

## Détermination de la durée de présence de rosée en fonction de la proximité d'une haie

<sup>1</sup> Dominique Flura, Brigitte Durand, Laurent Huber, Sylvie Masson, Andrée Tuzet

**Résumé :** *Cet article a pour objectif de présenter, une application du cours sur les transferts radiatifs. La durée de mouillage foliaire est une donnée importante pour le développement de maladies cryptogamiques. Les champignons ont besoin pour se développer d'une certaine durée d'humectation ; c'est cette durée de présence d'eau libre qui va être importante et non la quantité d'eau (Huber et Gillespie, 1992). La présence d'une haie va modifier les échanges d'énergie entre la plante et son environnement, parfois en faveur de la persistance de rosée, dans d'autres cas la présence de la haie va limiter le dépôt de rosée. La rosée est l'eau condensée sur la végétation ou sur d'autres objets quand leur température descend au-dessous de la température du point de rosée de l'air environnant. Les conditions favorables à la formation de rosée sont un ciel clair qui provoque un grand déficit radiatif de la surface à refroidir, un vent très faible qui limite les échanges d'énergie entre la feuille et l'air et une humidité relative importante au voisinage de la feuille. A l'aide d'un modèle nous allons examiner ces conditions ainsi que les effets dus à la haie.*

**Mots clés :** Dépôt de rosée, bilan radiatif, bilan d'énergie, coordonnées solaire, ombre portée

### Introduction

L'application du cours sur les transferts radiatifs au travers d'un modèle de bilan d'énergie, appliqué à la durée de mouillage, s'appuie sur une expérimentation qui a eu lieu à Versailles (Tuzet, 2008). Le lieu était propice car disposant de haies orientées Est - Ouest et Nord - Sud à proximité immédiate de cultures. Le cas présenté ici fait référence à la culture près de la haie orientée Nord -Sud. La haie était composée de 4 rangées d'arbres d'une hauteur de 18 m que nous allons considérer comme homogène et infinie. Pour l'expérimentation nous avons disposé des capteurs de durée d'humectation à plusieurs distances perpendiculairement à la haie. Nous avons effectué des mesures météorologiques classiques : rayonnement global, température et humidité de l'air, vitesse et direction du vent.

Après avoir décrit le mécanisme du dépôt de rosée et le principe du bilan d'énergie nous introduirons la haie dans le système. Nous présenterons ensuite des illustrations des effets de la haie sur le bilan radiatif. A l'aide d'une application Excel (Bonhomme R, Chartier M et Dautat J, 2002) nous calculerons les coordonnées solaires et l'ombre portée. Nous estimerons ensuite la durée du dépôt de rosée à l'aide du modèle de J.-P. Lhomme (1992).

---

<sup>1</sup> UMR 1091 Environnement et grandes cultures - EGC -Inra - Agroparistech - F-78850 Thiverval Grignon  
☎ 01 30 81 55 63 ✉ [Dominique.Flura@grignon.inra.fr](mailto:Dominique.Flura@grignon.inra.fr)

## 1. Mécanisme du dépôt de rosée

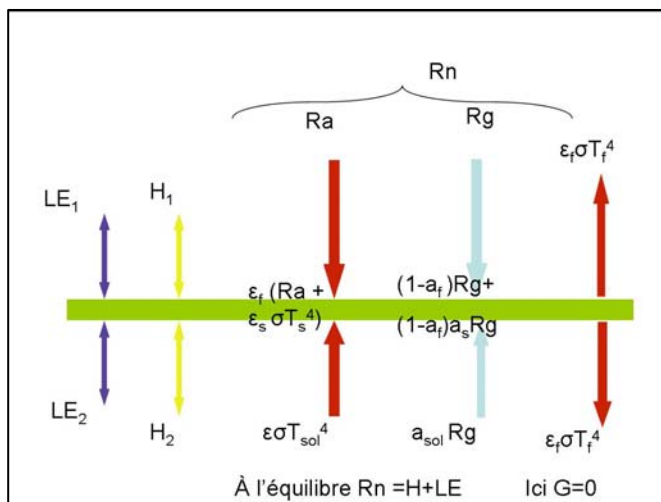
Le dépôt de rosée se produit lorsque la température de la feuille est inférieure à la température du point de rosée de l'air. La température du point de rosée est une caractéristique de l'air humide : plus l'air contient de vapeur d'eau plus la température du point de rosée est proche de celle de l'air. La nuit par ciel clair le déficit radiatif est important. La feuille étant plus chaude que le ciel il s'ensuit un transfert de chaleur par rayonnement sous la forme  $\epsilon\sigma T^4$ .

Des critères favorisent le dépôt de rosée sur une feuille :

- un ciel clair nous venons de voir pourquoi ;
- une humidité de l'air élevée au voisinage de la feuille, ainsi la température du point de rosée est plus facilement atteinte ;
- un vent faible, ce qui limite les échanges convectifs de chaleur entre l'air et la feuille ;
- l'orientation de la feuille : une feuille horizontale aura une surface d'échange radiatif avec le ciel (plus froid que le milieu environnant), plus grande qu'une feuille inclinée. De même tout obstacle à cet échange nuira au dépôt de rosée ce sera le cas d'une haie à proximité.

## 2. Bilan d'énergie

La température de la feuille est une donnée nécessaire pour l'estimation de la durée de rosée. Elle sera estimée à partir du bilan d'énergie schématisé en **figure 1**. Nous considérerons toujours le cas d'une feuille horizontale.



### Légende

**en rouge** ce qui est absorbé ou émis dans les grandes longueurs d'onde,

**en bleu** ce qui est absorbé dans les courtes longueurs d'onde,

**en jaune** le flux de chaleur sensible et

**en violet** le flux de chaleur latente.

Les flèches indiquent le sens des apports et des pertes leurs tailles ne sont pas en rapport avec la valeur des flux.

$\epsilon_f\sigma T_f^4$  représente le rayonnement de grandes longueurs d'onde émis par la feuille, rayonnement que l'on considère identique de chaque côté.

**Figure 1 :** Termes du bilan d'énergie pour les 2 faces d'une feuille notées en indice 1 ou 2.

La partie droite de la **figure 1** représente le bilan radiatif  $R_n$ . La partie gauche représente les apports ou les pertes par convection  $H$  et par chaleur latente,  $LE$ . Si l'on considère qu'il n'y a pas de flux de conduction, le bilan de la feuille s'écrit alors  $R_n = H + LE$ . (équation 1.1)

-  $R_n$  est le rayonnement net absorbé par la feuille, c'est le bilan radiatif de la feuille qui peut être positif ou négatif.

-  $H$  est le flux de chaleur sensible, il traduit les échanges de chaleur avec l'air environnant ; là encore il peut être positif lorsque la feuille est plus froide que l'air et qu'elle le réchauffe ou négatif lorsque l'inverse se produit.

- LE est le flux de chaleur latente, il correspond aux échanges d'énergie par évaporation ou condensation. Lors de l'évaporation, la température de la feuille diminue car elle cède l'énergie nécessaire à cette évaporation. Lors de la condensation c'est l'inverse qui se passe. Ces flux s'écrivent :

Pour le rayonnement net et pour simplifier les équations nous noterons  $R_s$  et  $R_l$  les bilans de courtes et grandes longueurs d'onde qui seront développés au § 8),  
 $R_n = R_s + R_l - n \varepsilon \sigma T_f^4$  (équation 1.2)

$$H = n \rho \cdot c_p \cdot g_b (T_f - T_a) \quad (\text{équation 1.3})$$

$$LE = n(\rho \cdot c_p / \gamma) \cdot g_b \cdot (P(T_f) - P(t_r)) \quad (\text{équation 1.4}) \text{ pour une feuille mouillée.}$$

- où n vaut 2 car on considère les 2 faces de la feuille ;

-  $T_a$  est la température de l'air ;

-  $P(T)$  est la pression de vapeur à la température T. La pression de vapeur est une façon d'exprimer la teneur en vapeur d'eau dans l'air ;

-  $T_f$  est la température de la feuille exprimée en Kelvin.

-  $g_b$  est le coefficient d'échange, c'est une caractéristique de l'échange de chaleur ou de vapeur qui dépend à la fois de la géométrie de la feuille et de la vitesse de l'air au voisinage de la feuille ;

-  $\rho$  la masse volumique de l'air ;

-  $c_p$  la chaleur massique de l'air à pression constante. Cela représente la quantité d'énergie à apporter à l'air par échange thermique à une unité de masse de cet air pour que sa température augmente de 1° ;

-  $\gamma$  est la constante psychrométrique qui permet de relier la différence de température sèche et humide à la pression de vapeur ;

-  $Da$  est le déficit de pression de vapeur. C'est l'écart entre la pression de vapeur saturante et la pression de vapeur de l'air. C'est-à-dire l'écart de teneur en vapeur d'eau de l'air entre le maximum (saturation) et ce qu'il y a effectivement.

La température de la feuille est la donnée qui nous intéresse, nous allons donc exprimer l'équation  $R_n = H + LE$  en introduisant la température de la feuille sous la forme  $\delta T = T_f - T_a$   
 Nous obtenons pour la feuille mouillée :

$$\delta T = \frac{R_s + R_l - n \rho c_p g_b Da - n \varepsilon \sigma T_a^4}{(n \rho c_p g_b + n \frac{\rho c_p}{\gamma} g_b P' + 4 n \varepsilon \sigma T_a^3)} \quad (\text{équation 1.5})$$

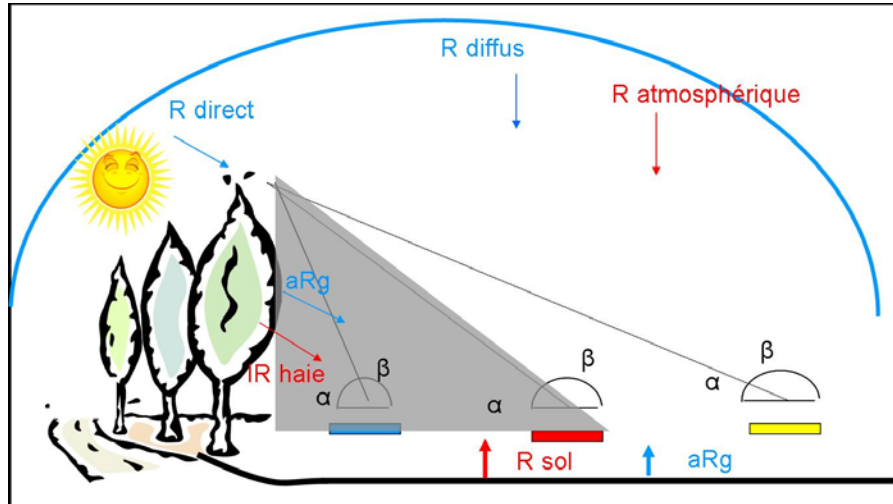
Et pour la feuille sèche juste avant le dépôt de rosée et sans transpiration.

$$\delta T = \frac{R_s + R_l - n \varepsilon \sigma T_a^4}{4 n \varepsilon \sigma T_a^3 + n \rho c_p g_b} \quad (\text{équation 1.6})$$

Nous précisons le détail du calcul à la fin du §8 de cet article.

### 3. Modification due à la haie du bilan radiatif d'une feuille horizontale

Plusieurs altérations du bilan radiatif sont dues à la haie (**figure 2**).



**Figure 2 :** Schéma du bilan radiatif à proximité d'une haie. En rouge les rayonnements de grandes longueurs d'onde, en bleu les rayonnements de courtes longueurs d'onde

Pour les feuilles situées à l'ombre, dans les courtes longueurs d'onde, le rayonnement direct sera nul (le rayonnement global sera égal au rayonnement diffus  $R_d$ ). Les feuilles recevront sur la face supérieure, le rayonnement diffus ainsi que la part de ce rayonnement réfléchi par la haie, en proportion des angles solides  $\alpha$  et  $\beta$ . Sur la face inférieure elles recevront la partie réfléchi du rayonnement diffus ( $aR_d$ ) suivant l'albédo du sol, variant avec le LAI de la parcelle. Les feuilles au soleil recevront sur la face supérieure le rayonnement global ainsi que la partie de ce rayonnement réfléchi par la haie, en proportion des angles solides  $\alpha$  et  $\beta$ .

L'**albédo** est le rapport de l'énergie solaire réfléchi par une surface sur l'énergie solaire incidente.

Le **LAI**, leaf area index, est le rapport de la surface foliaire sur une unité de surface de sol).

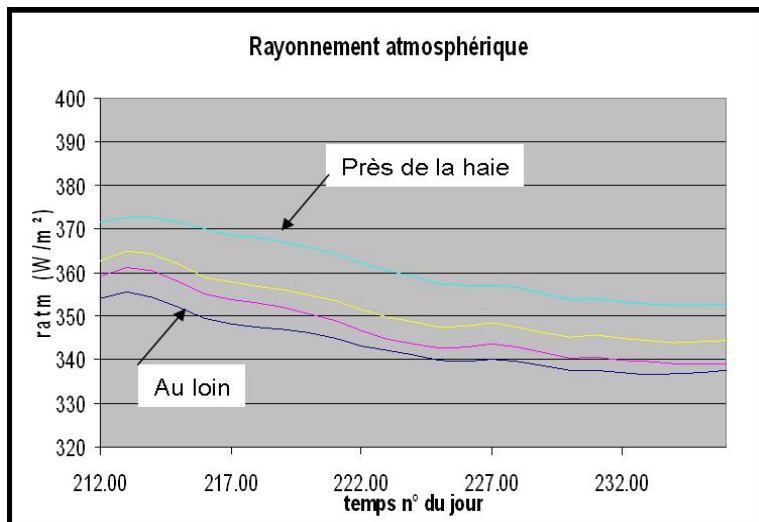
Dans les grandes longueurs d'onde, les feuilles recevront sur la face supérieure le rayonnement atmosphérique ainsi que le rayonnement de la haie, en proportion des angles solides  $\alpha$  et  $\beta$ . Sur la face inférieure elles recevront le rayonnement du sol ou dans le cas de notre expérimentation le rayonnement de la culture située dessous.

Dans l'équation (1.5) tous les rayonnements arrivant vers la feuille sont affectés par la présence de la haie. Qu'en est-il des autres termes du bilan ?  $G_b$ , le coefficient d'échange est dépendant de la vitesse du vent qui est lui même affecté par la présence de la haie. Ce coefficient d'échange intervient à la fois dans le flux de chaleur sensible  $H$  et dans le flux de chaleur latente  $LE$ .

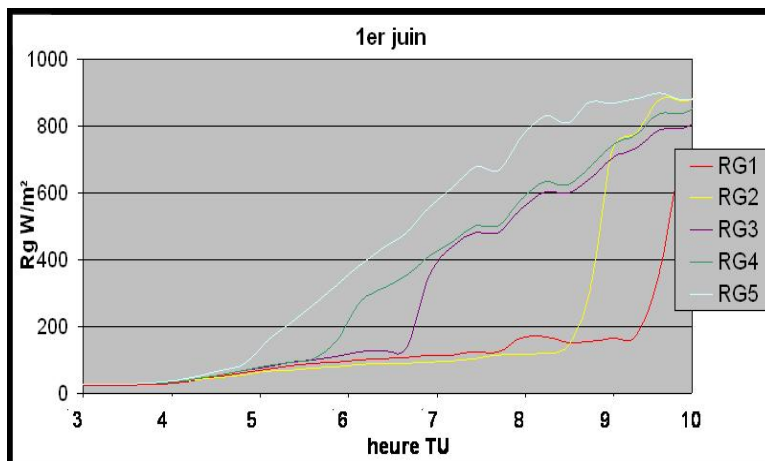
## 4. Illustration des modifications dues à la haie

### 4.1 Modification du rayonnement atmosphérique reçu

Le rayonnement thermique de la haie va remplacer suivant l'angle solide  $\alpha$  de la **figure 2** une partie du rayonnement atmosphérique. L'écart de ces rayonnements est d'autant plus grand que l'écart entre la température de surface de la haie et la température radiative apparente de la voûte céleste est grand. Avec un ciel clair et sec le rayonnement atmosphérique  $R_a$  vaut environ  $170 \text{ W/m}^2$  ce qui donne une température apparente de l'atmosphère de  $-39^\circ\text{C}$ . Avec un ciel clair et humide  $R_a$  vaut  $310 \text{ W/m}^2$ , ce qui donne une température apparente de l'atmosphère de  $-1^\circ\text{C}$ . Le rayonnement de grande longueur d'onde mesuré près de la haie est donc plus grand que celui mesuré au loin (**figure 3**). Ici la variation est de l'ordre de 5 %. La haie va protéger le couvert qui lui est proche et diminuer le déficit radiatif inducteur d'un éventuel dépôt de rosée. En revanche, du fait de l'ombre matinale le bilan radiatif de la feuille restera faible, ce qui favorisera la persistance de la rosée.



**Figure 3 :** rayonnement de grande longueur d'onde mesuré à distance croissante d'une haie



**Figure 4 :** Rayonnement global mesuré à des éloignements différents d'une haie  $Rg_5$  au loin (100 m) et  $Rg_1$  près de la haie (12 m)

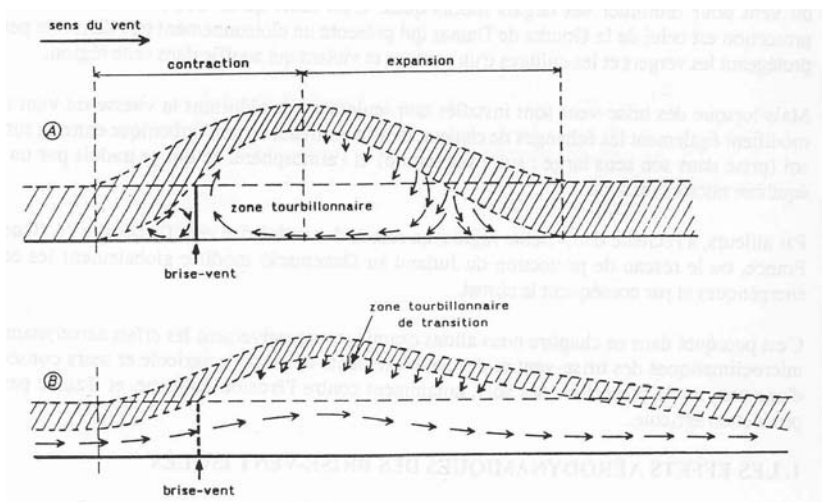
### 4.2 Modification du rayonnement solaire reçu

On peut illustrer les différences de rayonnement solaire reçu, entre une feuille située à l'ombre et une feuille située au soleil, au travers de mesure de rayonnement global dans ces situations (**figure 4**). Dès le lever du jour, le capteur situé loin de la haie reçoit le rayonnement solaire qui s'accroît

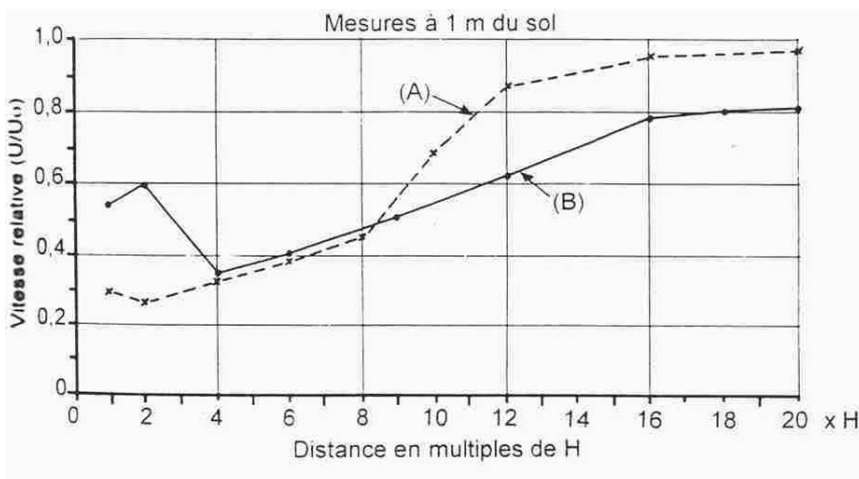
rapidement au cours de la matinée. Pendant ce temps le capteur Rg1 qui est à l'ombre ne reçoit que le rayonnement diffus d'une partie de la voûte céleste plus la réflexion par la haie de ce rayonnement qui représente ce jour là 25 % du rayonnement global. Cette différence va conserver la rosée près de la haie. Le rayonnement  $aR_g$  reçu par la face inférieure de la feuille sera lui aussi affecté par la haie. Au niveau du capteur RG1 situé près de la haie le rayonnement reçu par la face inférieure de la feuille sera  $aR_d$  soit près 25 % de  $aR_g$  ce jour là.

#### 4.3 Modification des vitesses de vent à proximité d'une haie

La vitesse du vent reçu par un couvert va être perturbée par la haie qui se comporte comme un brise vent dont l'effet dépendra de ses caractéristiques et de la direction du vent. Si elle est dense et quasi imperméable elle engendrera des tourbillons un peu en amont et essentiellement en aval (**figure 5A**). Poreuse le vent la traverse et sa vitesse sera moins réduite que dans le cas précédent, cette réduction se sentira sur une plus grande distance (**figure 5B**). L'effet sur le vent va aussi dépendre de sa structure et de sa hauteur (**figure 6**). Plus la haie sera élevée plus loin se ressentira son effet. En atténuant la vitesse du vent la haie va limiter les échanges de chaleur entre la feuille et l'air ce qui favorisera le dépôt de rosée et limitera l'évaporation, ainsi la rosée restera plus longtemps sur la feuille.



**Figure 5 :**  
Effet d'un brise vent imperméable en haut (A) et d'un brise vent poreux en bas (B)  
(D'après Guyot)



**Figure 6 :**  
Evolution de la vitesse relative de vent en fonction de la distance à un brise vent constitué de 3 bandes superposées (A) bande imperméable en bas, (B) bande imperméable en haut  
(D'après Guyot)

## 5. Calcul de l'ombre portée d'une haie

### 5.1 Coordonnées du soleil en fonction de la date et de l'heure

Pour les calculs astronomiques nous avons utilisé une feuille de calcul sous Excel (R. Bonhomme, M. Chartier et J. Dauzat, 2002) qu'il suffit de renseigner du lieu de l'expérimentation en latitude et en longitude puis de l'année et ensuite de déclarer le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich ou de choisir de rester en temps universel ce qui est plus confortable lorsque l'expérimentation passe de l'heure d'hiver à l'heure d'été. A partir de là la feuille de calcul nous fournit des indications comme l'heure du lever du soleil son heure de coucher son azimut et sa hauteur en fonction de la date et de l'heure (**figure 7**).

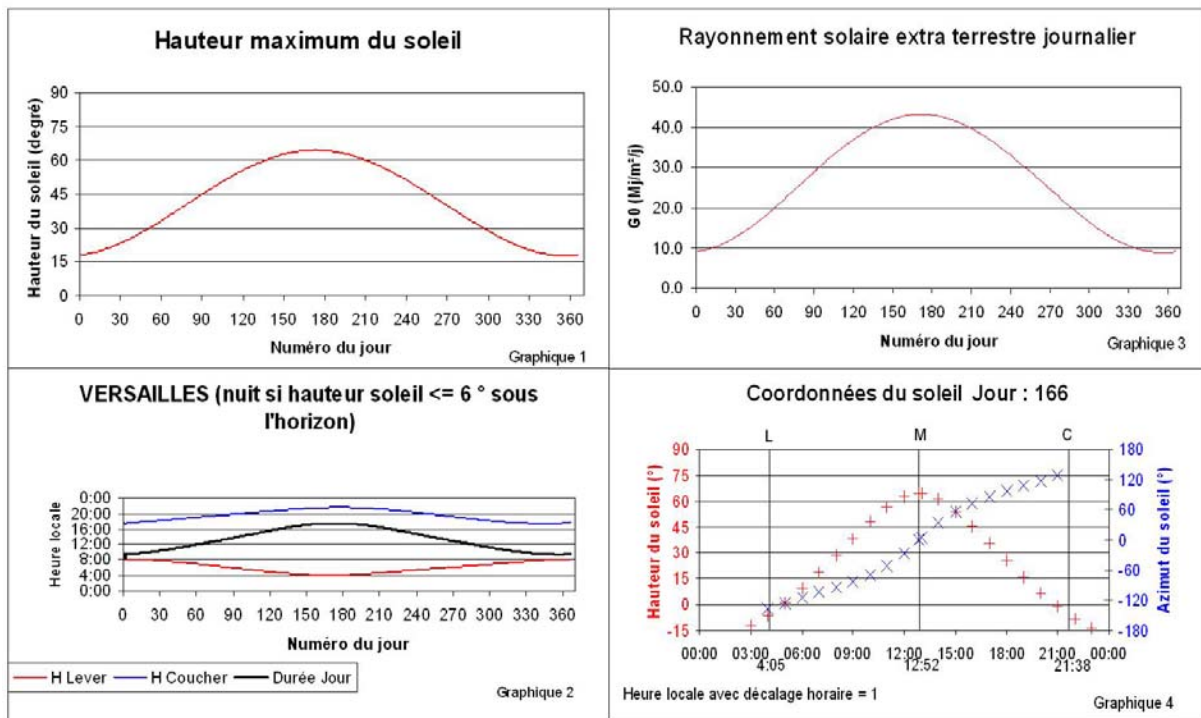
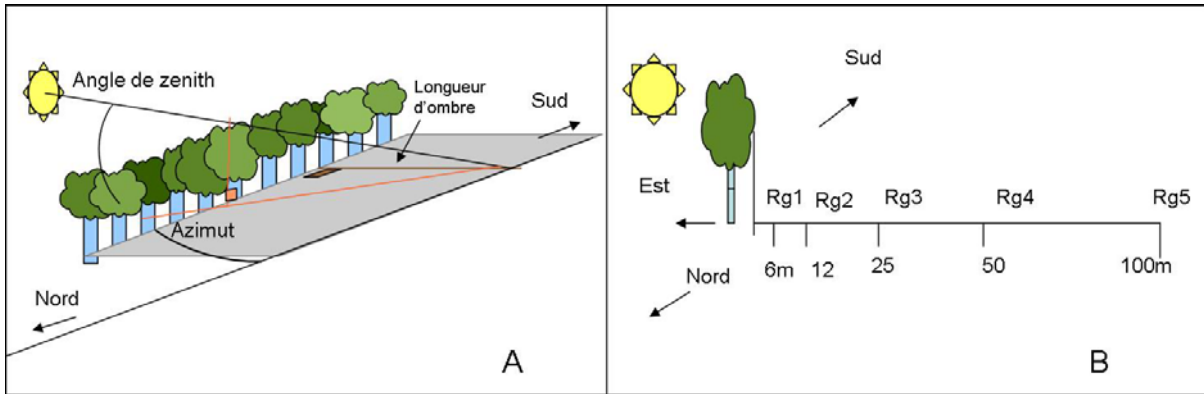


Figure 7 : Eléments astronomiques fournis par la feuille de calcul (Versailles, 2008)

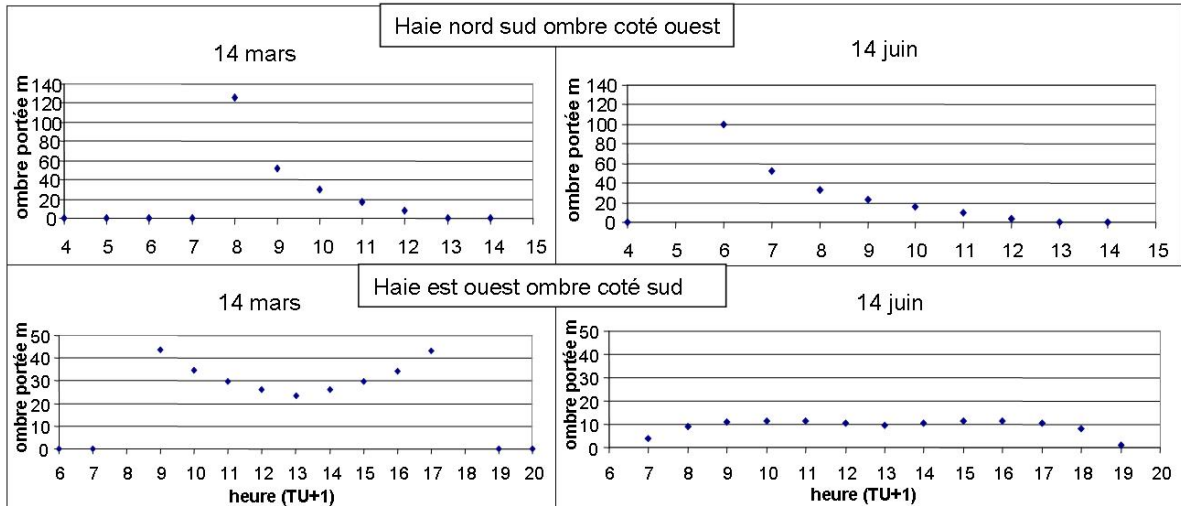
## 5.2 Calcul de l'ombre portée perpendiculairement à la haie

Il nous reste à effectuer le calcul de l'ombre portée en fonction de l'azimut et de la hauteur du soleil et bien sûr de la hauteur et de l'orientation de la haie. La haie était composée de plusieurs rangées d'arbres d'une hauteur de 18 m. Nous la considérerons comme un plan homogène. Un petit calcul trigonométrique (**figure 8**) permet de trouver la longueur de l'ombre normale à la haie puis à l'échelle horaire pour chaque jour.



**Figure 8 :** *Eléments du calcul de la longueur de l'ombre portée normale à la haie et disposition des capteurs*

Exemple de résultats de calculs de longueur d'ombre portée (**figure 9**).



**Figure 9 :** *Longueur de l'ombre portée en fonction du jour et de l'orientation de la haie. Orientation Nord – Sud pour les courbes du haut et Est – Ouest (72°) pour les courbes du bas*

Nous avons choisi d'utiliser la haie Nord-Sud car son ombre présentait plus d'amplitude au cours de la journée ce qui est favorable à une grande variation de la durée d'humectation des feuilles en fonction de la distance à la haie. A noter pour la courbe Est - Ouest le 14 juin le soleil se lève très tôt vers 4 heures et il éclaire la face nord de la haie portant l'ombre sur la face sud. La face nord commence à être à l'ombre vers 7 heures et cette ombre est courte car le soleil est très haut.



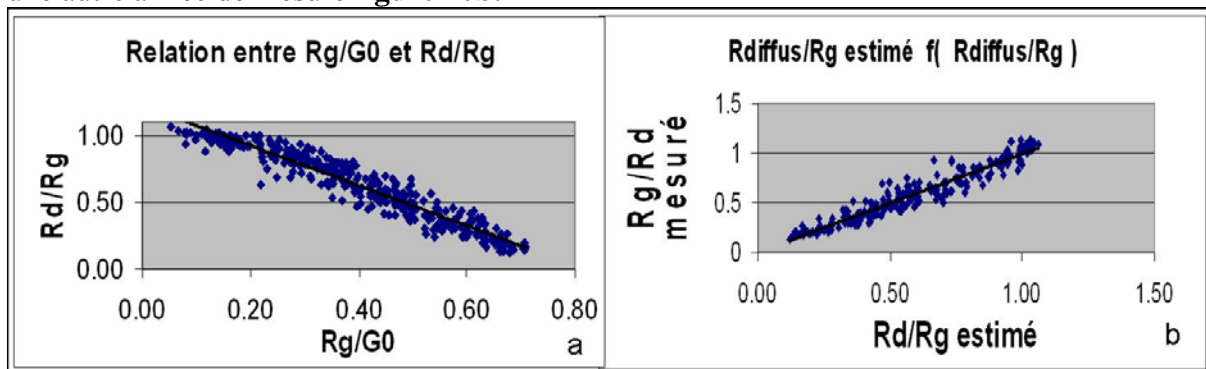
## 6. Formation de rosée et estimation de sa durée

Le dépôt de rosée se produit chaque fois que la température de la feuille  $T_f$  ( $T_f = T_a + \delta T$ ) est inférieure à la température du point de rosée de l'air, donc que  $P(T_f) < P(T_r)$  : c'est-à-dire que la pression de vapeur à la température de la feuille est inférieure à la pression de vapeur de l'air au voisinage de cette feuille.

Le début de formation de rosée sur une feuille sèche peut être déterminé à partir de  $T_f$  calculé avec l'équation (1.4). Ensuite, le taux de dépôt ou d'évaporation d'eau libre est donné par l'équation du flux de chaleur latente (équation 1.3).

Pour ces calculs, un parc météo (hors zone d'influence de la haie) fournit des paramètres d'entrée notamment le rayonnement global, la vitesse et la direction du vent à la hauteur de 2 m ainsi que la température et l'humidité relative de l'air à hauteur de végétation.

Le rayonnement diffus a été estimé à partir de relation (**figure 10a**) entre les rapports  $R_g/g_0$  et  $R_d/R_g$  avec  $R_g$  rayonnement global,  $g_0$  le rayonnement solaire extra terrestre (fourni par la feuille de calcul **figure 7**),  $R_d$  le rayonnement diffus. Le rapport  $R_g/g_0$  dépend de la transparence de l'air. De même si le ciel est couvert  $R_g/g_0$  sera faible.  $R_g$  le rayonnement global est égal à la somme du rayonnement direct et diffus. Par temps couvert il n'y a pas de rayonnement direct et la totalité du rayonnement est diffus  $R_g = R_d$ . Cette estimation a été réalisée à partir de valeurs  $R_g$  et  $R_d$  mesurées durant les années précédentes et validées pour une autre année de mesure **figure 10b**.



**Figures 10 a et b :** Estimation du rayonnement diffus.

L'albédo de la haie et du couvert lorsqu'il est couvrant est fixé à 0,2.

Le rayonnement de grande longueur d'onde ascendant (du sol et du couvert) ainsi que celui de la haie est estimé à partir de la température de l'air  $T_a$  (K) suivant l'équation  $R_{\uparrow} = \varepsilon \sigma T_a^4$  avec  $\varepsilon$  fixé à 0,95 et on estime  $T = T_a$  pour la haie et le couvert. Le rayonnement atmosphérique est estimé à partir de la température de l'air et de la pression de vapeur selon la formule de

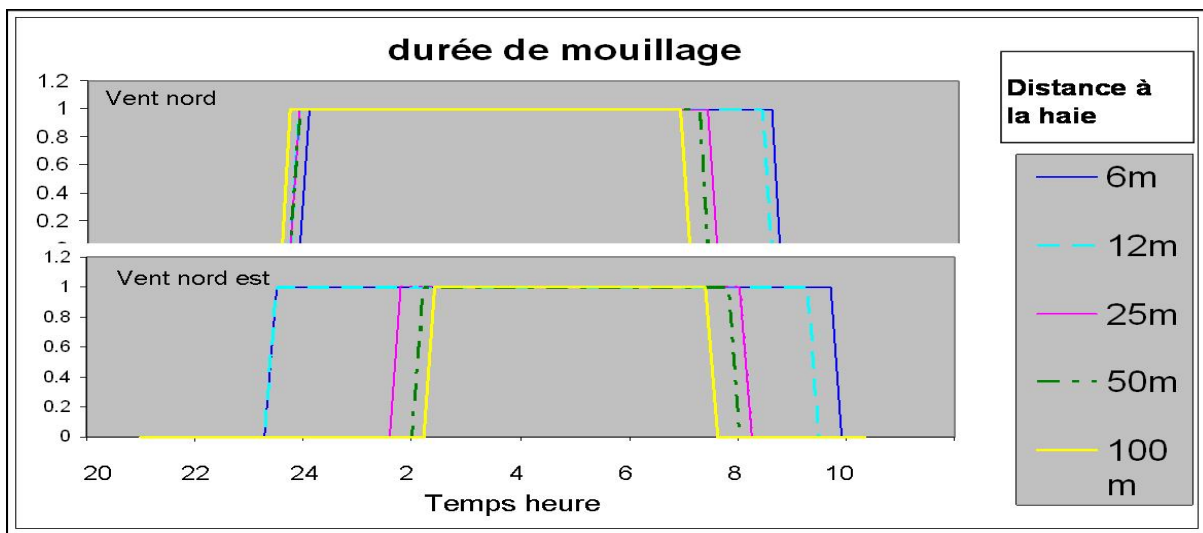
Brutsaert (1975)  $R_a = 1.24 \left( \frac{P(T_r)}{T_a} \right)^{1/7} \cdot \sigma T_a^4$ . Cette formule est valable dans le cas de ciel clair.

Le coefficient d'échange a été estimé à partir de la relation  $g_b = k \text{Nu}/d$ . Nu, le nombre de Nusselt, est un nombre adimensionnel qui caractérise les transferts thermiques. Il s'exprime en fonction du nombre de Reynolds qui est lui-même dépendant de la vitesse du vent.

D'après la mesure de la vitesse du vent à 2 m on estimera en suivant une loi logarithmique le vent à hauteur de végétation ; ensuite, d'après les résultats de Guyot (**figure 6 courbe B**) on estimera le vent à différentes distances de la haie suivant la direction du vent.

## 7. Exemple de résultats

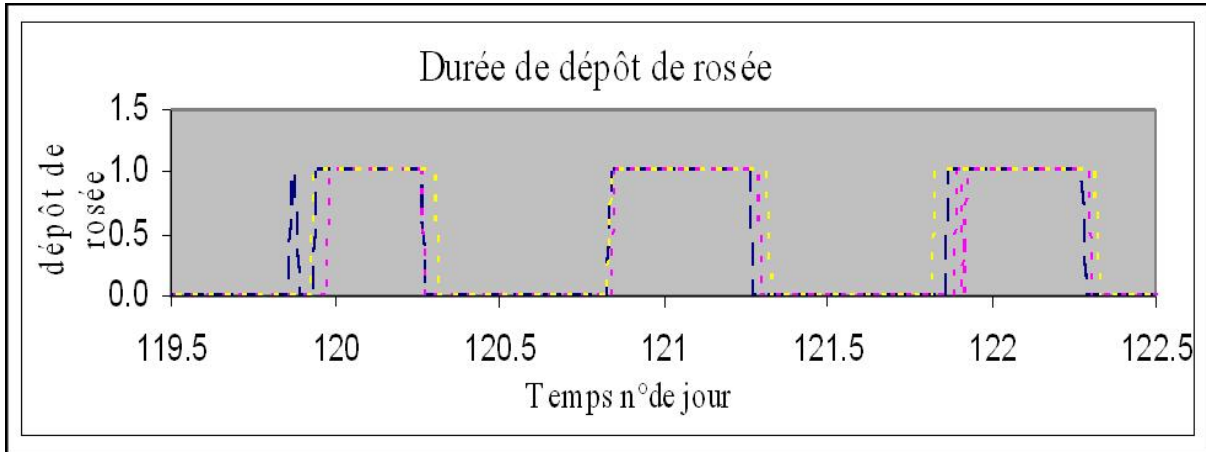
La **figure 11** montre les résultats de capteurs placés à différentes distances de la haie (**figure 8 b**) avec en haut un vent de nord (1m/s) parallèle à la haie cas n°1 et en bas un vent de nord est (1,5 m/s) cas n°2. Dans le cas n°1, la rosée apparaît pratiquement à la même heure pour tous les capteurs. On note un léger décalage pour le capteur proche de la haie. Le vent étant parallèle à la haie il est le même pour tous les capteurs, ici c'est l'effet radiatif de la haie qui a une légère influence. La disparition de la rosée se fait à des moments différents. L'écart de temps est plus grand pour la disparition que pour l'apparition et il est fonction de l'ombre portée. Il faut attendre que le soleil passe de l'autre côté de la haie pour que la rosée disparaisse totalement sur le capteur proche de la haie. En ce qui concerne le cas n°2, la haie offre une protection au vent pour les capteurs qui lui sont proches. Ici la diminution de la vitesse du vent permet un refroidissement supérieur en évitant l'homogénéisation des températures de l'air et du capteur. Cet effet a été prépondérant sur l'effet radiatif de la haie qui tend à limiter ce refroidissement. Au matin, l'effet d'ombrage de la haie reste majeur. Ces deux exemples sont choisis pour être explicatifs : les capteurs de durée de mouillage ont des réponses variables dont l'exploitation est souvent difficile.



**Figure 11** : Dépôt de rosée au cours de 2 nuits pour des capteurs placés à différentes distances d'une haie orientée Nord – Sud.

En ordonnée on note la présence de rosée par 1 et par 0 son absence.

Nous n'avons pas pu appliquer le modèle sur le même jeu de données. L'expérimentation d'alors avait un autre but que la validation d'un modèle : il nous a manqué des données de température d'air au niveau du feuillage. Nous avons donc utilisé le modèle sur un autre jeu de données provenant d'une expérimentation sur le riz hélas sans proximité de haie (**figure 12**). Dans ce cas le modèle décrit bien les événements de dépôt de rosée.



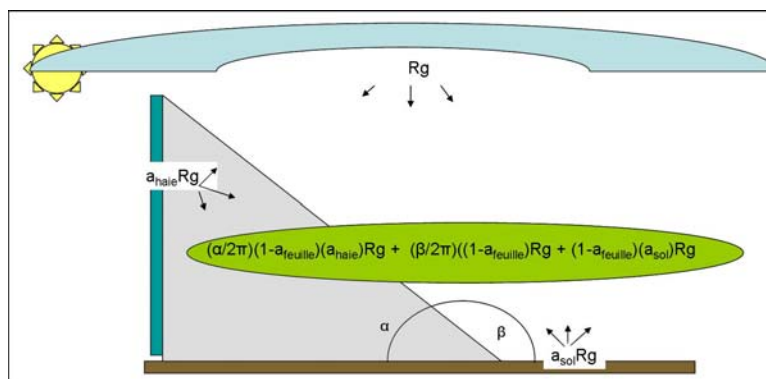
**Figure 12** : Dépôt de rosée en rouge mesuré par des capteurs en bleu estimé et en jaune par observation oculaire. L'échelle de dépôt de rosée marche en tout ou rien : on note 1 quand il y a de la rosée et 0 quand c'est sec.

## 8. Détail du calcul du bilan d'énergie

Nous partons de l'équation du bilan d'énergie  $R_n = H + L + G$ . Nous éliminons le flux de chaleur par conduction car nous l'estimons nul dans le cas d'une feuille. Nous écrivons les différents termes du bilan :

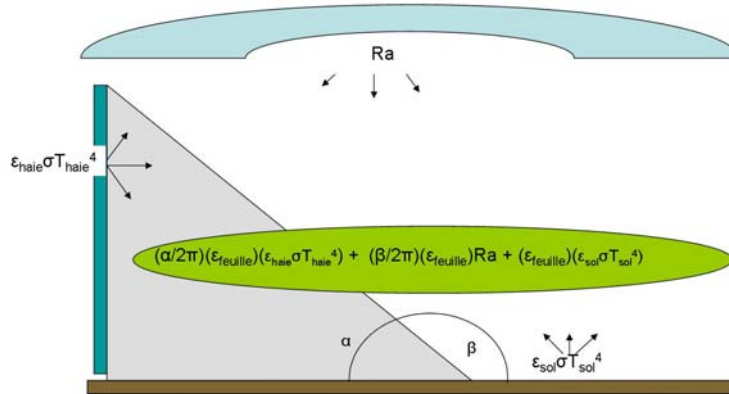
$R_n = R_s + R_l - n \varepsilon \sigma T_f^4$  (1.2)  $R_s$  et  $R_l$  représentent pour la feuille, le bilan, des courtes et des grandes longueurs d'onde.

$$R_s = \underbrace{\frac{\beta}{2\pi} (1 - a_{\text{feuille}}) R_g}_{\text{ciel}} + \underbrace{\frac{\alpha}{2\pi} (1 - a_{\text{feuille}}) a_{\text{haie}} R_g}_{\text{haie}} + \underbrace{(1 - a_{\text{feuille}}) a_{\text{sol}} R_g}_{\text{sol}}$$



**Figure 13** : Bilan des rayonnements  $R_s$  de courtes longueurs d'onde vu de la feuille

$$Rl = \underbrace{\frac{\beta}{2\pi} (\varepsilon_{\text{feuille}}) Ra}_{\text{ciel}} + \underbrace{\frac{\alpha}{2\pi} (\varepsilon_{\text{feuille}}) (\varepsilon_{\text{haie}} \sigma T_{\text{haie}}^4)}_{\text{haie}} + \underbrace{(\varepsilon_{\text{feuille}}) (\varepsilon_{\text{sol}} \sigma T_{\text{sol}}^4)}_{\text{sol}}$$



**Figure 14 :** Bilan des rayonnements  $Rl$  de grandes longueurs d'onde vu de la feuille. Les réflexions du rayonnement atmosphérique par la haie et le sol sont négligées

$$H = n \rho . c_p . g_b (T_f - T_a) \quad (1.3)$$

$$LE = n(\rho . c_p / \gamma) . g_b . (P(T_f) - P(t_r)) \quad (1.4) \text{ pour une feuille mouillée.}$$

Nous allons réécrire les équations pour mettre en évidence la température de la feuille sous la forme  $T_f = \delta T + T_a$  et c'est  $\delta T$  qui apparaîtra.

Pour l'équation du bilan radiatif (1.1)

$$Rn = R_s + R_l - n \varepsilon \sigma T_f^4 . \quad \text{Avec } T_f = \delta T + T_a \text{ ou encore } T_f = T_a (1 + \delta T / T_a) \text{ nous}$$

$$\text{obtenons : } Rn = R_s + R_l - n \varepsilon \sigma T_a^4 \left( 1 + 4 \frac{\delta T}{T_a} \right)$$

$$\text{ou encore } Rn = R_s + R_l - n \varepsilon \sigma T_a^4 - 4 n \varepsilon \sigma T_a^3 \delta T$$

Pour l'équation du flux de chaleur sensible (1.2)

$$H = n \rho . c_p . g_b (T_f - T_a) \text{ devient } H = n \sigma . c_p . g_b (\delta T) .$$

Dans l'équation (1.3) du flux de chaleur latente

$$LE = n(\rho . c_p / \gamma) . g_b . (P(T_f) - P(t_r))$$

Nous allons ajouter et retrancher  $P(T_a)$  et nous obtenons

$$LE = n(\sigma . c_p / \gamma) . g_b . (P(T_f) - P(T_a) - P(T_r) + P(T_a)) .$$

En introduisant la dérivée  $P'$  de la fonction de pression de vapeur  $P$  et le déficit de pression de vapeur de l'air  $Da = (P(T_a) - P(T_r))$  nous obtenons

$$LE = n(\sigma . c_p / \gamma) . g_b . (P' \delta T + Da) .$$

Nous pouvons reformuler l'équation  $R_n = H + LE$  en sortant  $\delta T$  :

L'équation devient :  $\delta T(n\rho c_p g_b + n \frac{\rho c_p}{\gamma} g_b P' + 4n\varepsilon\sigma T_a^3) = R_s + R_l - n\rho c_p g_b Da - n\varepsilon\sigma T^4$  soit

$$\delta T = \frac{R_s + R_l - n\rho c_p g_b Da - n\varepsilon\sigma T^4}{(n\rho c_p g_b + n \frac{\rho c_p}{\gamma} g_b P' + 4n\varepsilon\sigma T_a^3)} \quad (1.5).$$

Pour une feuille mouillée.

Pour une feuille sèche, en l'absence de transpiration juste avant le dépôt de rosée l'équation (1.4) se transforme en :

$$\delta T = \frac{R_s + R_l - n\varepsilon\sigma T_a^4}{4n\varepsilon\sigma T_a^3 + n\rho c_p g_b} \quad (1.6).$$

## 9. Bibliographie

- Bonhomme R, Chartier M, Dauzat J. (2002) Course du soleil.xls - feuille excel peut être envoyée sur demande auprès de [umr\\_egc@grignon.inra.fr](mailto:umr_egc@grignon.inra.fr).
- Brutsaert W. (1975) A derivable formula for long wave radiation from clear skies, *Water Resour.Res.*, 11,742-744.
- Dauzat J. (2003) Fiche de calcul des coordonnées solaire format xls in Mesure et modélisation du microclimat radiatif, CD rom Ecole Chercheurs 2002 éditeurs Inra Ecofor
- Guyot G. (1997) Climatologie de l'environnement. Ed Masson pp
- Huber L. and Gillespie T. J. (1992) Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology *Annu.Rev.Phytopathol.*1992.30:553-77
- Lhomme J.-P. Jimenez, F. (1992) Estimating dew duration on banana and plantain leaves from standard meteorological observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 62 (1992)263-274
- Pedro M.J. and Gillespie T.J, (1982b). Estimating dew duration .I.Utilising standard weather station data *Agric. Meteorol.* 25: 297-310
- Tuzet A. (2008) Notions sur les transferts radiatifs. In Pratiques et outils de mesure des rayonnements naturels dans les domaines visible, solaire et infrarouge, *le Cahier des techniques de l'Inra*, pp.7-34

