

# Recherche d'une équivalence entre l'abaissement de la température lié à l'altitude et la diminution du rayonnement global reçu en fonction de la pente et (ou) de l'orientation

Jean Duchesne, juin 2026

## Liste des symboles et grandeurs utilisés dans le texte

$R_g$  : rayonnement global ; il s'exprime en  $Wm^{-2}$  dans le système international ;

$B$  : rayonnement direct ; id ;

$D$  : rayonnement diffus ; id ;

$R_C$  : rayonnement de la voûte céleste ; id ;

$R_S$  : rayonnement de la surface végétale ; id ;

$R_n$  : rayonnement net ; id ;

$\Phi_c$  : flux de chaleur convectif ; id ;

$ET$  : évapotranspiration réelle ; il s'exprime en  $kg\ s^{-1}$  ;

$\lambda$  : chaleur latente de vaporisation de l'eau ; elle s'exprime en  $Jkg^{-1}$  ;

$G$  : flux de chaleur dans le sol ; il s'exprime en  $Wm^{-2}$  ;

$\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann ; elle vaut  $5,67 \cdot 10^{-8}$  dans le système international ;

$\varepsilon$  : émissivité des corps naturels ; c'est un nombre sans dimension compris entre 0 et 1 ;

$F_{s-c}$  : facteur de forme de la surface végétale vers le ciel ; c'est un nombre sans dimension compris entre 0 et 1 ;

$a$  : albédo de la surface végétale ; c'est un nombre sans dimension compris entre 0 et 1 ;

$T_s$  : température de surface de la végétation ; elle s'exprime couramment en  $^{\circ}C$ , mais en  $K$  dans les lois thermodynamiques (comme la loi de Stefan) ;

$T_c$  : température de la voûte céleste ; id ;

$T_a$  : température de l'air ; id ;

$T_0$  : température de surface du sol ; id ;

$e_a$  : pression de vapeur de l'eau dans l'air ; elle s'exprime en  $Pa$  ;

$e_s$  : pression de vapeur saturante de l'eau dans l'air à la même température ; id ;

$\Delta$  : pente de la courbe de pression de vapeur saturante de l'eau ; elle vaut  $61,86\ kPaK^{-1}$  à  $20^{\circ}C$  ;

$\rho_a$  : masse volumique de l'air ; elle vaut  $1,2\ kgm^{-3}$  ;

$C_p$  : chaleur spécifique de l'air à pression constante ; elle vaut  $1005\ Jkg^{-1}K^{-1}$  ;

$\gamma$  : constante psychrométrique ; elle vaut  $66823\ PaK^{-1}$  ;

$r_a$  : résistance aérodynamique ; elle vaut environ  $70\ sm^{-1}$  à  $20^{\circ}C$  ;

$r_s$  : résistance de surface ; elle dépend de la vitesse du vent et vaut  $104\ sm^{-1}$  pour un vent de  $2ms^{-1}$  ;

$HR$  : humidité relative de l'air ; c'est un nombre sans dimension compris entre 0 et 1 ;

$\alpha$  : coefficient de convection entre la surface végétale et l'air ; il s'exprime en  $Wm^{-2}K^{-1}$  ;

$\alpha_0$  : coefficient de convection entre la surface du sol et l'air ; il s'exprime en  $Wm^{-2}K^{-1}$  ;

$I_F$  : indice foliaire ; c'est un nombre sans dimension positif.



proche de la température de l'air. Il s'ensuit que l'échange radiatif dans l'infrarouge entre la surface végétale et le ciel, soit l'expression  $R_S - R_C = \varepsilon \sigma F_{s-c} (T_S^4 - T_C^4)$  est beaucoup plus important par ciel clair que par temps couvert.

$\sigma$  est la constante de Stephan ; elle vaut  $5,67 \cdot 10^{-8}$  dans le système international. Pour la plupart des couverts végétaux, l'émissivité  $\varepsilon$  vaut environ 0,96.  $F_{s-c}$  est ce qu'on appelle le facteur de forme ; il indique la proportion de rayonnement émis par une surface et intercepté par l'autre. Dans notre cas, tout le rayonnement infrarouge émis par la surface du végétal est intercepté par le ciel et donc, en agronomie, ce paramètre vaut 1 dans la plupart des cas.

Le terme  $\Phi_c$  désigne le flux de chaleur sensible échangé par convection entre la surface du végétal et la surface du sol d'une part et l'air d'autre part. Il comporte donc deux composantes, l'une pour le couvert végétal, l'autre pour la surface du sol, et dépend largement de la vitesse du vent. Dans des conditions moyennes, la valeur  $\alpha$  du coefficient de convection au niveau de la surface végétale de l'équation (2) se situe autour de  $12 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ . La valeur du coefficient de convection  $\alpha_0$  au niveau du sol est toujours plus faible. On prendra la valeur de  $6 \text{ W/m}^2/\text{degré}$ .

$I_F$  (LAI en anglais) désigne l'indice foliaire, c'est-à-dire le rapport entre la surface développée de toutes les feuilles et la surface du sol. C'est un nombre sans dimension qui se mesure en  $\text{m}^2$  de surface foliaire par  $\text{m}^2$  de surface de sol. Pour un couvert viticole bien développé et en bonne santé, sa valeur est d'environ 4.

$G$  est le flux de chaleur dans le sol. Il faut, pour le calculer, connaître le gradient de température  $\frac{dT_0}{dz}$  tout près de la surface du sol et appliquer la loi de Fourier.

Le terme  $\lambda ET$  désigne la chaleur nécessaire pour évaporer l'eau de la surface végétale. Elle est donc égale au produit de la chaleur latente de vaporisation de l'eau  $\lambda$  qui vaut environ<sup>1</sup>  $586 \text{ kcal/kg}$ , soit  $2450 \text{ kJ/kg}$  et  $ET$  qui mesure l'évapotranspiration potentielle qu'on mesure en  $\text{kg s}^{-1}$  pour rester dans le système international.

$$(1 - a)R_g = \varepsilon \sigma (T_S^4 - T_C^4) + 2\alpha I_F (T_s - T_a) + \alpha_0 (T_0 - T_a) + G + \lambda ET \quad (2)$$

### **La question qui se pose à nous**

Il s'agit de trouver une sorte d'équivalence entre une *variation de rayonnement global*  $\Delta R_g$ , générée par exemple par un changement de pente ou d'orientation, et une *variation de la température moyenne de l'air*  $\Delta T_a$ , consécutive par exemple à un changement d'altitude. Or ce n'est pas une chose facile puisque dans les équations (1) et (2) ci-dessus tous les termes sont plus ou moins interdépendants.

---

<sup>1</sup> En toute rigueur, la chaleur latente de vaporisation de l'eau varie avec la température. La valeur retenue ici correspond à une température de 20°C.

## La solution que je propose

La seule issue possible selon moi est d'avoir un regard purement physique ou mieux purement mathématique et regarder comment varierait le rayonnement global  $R_g$  en fonction de la température de l'air  $T_a$  dans l'hypothèse où tous les autres paramètres seraient fixés et donc invariables.

L'opération mathématique qui s'impose alors est la dérivation et on voit immédiatement que dans le second membre de l'équation (2) seuls le deuxième terme  $2\alpha I_F(T_a - T_s)$  et le troisième  $\alpha_0(T_0 - T_a)$  sont des fonctions explicites de la température de l'air  $T_a$ .

Mais il faut bien voir que le cinquième terme  $\lambda ET$  est, lui, une fonction implicite de  $T_a$  puisque l'évapotranspiration dépend du déficit de pression de vapeur d'eau ( $e_s - e_a$ ) et, donc, de la température de l'air. On le voit bien dans l'expression (3) qui est la forme la plus générale de la formule de Penman-Monteith<sup>2</sup> :

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (3)$$

dans laquelle  $e_a$  est la pression partielle de vapeur d'eau et  $e_s$  la pression de vapeur saturante à la même température,  $\Delta$  est la pente de la courbe de pression de vapeur saturante,  $\rho_a$  la masse volumique de l'air,  $c_p$  la chaleur spécifique de l'air,  $\gamma$  la constante psychrométrique,  $r_s$  et  $r_a$  les résistances de surface et aérodynamique.

D'après la relation (2), on voit que la dérivée de  $R_g$  par rapport à  $T_a$  prend la forme suivante :

$$\frac{(1-a)dR_g}{dT_a} = -2\alpha I_F - \alpha_0 + \frac{d(\lambda ET)}{dT_a} \quad (4)$$

Pour pouvoir calculer  $\frac{d(\lambda ET)}{dT_a}$  il faut expliciter les pressions de vapeur  $e_a$  et  $e_s$  en fonction de  $T_a$ .

En utilisant l'humidité relative  $HR$  on peut écrire

$$e_s - e_a = (1 - HR)e_s$$

ce qui transforme la relation (3) en

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(1 - HR)e_s}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (5)$$

On sait que la grandeur  $e_s$  varie de façon quasi exponentielle avec la température  $T_a$  (Figure2) mais il n'existe malheureusement pas de loi simple qui relie  $e_s$  à  $T_a$ .

On est contraint d'avoir recours à l'une des très nombreuses lois empiriques mises au point pour diverses applications.

---

<sup>2</sup> <https://www.fao.org/4/X0490E/x0490e05.htm#TopOfPage>

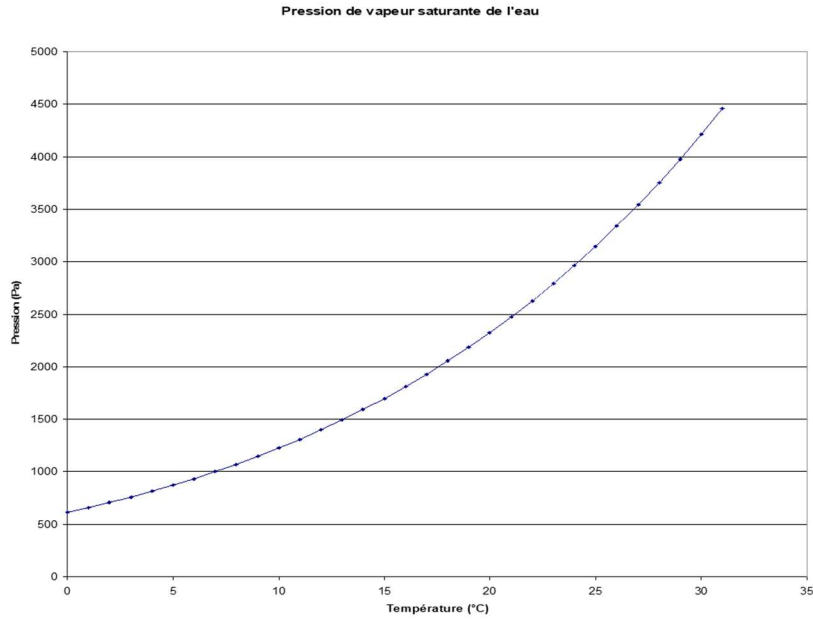


Figure 2 : pression de vapeur saturante de l'eau en fonction de la température

J'ai retenu la formule ISO 13188<sup>3</sup> :

$$e_s = 610.5 \exp\left(\frac{17.269T_a}{237.3+T_a}\right) \quad (6)$$

dans laquelle  $T_a$  est exprimé en °C.

En remplaçant  $e_s$  dans (5) par son expression dans (6), on obtient :

$$\frac{d(\lambda ET)}{dT_a} = \frac{\rho_a C_P}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \frac{1}{r_a} \frac{d}{dT_a} \left[ (1 - HR) 610.5 \exp\left(\frac{17.269T_a}{237.3 + T_a}\right) \right]$$

La relation (4) prend ainsi la forme :

$$\frac{(1-a)dR_g}{dT_a} = -2\alpha I_F - \alpha_0 + \frac{\rho_a C_P}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \frac{1}{r_a} \frac{d\left[(1-HR) 610.5 \exp\left(\frac{17.269 T_a}{237.3+T_a}\right)\right]}{dT_a} \quad (5)$$

soit :

$$\frac{dR_g}{dT_a} = \frac{1}{(1-a)} \left\{ -2\alpha I_F - \alpha_0 + \frac{\rho_a C_P}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \frac{1}{r_a} \frac{d\left[(1-HR) 610.5 \exp\left(\frac{17.269 T_a}{237.3+T_a}\right)\right]}{dT_a} \right\} \quad (6)$$

<sup>3</sup> [https://fr.wikipedia.org/wiki/Pression\\_de\\_vapeur\\_saturante\\_de\\_l%27eau](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pression_de_vapeur_saturante_de_l%27eau)

Bien qu'un peu laborieux, le calcul de la dérivée  $\frac{d[(1-HR)610.5 \exp(\frac{17.269T_a}{237.3+T_a})]}{dT_a}$  ne pose pas de difficulté particulière. On obtient finalement pour la dérivée  $\frac{dR_g}{dT_a}$  la relation :

$$\frac{1}{(1-a)} \left\{ -2\alpha I_F - \alpha_0 + \frac{\rho_a C_P}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \frac{1}{r_a} (1 - HR) 610.5 e^{\left(\frac{17.269}{237.3+T_a}\right)} \frac{17.269(237.3)}{(237.3+T_a)^2} \right\} \quad (7)$$

Les paramètres  $\alpha$  et  $I_F$  ont des valeurs constantes. C'est rigoureusement vrai pour  $I_F$  qui a une valeur mesurable pour une culture donnée. Ici, on prendra 4 pour la vigne.

Pour  $\alpha$  on retiendra la valeur de 12 W/m<sup>2</sup>/degré. Il s'agit évidemment d'une valeur moyenne que nous retiendrons par commodité car son calcul en fonction de la vitesse du vent est d'une grande complexité. Pour l'albédo  $a$  on prendra la valeur de 0,2.

On voit dans ces conditions que la dérivée  $\frac{dR_g}{dT_a}$  n'est pas une constante mais qu'elle est fonction de la température de l'air  $T_a$ .

L'application de la relation (7) doit se faire avec beaucoup de précaution dans le choix des unités. Comme il s'agit d'une relation physique, il faut d'abord que le système d'unités soit cohérent ; c'est pourquoi j'utilise le système international. Il faut aussi que les grandeurs soient bien définies. Pour la température  $T_a$  il n'y a pas de difficulté puisqu'on travaille avec une différence de température  $\Delta T_a$ . Il s'ensuit qu'on peut travailler indifféremment en °C ou en K. Pour  $\Delta R_g$ , il faut rappeler que l'équation (1) établit le bilan énergétique instantané, de sorte que  $\Delta R_g$  est une puissance par unité de surface et doit donc être exprimé en W/m<sup>2</sup>. Or, ce qui nous intéresse est plutôt l'énergie solaire reçue par la surface végétale pendant une période donnée, par exemple de début juillet à fin septembre, grandeur qui s'exprime en J/m<sup>2</sup> ou en kJ/m<sup>2</sup>, voire en MJ/m<sup>2</sup>.

Avec les valeurs de  $a$ ,  $\alpha$ ,  $\alpha_0$  et  $I_F$  proposées ci-dessus, et en prenant pour  $r_s$  et  $r_a$  respectivement 70 et 100 s/m, on obtient :

$$\frac{dR_g}{dT_a} = -100 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1} \quad (8)$$

Pour appliquer ce résultat théorique, j'ai créé un fichier de calcul Excel intitulé « Influence de l'orientation et de la pente sur le rayonnement solaire reçu » dans lequel j'ai calculé l'énergie solaire reçue par la vigne au pas de temps horaire et pour chaque décade de début juillet à début octobre et des surfaces de pente et orientation différentes, les pentes étudiées étant 0 ; 2,5% ; 5% ; 10% ; 15% ; 20% et 50% et les orientations étant : sud ; sud-est ; est ; nord-est ; nord<sup>4</sup>. J'ai ajouté quatre feuilles Excel pour les quatre zones test de Charmettes, Chazelle, Galoches et Rochette.

<sup>4</sup> Le résultat est le même avec les orientations sud, sud-ouest, ouest, nord-ouest et nord respectivement.

## **Les résultats**

Dans chaque feuille de calcul du fichier Excel « Influence de l'orientation et de la pente sur le rayonnement solaire reçu », j'ai fait apparaître les résultats dans les cellules encadrées en haut et à droite (lignes 1 à 3 et colonnes N à W).

Pour une pente 2,5% par exemple, lorsque l'on passe de l'orientation sud à l'orientation sud-est le rayonnement global reçu varie de 2032 MJ.m<sup>-2</sup> à 2025 MJ.m<sup>-2</sup> soit une variation  $\Delta R_g$  de 7 MJ.m<sup>-2</sup>. Mais pour pouvoir appliquer la relation (8), il faut revenir à un  $\Delta R_g$  exprimé en  $Wm^{-2}$  ; autrement dit il faut diviser la variation de rayonnement obtenue sur toute la saison étudiée par la durée du rayonnement (la somme de la durée du jour sur la période étudiée) et par 3600. La variation correspondante de  $\Delta T_a$  est de 0,01°C, soit l'équivalent d'une variation d'altitude de 2 m si l'on retient comme gradient de la température moyenne de l'air 0,6°C/100m de dénivelée.

Le tableau 1 (ci-dessous) pourrait être généralisé à une pente différente de celles qui ont été retenues ici et à une orientation quelconque.

Rappelons le sens des résultats (en mètres) présentés au tableau (1) ci-dessous : c'est la variation d'altitude qu'il faudrait imposer au vignoble présentant cette pente et cette orientation pour qu'il reçoive en moyenne la même énergie solaire qu'un vignoble présentant la même pente mais qui serait orienté au sud.

## **Discussion**

Le résultat final donné par la relation (8) peut être influencé par les choix ou approximations que nous avons décidé de faire.

**Choix de la valeur de l'albédo.** On obtiendrait respectivement 94 et 107 au lieu de 100 si on retenait un albédo de 0,15 ou de 0,25 respectivement. Les variations d'altitude correspondantes sont données dans la feuille de calcul Excel « Synthèse » sur la ligne 20. On s'aperçoit que les résultats ne sont pas lourdement influencés par une erreur éventuelle sur l'albédo.

	Sud-est (ou sud-ouest)	Est (ou ouest)	Nord-est (ou nord-ouest)	Nord
2,5%	2	8	14	16
5%	5	16	27	32
10%	9	32	54	63
15%	14	47	80	94
20%	18	62	106	124
50%	41	129	230	283

*Tableau 1 : Variations d'altitude entraînant la même variation de température de l'air  $\Delta T_a$  (et la même variation du rayonnement global  $\Delta R_g$ ) que la combinaison orientation-pente correspondante.*

**Influence de l'humidité relative  $HR$ .** Nous avons dans ce calcul retenu une valeur constante de 40%. C'est peut-être un peu trop pour certaines dates et, surtout,  $HR$  varie beaucoup dans la journée par beau temps. Avec le même calcul mais une valeur respectivement de 20% et 40% pour  $HR$ , on obtient en (8) 98 et 103 au lieu de 100. L'influence d'une éventuelle erreur sur ce paramètre est donc faible, comme on peut le voir dans la feuille de calcul « Synthèse », ligne 25.

**Influence de la température de l'air  $T_a$ .** C'est le point qui peut sembler a priori le plus délicat. Mais on s'aperçoit qu'en prenant qu'en prenant 18°C, 15°C ou 12°C au lieu de 20°C, on obtient 101, 102 ou 103 au lieu de 100. Heureusement donc une erreur sur ce paramètre a une conséquence négligeable sur le résultat final.

**Influence des coefficients de convection  $\alpha$  et  $\alpha_0$ .** On voit dans la feuille « Synthèse » qu'une erreur sur la valeur de  $\alpha_0$  a peu d'influence sur le résultat final. Mais, comme la relation (7) le laissait prévoir, une erreur sur la valeur de  $\alpha$  a un effet plus sensible sur les résultats finaux. En adoptant pour  $\alpha$  une valeur de 8 ou de 12, on obtient respectivement 80 et 120 au lieu de 100. C'est donc le paramètre qu'il faut fixer avec le plus de soin.

## Annexe

### ***Présentation des variables et valeurs utilisées dans le fichier Excel « Influence de l'orientation et de la pente sur le rayonnement solaire reçu »***

La constante solaire ou irradiance solaire est l'énergie reçue par seconde et par  $m^2$  par une surface placée à la limite de l'atmosphère et perpendiculairement à la direction du soleil. Connue avec précision, elle varie légèrement en fonction de la distance de la Terre au Soleil ; elle est notée  $E_0$  et vaut en moyenne  $E_0=1361W/m^2$ .

La question qui se pose est de savoir comment passer de cette constante, mesurée avant l'entrée dans l'atmosphère, au rayonnement solaire reçu au sol.

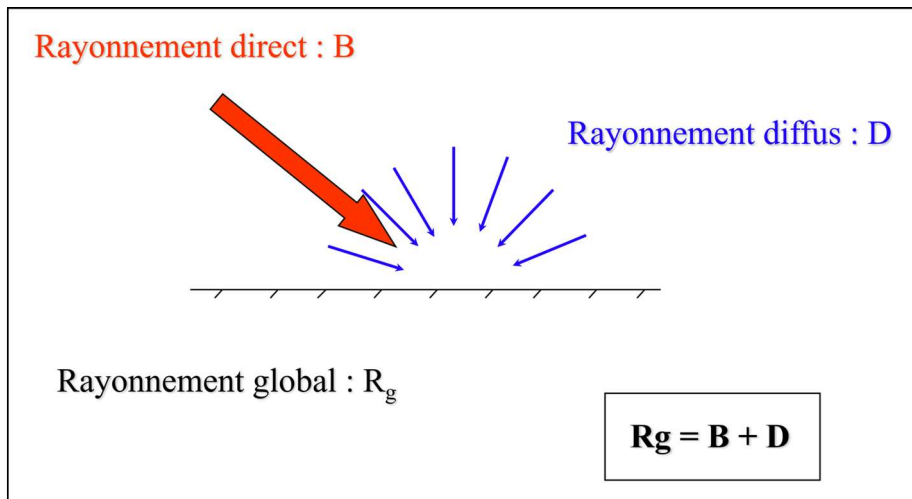


Figure A1 : les deux composantes du rayonnement global

Le rayonnement solaire global reçu par une surface au sol est la somme du rayonnement direct  $B$  qui vient en droite ligne du disque solaire et du rayonnement diffus  $D$  qui provient de toutes les directions du ciel. On fera l'hypothèse, proche de la réalité, que le rayonnement diffus est isotrope, c'est-à-dire qu'aucune direction n'est privilégiée.

#### **a) Calcul du rayonnement direct.**

Sur une surface au sol perpendiculaire à la direction du soleil, la valeur de l'irradiance  $I$  est plus faible que l'irradiance hors atmosphère  $E_0$  indiquée ci-dessus en raison de l'absorption et de la diffusion atmosphériques. Le modèle le plus utilisé donne pour  $I$  :

$$I = E_0 A e^{-Bm} \quad (A1)$$

équation dans laquelle  $m$  est la masse atmosphérique, avec  $m = \frac{1}{\sin h}$  où  $h$  est la hauteur angulaire du soleil sur l'horizon. On voit donc que la masse atmosphérique  $m$  vaut 1 lorsque le soleil est au zénith (ce qui ne se produit jamais sous nos latitudes) et qu'elle est de plus en plus

grande lorsque le soleil descend sur l'horizon.  $A$  et  $B$  sont deux constantes dont les valeurs sont données par le tableau (A1). La relation (A1) est vraie au niveau de la mer. Pour tenir compte de l'altitude  $z$ , Beckers and Beckers proposent la relation

$$m = \frac{e^{-\frac{z}{8200}}}{\sin h}$$

qui tient compte de la pression atmosphérique à l'altitude étudiée et de la hauteur du soleil sur l'horizon.

	Ciel très clair	Conditions normales	Zone industrielle
A	0,87	0,88	0,91
B	0,17	0,26	0,43

Tableau A1 : les valeurs  $A$  et  $B$  des constantes de la relation (A1)

Pour passer de l'irradiance  $I$  reçue par une surface perpendiculaire à la direction du soleil au rayonnement direct  $B$  reçu par une surface horizontale, il faut tenir compte de la hauteur du soleil sur l'horizon par la relation :

$$B = I \sin h \quad (A2)$$

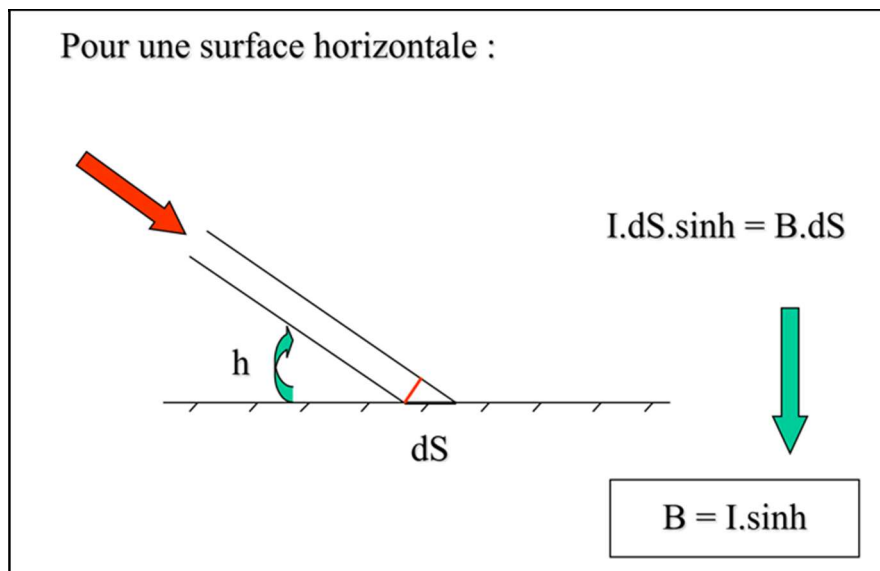


Figure A2 : rayonnement direct reçu par une surface horizontale en fonction de la hauteur du soleil sur l'horizon

Un raisonnement classique de trigonométrie sphérique permet d'exprimer  $\sin h$  de la relation (A2) en fonction de la latitude  $L$ , de la déclinaison solaire  $D$  et de l'angle horaire  $AH$  :

$$\sin h = \sin D \sin L + \cos D \cos L \cos AH \quad (A3)$$

La déclinaison du soleil est la hauteur du soleil sur le plan équatorial ; elle dépend uniquement de la date et elle est connue avec précision<sup>5</sup>.

Enfin, si la surface qui reçoit le rayonnement solaire n'est pas horizontale, mais inclinée d'un angle  $\theta$  par rapport à l'horizontale, il faut prendre en compte l'angle d'incidence  $i$  que fait la direction du soleil avec la normale à la surface :

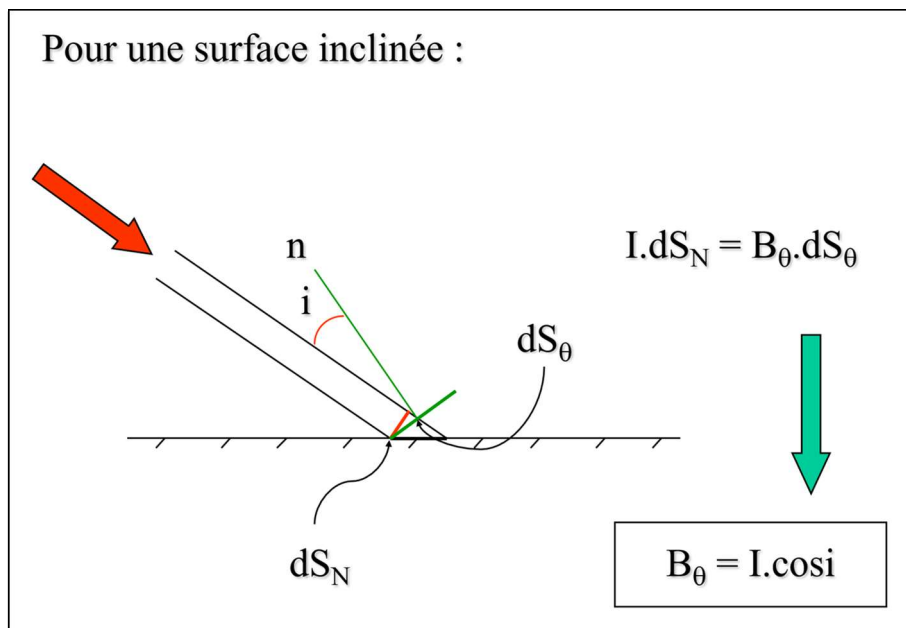


Figure A3 : rayonnement direct reçu par une surface inclinée d'un angle  $\theta$  sur l'horizontale

$$B_\theta = I \cos i \quad (A4)$$

Là encore, le calcul de  $\cos i$  fait intervenir un raisonnement de trigonométrie sphérique, et il aboutit à :

$$\cos i = \sin h \cos \theta + \cos h \sin \theta \cos(A_s - A_n) \quad (A5)$$

Dans cette relation,  $i$  est l'angle entre la normale à la surface étudiée et la direction du soleil (figure A3),  $h$  est la hauteur du soleil sur l'horizon calculée plus haut,  $\theta$  est l'angle d'inclinaison de la surface du sol par rapport à l'horizontale (la pente du terrain est donc  $\tan \theta$ ),  $A_s$  est l'azimut du soleil (il vaut  $180^\circ$  quand le soleil est au sud,  $90^\circ$  quand il est à l'est, etc.) et  $A_n$  est l'azimut de la normale à la surface (il vaut  $0^\circ$  quand la surface, et donc sa normale, est exposée au nord,  $90^\circ$  quand la surface est exposée à l'est,  $180^\circ$  quand elle est exposée au sud, etc.).

<sup>5</sup> Par exemple <https://www.cadrans-solaires.info/sequence5/co/2-5-declinaison-soleil.html>

## b) Calcul du rayonnement diffus.

Il n'y a pas de méthode déterministe et rigoureuse pour calculer le rayonnement diffus. Il existe par contre un grand nombre de méthodes empiriques pour l'évaluer. J'ai adopté ici une méthode réaliste qui consiste à déduire le rayonnement diffus du rayonnement global moyen mesuré à Roanne<sup>6</sup> et du rayonnement calculé par la méthode présentée ci-dessus. J'ai ainsi calculé le rapport  $\frac{D}{B}$  entre le rayonnement diffus et le rayonnement direct pour toutes les dates de début juillet à fin septembre.

Cette méthode fonctionne telle quelle pour une parcelle de pente nulle (feuille « p=0 » du dossier Excel). Pour les pentes non nulles, il faut tenir compte de la fraction de ciel occultée du fait de la pente du terrain. Rappelons que pour une parcelle horizontale, l'ensemble de la voûte céleste qui contribue au rayonnement diffus est un angle solide de  $2\pi sr$  ( $sr$  pour stéradians). On montre facilement que pour un terrain incliné d'un angle  $\theta$ , l'angle solide correspondant est de

$$\pi(1 + \cos \theta)sr \quad (A6)$$

Le calcul est effectué sur la ligne 34 du tableau Excel.

## **Utilisation des tableaux Excel.**

Le fichier Excel comporte 36 tableaux correspondant aux cas suivants :

- terrain horizontal (pente nulle) ;
- synthèse ;
- Charmettes ;
- Chazelle ;
- Galoches ;
- Rochette ;
- pente sud à 2,5% ;
- pente sud-est à 2,5% ;
- pente est à 2,5% ;
- pente nord-est à 2,5% ;
- pente nord à 2,5% ;
- pente sud à 5% ;
- pente sud-est à 5% ;
- pente est à 5% ;
- pente nord-est à 5% ;
- pente nord à 5% ;
- pente sud à 10% ;
- pente sud-est à 10% ;
- pente est à 10% ;

---

<sup>6</sup> <https://fr.weatherspark.com/s/50772/1/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-en-%C3%A9t%C3%A9-%C3%A0-Roanne-France#Figures-SolarEnergy>

- pente nord-est à 10% ;
- pente nord à 10% ;
- pente sud à 15% ;
- pente sud-est à 15% ;
- pente est à 15% ;
- pente nord-est à 15% ;
- pente nord à 15% ;
- pente sud à 20% ;
- pente sud-est à 20% ;
- pente est à 20% ;
- pente nord-est à 20% ;
- pente nord à 20% ;
- pente sud à 50% ;
- pente sud-est à 50% ;
- pente est à 50% ;
- pente nord-est à 50% ;
- pente nord à 50% ;

Toutes les notations utilisées dans les colonnes 1, 2 etc. du fichier Excel ci-joint correspondent aux définitions ou résultats présentés ci-dessus.

#### **Latitude (cellule B4 des tableaux Excel).**

La latitude de Renaison est de 46,05° Nord. J'ai arrondi à 46°. On pourrait la modifier pour tenir compte de l'éloignement des parcelles étudiées plus au nord ou plus au sud, mais les variations seraient très faibles. C'est facile à vérifier en entrant une autre valeur dans la cellule B4 de la feuille Excel utilisée. Par exemple pour Changy ( $L=46,14^\circ$ ) et pour une parcelle horizontale, on obtient un rayonnement global de 2091 MJ/m<sup>2</sup> au lieu de 2095 à Renaison ( $L=46^\circ$ ).

#### **Azimut de la normale à la surface $A_N$ .**

Il est indiqué dans la cellule I4. Rappelons qu'il vaut 0° pour une orientation nord, 90° pour une orientation est, 180° pour une orientation sud, etc. Il est converti en radians dans la cellule K4.

#### **Heures de lever et de coucher du soleil.**

Pour une feuille Excel donnée, par exemple dans le cas de la pente 2,5% sud-est, tous les calculs sont réitérés au pas de temps de 10 jours, à partir de la première décade de juillet (cellules D8 et E8) jusqu'à la dernière décade de septembre (cellules BB8 et BC8). C'est la période que nous avons retenue avec René Morlat pour l'Alsace. Sous le contrôle de Jean-Marc, on peut modifier ces dates sans difficulté.

Les calculs sont faits pour la date centrale de la décade : 5 juillet, 15 juillet, 25 juillet, etc.

L'heure de lever du soleil (ou son symétrique par rapport à midi solaire, l'heure de coucher) est obtenue à partir de l'équation (A3) dans laquelle on donne à  $h$  la valeur de zéro.

### **Déclinaison du soleil**

Pour toutes les cas où la pente n'est pas nulle, la déclinaison du soleil est indiquée cellule B pour le 5 juillet, J8 pour le 15 juillet, etc.

### **Calcul du rayonnement direct au pas de temps horaire**

Dans la feuille de calcul *2,5% sud* par exemple, il est effectué dans les cellules E10 à E30 en utilisant les résultats intermédiaires des colonnes B (hauteur du soleil sur l'horizon  $h$ ), C (azimut du soleil  $A_S$ ), D ( $\cos i$ ).

Le cumul journalier est donné dans la cellule D33 en MJ.m<sup>-2</sup>.

### **Calcul du rayonnement direct sur toute la période étudiée.**

Il est calculé dans la cellule E34, M34, etc. à partir de la formule A6.

### **Résultats.**

Pour la *pente 2,5% sud-est* par exemple, la différence de rayonnement global  $\Delta R_g$  entre l'orientation sud-est et l'orientation sud est calculée dans la cellule S2 et la différence de température correspondante  $\Delta T_a$  est calculée dans la cellule S3 selon la formule (8).

Dans la cellule V3, la variation d'altitude correspondante est calculée en supposant un gradient constant de 0,6°C/100m pour l'influence de l'altitude sur la température moyenne de l'air.