détermination des deux paramètres  $a$  et  $b$  (Figure V.22) est similaire à celle pour la formule de Penman 1. Les données du séchage 1 sont utilisées et la corrélation donne :  $a = 0,0118$  et  $b = 0,0468$ . On a donc :

$$PE = (0,0118 + 0,0468u)(1 - h_a) \quad [V.15]$$

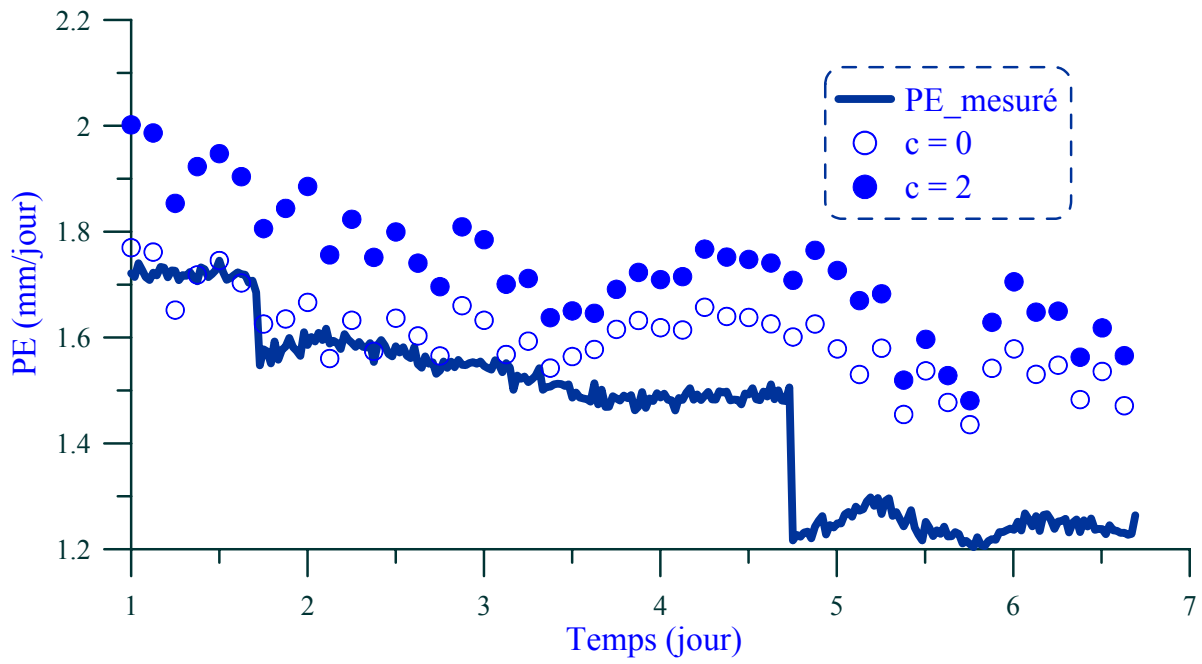


Figure V.21.  $PE$  calculé avec différentes valeurs de  $c$  et  $PE$  mesuré dans le séchage 1

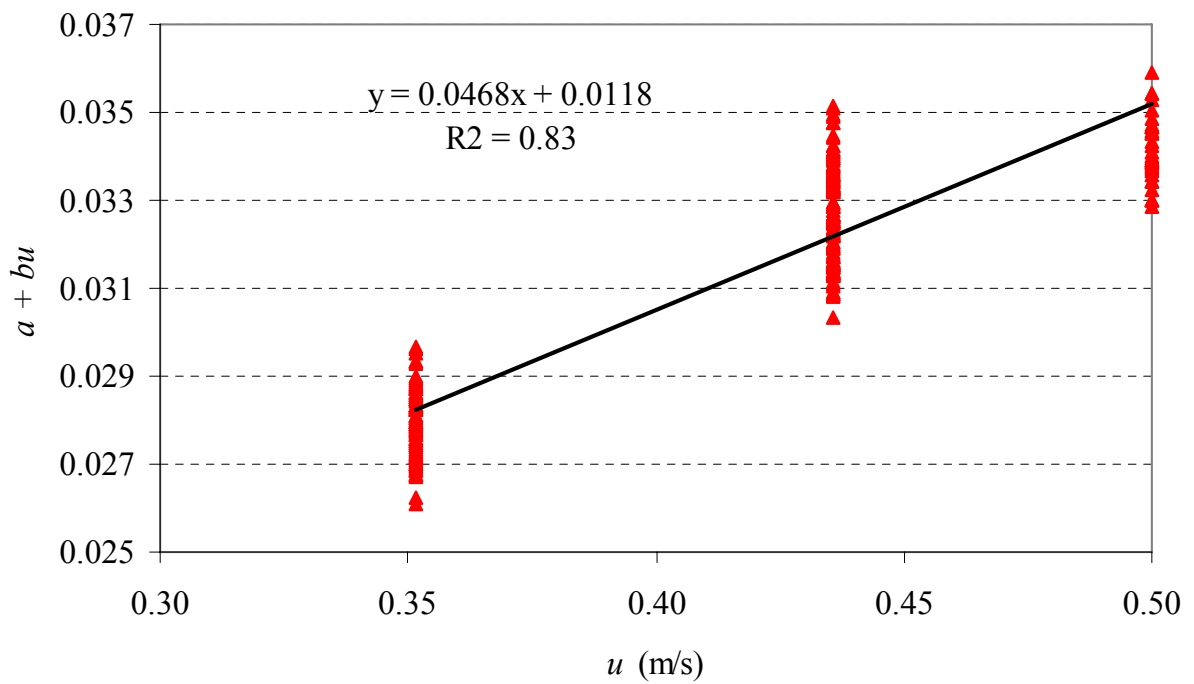


Figure V.22. Détermination des deux paramètres  $a$  et  $b$  de la formule [V.14]

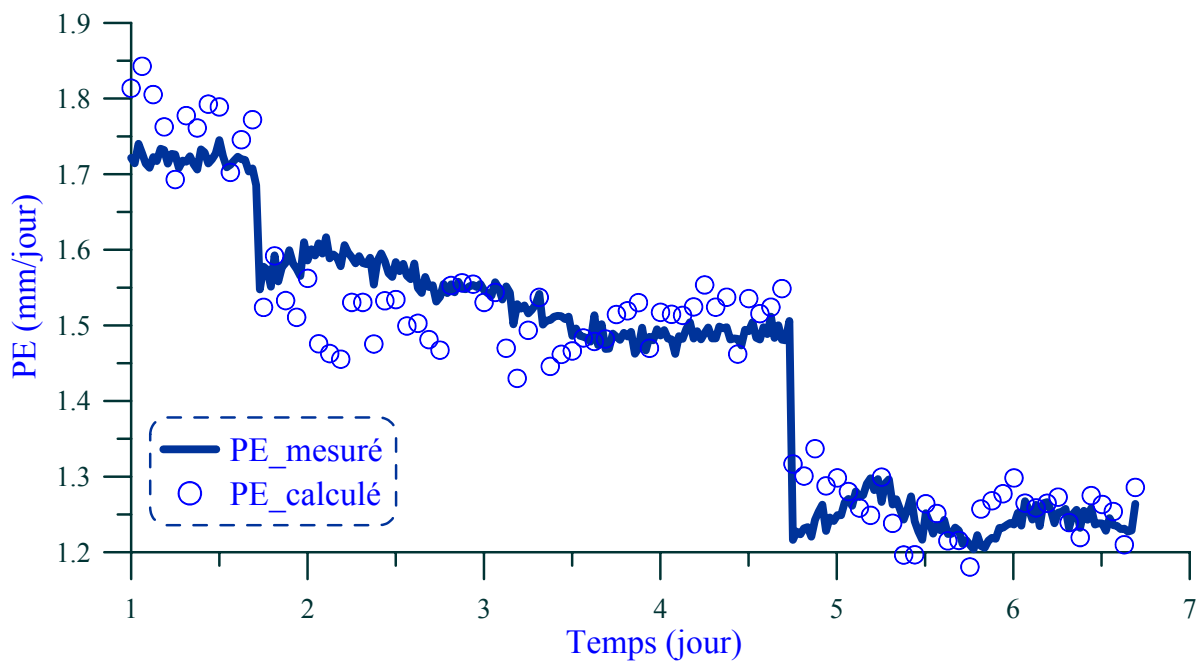


Figure V.23. PE calculé par [V.15] et PE mesuré pour le séchage 1

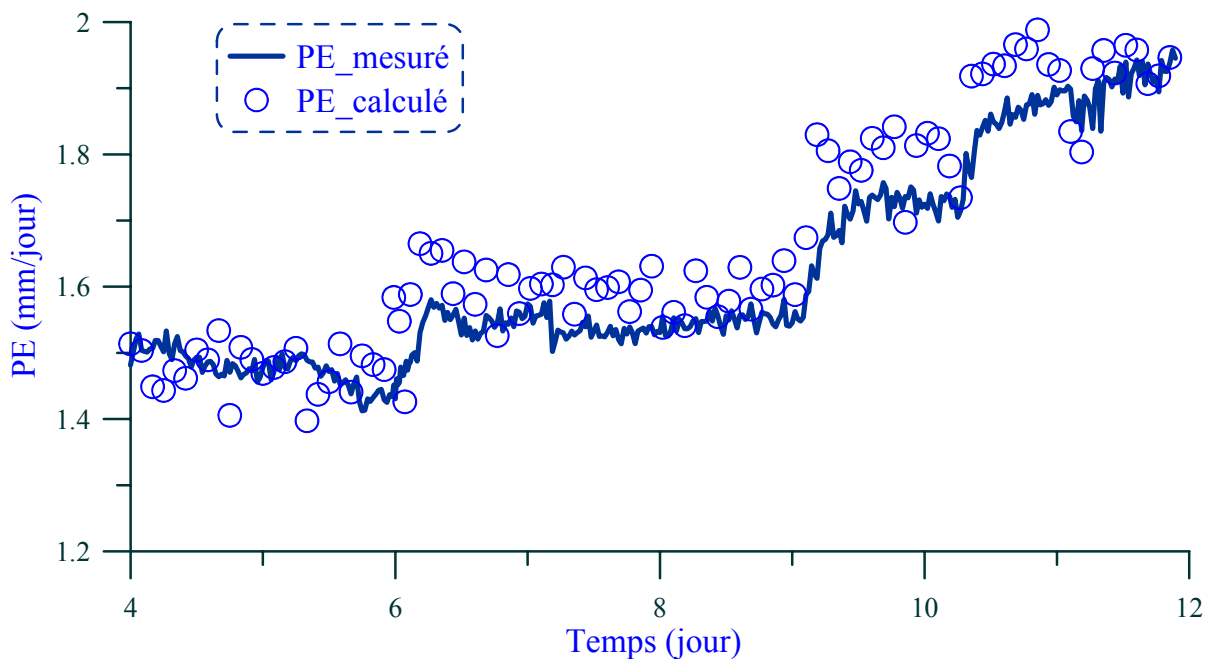


Figure V.24. PE calculé par [V.15] et PE mesuré pour le séchage 2

La formule [V.15] est utilisée pour calculer le taux d'évaporation  $PE$  et le résultat est mis en comparaison avec le taux  $PE$  mesuré pour deux séchages 1 et 2 sur la Figure V.23 et la Figure V.24 respectivement. On y observe une bonne correspondance entre le taux  $PE$  calculé et le taux  $PE$  mesuré, ce qui montre que la formule [V.15] permet de prendre en compte de façon satisfaisante l'effet de la vitesse du vent et l'effet de la température.

### V.7 Comparaison et analyse des formules développées

L'ensemble des formules jugées pertinentes d'après le calage des paramètres est comparé avec les résultats de mesure pour les deux séchages 1 et 2 (Figure V.25 et Figure V.26 respectivement). Afin de faciliter le suivi, un récapitulatif de ces formules est présenté dans le Tableau V-2.

Tableau V-2. Récapitulatif des formules développées

Nom	Formule
Penman 1	$PE = 0,33(1+11,55u)(P_{vs}^s - P_{va})$
Penman 1_[12]	$PE = 0,33(1+11,55u)(P_{vs}^s - P_{va})(2,99 - 0,08T_a)$
Choudhury-Monteith_ $z_0 = 0,0515$ m	$PE = \frac{K^2 u_a}{[\ln(\frac{z_a}{0,0515})]^2} \left( 1 - \frac{5gz_a}{u_a^2} + \frac{5gz_a T_s}{u_a^2 T_a} \right)^2 (P_{vs}^s - P_{va})$
Romanenko modifiée_ $c = 0$	$PE = 0,035(1 - h_a)$
Formule proposée	$PE = (0,0118 + 0,0468u)(1 - h_a)$

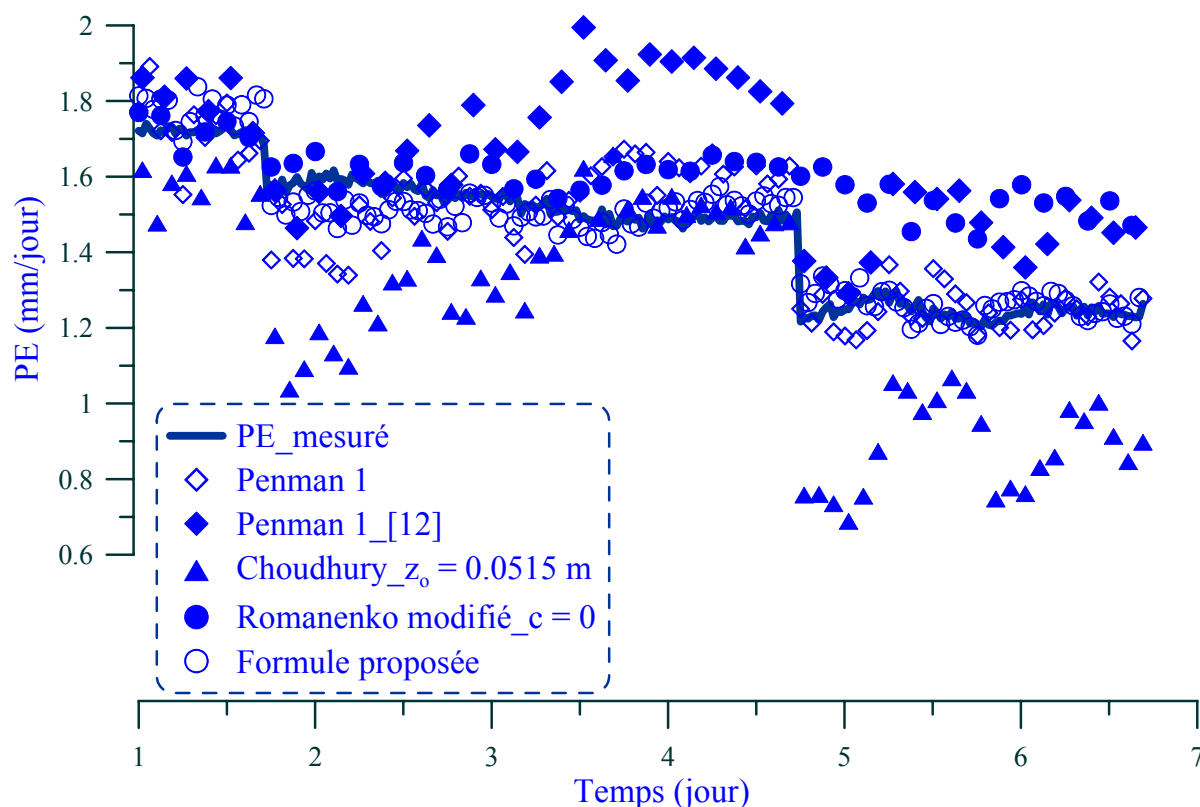


Figure V.25. Comparaison des différentes formules – séchage 1

Sur la Figure V.25, on distingue deux meilleures formules : Penman 1 et la formule proposée. Le point commun des deux formules réside dans la manière de prise en compte de la vitesse du vent.

Ainsi, on peut conclure qu'une considération linéaire pourrait être suffisante pour simuler le taux  $PE$  à différentes vitesses du vent. En revanche, la même méthode de prise en compte de la vitesse du vent est appliquée à la formule Penman 1 [12]. On observe cependant sur la Figure V.25 une grande fluctuation du résultat calculé par cette formule. Cette fluctuation est liée probablement à l'introduction du terme de température  $T_a$  qui présente aussi des fluctuations pendant le séchage 1. Le même constat peut être fait sur la formule de Choudhury-Monteith. On observe également que sans le terme lié à la vitesse du vent, la formule de Romanenko modifiée  $c = 0$  ne permet pas une bonne simulation quand la vitesse du vent change.

Sur la Figure V.26 on remarque que trois formules permettant un bon calcul du  $PE$  quand la température augmente et la vitesse est maintenue constante sont : Penman 1 [12], Romanenko modifiée  $c = 0$  et la formule proposée. La bonne performance de la formule Penman 1 [12] montre que le taux  $PE$  dépend fortement de la température de l'air. De plus, le fait que la simple formule de Romanenko modifiée  $c = 0$ , où aucun terme lié à la température n'est explicite, donne également une bonne estimation, permet de conclure que la dépendance de  $PE$  vis-à-vis de la température de l'air peut être introduite dans l'humidité relative de l'air.

En outre, on note que la formule proposée et la formule de Penman 1 sont similaires. La différence réside dans le choix du profil hydrique. Pour la formule de Penman 1, c'est le profil de pression de vapeur d'eau qui est utilisée, et pour la formule proposée, c'est le profil de l'humidité relative qui est utilisée. On précise que le chiffre 1 dans cette formule signifie 100% qui est l'humidité relative à la surface d'eau.

Dans la plupart d'études trouvées dans la littérature, la température et la pression de vapeur d'eau saturante à la surface du sol sont souvent manquantes, et on utilise directement la pression de vapeur d'eau saturante dans l'air (Penman 1948; Singh et Xu 1997). Dans ce cas le terme  $(P_{vs}^s - P_{va})$  devient  $(P_{vs}^a - P_{va})$  appelé déficit de la pression de vapeur d'eau. On rappelle que la pression de vapeur d'eau saturante dépend uniquement de la température. Ainsi :  $P_{vs}^a = f(T_a)$  (III.2.1). Un simple développement conduit à :

$$P_{vs}^s - P_{va} \cong P_{vs}^a - P_{va} = P_{vs}^a (1 - P_{va} / P_{vs}^a) = f(T)(1 - h_a)$$

Ainsi, la seule différence est sur le terme  $f(T_a)$ . Cette analyse confirme que l'effet de la température de l'air est inclus dans la définition de l'humidité relative. Elle explique aussi la mauvaise estimation de  $PE$  donnée par la formule de Penman 1.

En conclusion, la seule formule permettant une bonne simulation pour les deux séchages est la formule proposée :

$$PE = (0,0118 + 0,0468u)(1 - h_a) \quad [V.15]$$

La forme générale de cette formule est :

$$PE = (a + bu)(1 - h_a) \quad [V.14]$$

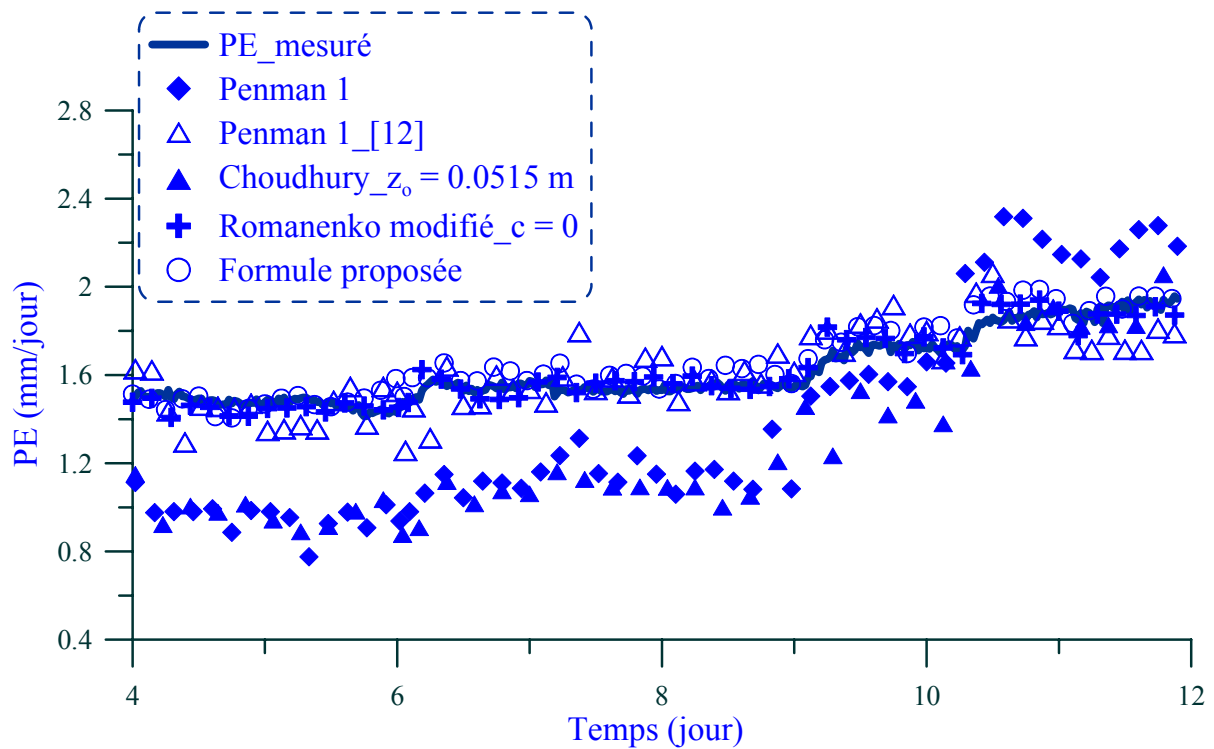


Figure V.26. Comparaison des différentes formules – séchage 2

### V.8 Validation de la formule développée avec les données existantes dans la littérature

La formule généralisée [V.14] est utilisée pour calculer le taux d'évaporation potentiel pour l'essai wind-tunnel de Wang (2006). L'expérimentation et résultat sont présentés dans le chapitre I. Pour rappel, Wang (2006) étudie le phénomène d'évaporation en faisant varier trois facteurs : la vitesse du vent, le rayonnement et la teneur en eau. L'utilisation des deux mesures à  $u = 0$  et  $u = 10$  m/s permet de déterminer les deux paramètres  $a$  et  $b$  :

$$PE = (0,024 + 0,056u)(1 - h_a) \quad [V.16]$$

On note que ces paramètres sont légèrement différents de ceux déterminés à partir des résultats de la chambre environnementale.

La formule [V.16] est utilisée pour calculer le taux  $PE$  et le résultat est présenté sur la Figure V.27, ensemble avec le  $PE$  mesuré.

La Figure V.27 montre une bonne correspondance entre le  $PE$  calculé et le  $PE$  mesuré avec différentes valeurs de rayonnement. Ce résultat valide ainsi la formule développée dans cette étude.

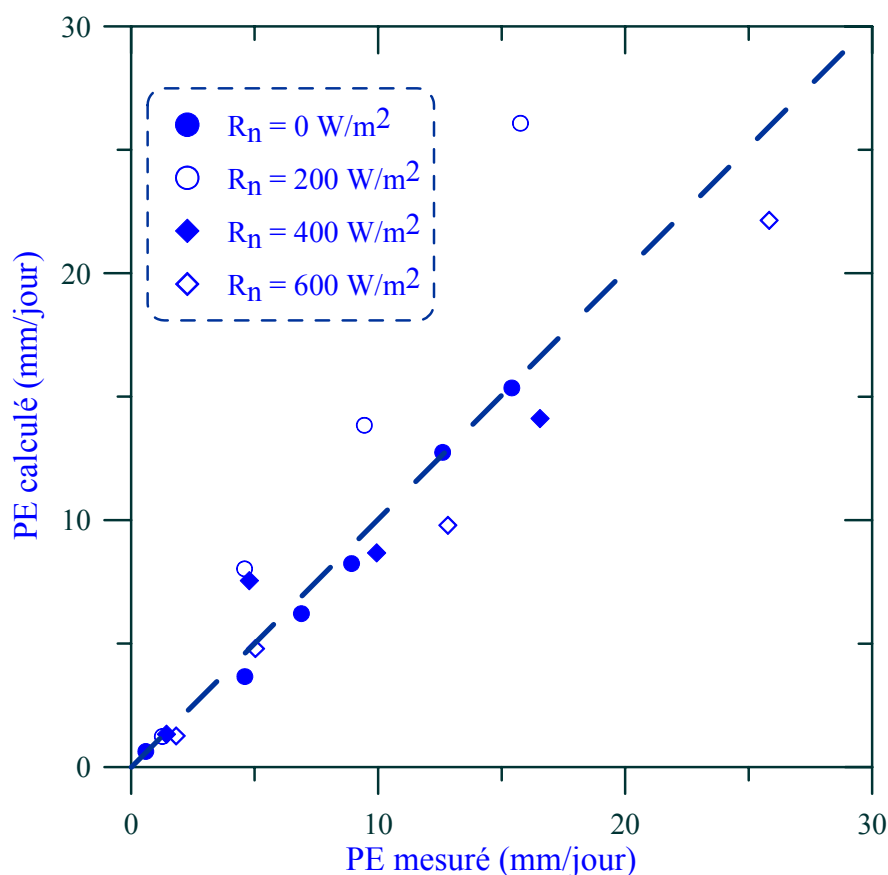


Figure V.27. Validation de la formule développée avec les données de Wang (2006)

## V.9 Conclusions

Dans ce chapitre, les données expérimentales du taux d'évaporation potentiel  $PE$  obtenues lors des deux séchages 1 et 2 sont utilisées pour le développement d'une formule pertinente pour le  $PE$ .

Différentes formules existantes dans la littérature sont d'abord utilisées pour calculer le  $PE$  mais aucune ne donne de résultats satisfaisants. Puis, un travail de calage des paramètres de ces formules est réalisé permettant d'améliorer les résultats. Ces paramètres sont ensuite utilisés pour simuler un essai de séchage différent et les résultats montrent à nouveau les défauts des formules. On en déduit qu'il faut introduire d'autres paramètres liés à la vitesse du vent et à la température.

Différents développements sont ainsi menés : développer une formule dont la température de l'air et du sol et la vitesse du vent sont présentes explicitement ; introduire des termes de température dans la formule de Penman ; étudier le paramètre de puissance et introduire la vitesse du vent dans la formule de Romanenko. Finalement, la formule généralisée [V.14] est proposée qui donne de meilleurs résultats pour la chambre environnementale. De plus, elle est également vérifiée avec les autres résultats trouvés dans la littérature.

Suite à ces analyses, les conclusions suivantes peuvent être tirées.

- La prise en compte explicite de la vitesse du vent est nécessaire pour produire une bonne estimation de  $PE$  surtout dans le cas avec variations importantes de vitesse du vent. Une simple relation linéaire s'avère d'être suffisante.



- Le taux  $PE$  dépend fortement de la température de l'air  $T_a$ , et cette influence peut être considérée dans l'humidité relative de l'air  $h_a$ .
- L'utilisation d'une formule de résistance du type Choudhury-Monteith semble complexe et assez confuse car le choix de  $z_0$  est délicat. De plus, cette formule donne des résultats avec d'importantes fluctuations.
- La formule générale [V.14] est proposée. Cette formule donne de bonnes estimations de  $PE$  dans les deux cas suivants : différentes vitesses du vent et différentes températures. De plus, elle est validée par les résultats de Wang (2006) concernant une expérimentation de wind-tunnel. On utilisera dans le chapitre suivant cette formule pour le calcul du taux  $PE$  pendant les deux derniers séchages, 3 et 4.