

Rayonnement net en Agronomie Concepts et mesure

Patrick GROSS¹

Résumé : *La mesure du rayonnement net est utilisée pour les recherches en bioclimatologie ou en écophysiologie végétale. Après avoir rappelé les concepts essentiels, nous décrirons des capteurs permettant cette mesure et nous ferons une analyse des erreurs de mesure inhérentes à ces capteurs. Enfin, nous donnerons les courbes de mesure pour des journées types.*

Mots clés : Rayonnement net, pyrromètre différentiel, pyranomètre, pyrgéomètre, incertitude de mesure.

Introduction

Le rayonnement net au dessus d'un couvert végétal est l'énergie radiative disponible pour les échanges convectifs ou conductifs : flux de chaleur sensible ou latente, stockage dans le système sol-plante. Sa mesure est importante car elle permet de valider le calcul de ces flux par d'autres méthodes.



© Inra/Patrick Gross

Mesures des flux de matière (CO₂ et H₂O) et d'énergie au dessus d'une forêt

¹ UMR 1137 Ecologie et écophysiologie forestières EEF Inra-Univ.Nancy I - F-54280 Champenoux

☎ 03 83 39 40 31 ✉ patrick.gross@nancy.inra.fr

1. Concepts

1.1 Définitions physique et agronomique

Le rayonnement net, R_n , dans un plan horizontal X au dessus d'un couvert végétal, est la somme algébrique de quatre composantes (**figure 1a**) :

- R_g , rayonnement global, rayonnement solaire direct + diffus ;
- αR_g , rayonnement réfléchi par l'ensemble sol-couvert végétal, (α = albédo, fraction du rayonnement solaire réfléchi) ;
- R_a , rayonnement atmosphérique ;
- R_t , rayonnement terrestre.

Par convention, on compte positivement les rayonnements descendants. On a donc

$$R_n = R_g (1 - \alpha) + R_a - R_t.$$

R_g et αR_g ont une bande spectrale de 0,28 à 4 μm , comprise à 99 % dans les courtes longueurs d'onde. R_a et R_t ont leur énergie dans une bande supérieure à 3 μm , quasiment exclusivement dans les grandes longueurs d'onde (infrarouge lointain ou IRL).

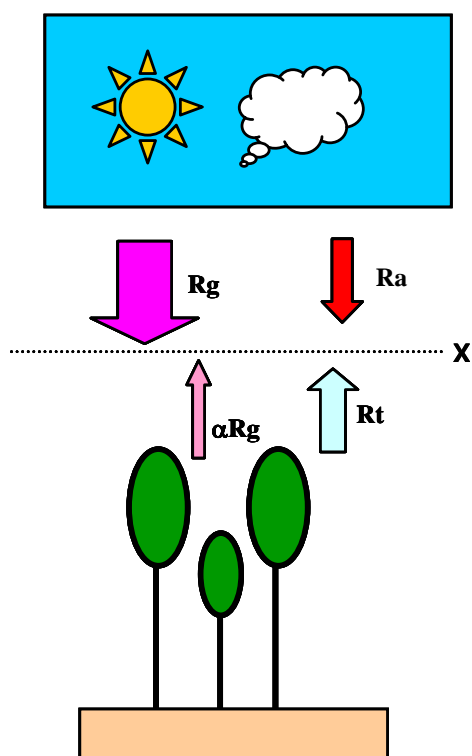


Figure 1a

Bilan radiatif dans le plan X
 $R_n = R_g (1 - \alpha) + R_a - R_t.$

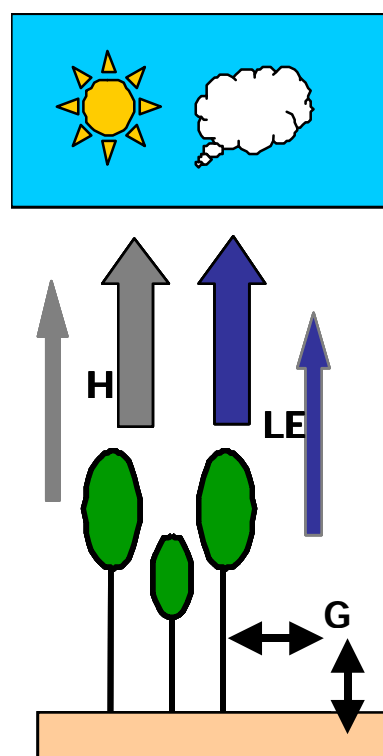


Figure 1b

Les flux convectifs et conductifs
 $R_n = H + LE + G$

Le rayonnement net est l'énergie radiative disponible pour les échanges convectifs et conductifs de l'ensemble sol + plante : flux de chaleur sensible H et latente LE, stockage G (**figure 1b**).

2. La mesure du rayonnement net

La bande spectrale du rayonnement à mesurer s'étale de 0,28 à 50 μm . Il est très difficile de réaliser un capteur ayant une réponse uniforme sur cette plage. Aussi, pour une plus grande précision, il est préférable de mesurer les composantes Rg et αRg (courtes longueurs d'onde) avec des pyranomètres et Ra comme Rt (grandes longueurs d'onde) avec des pyr géomètres. (**figure 2**)

2.1 Les capteurs nécessaires

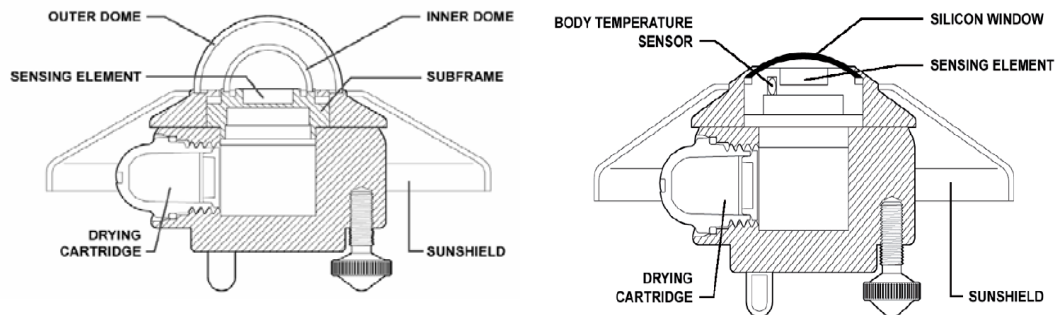


Figure 2 : exemple de pyranomètre à gauche et de pyr géomètre à droite -
(Documentation Kipp et Zonen)

Ces capteurs sont constitués d'une fenêtre optique laissant passer la bande spectrale souhaitée et d'un détecteur thermique à thermocouple (thermopile) délivrant une tension électrique proportionnelle au rayonnement incident sélectionné. L'élément sensible est un disque noirci sous lequel sont répartis uniformément des thermocouples, connectés en série, mesurant la différence de température entre cette surface noire qui absorbe le rayonnement à mesurer et le corps du capteur non affecté par ce rayonnement. Ce gradient thermique est faible : pour les pyranomètres quelques degrés avec un rayonnement incident de 1 000 W/m^2 .

Pour un pyranomètre, le rayonnement incident est déterminé à partir de :

$$E_{\text{inc}} = \frac{e}{s}$$

E_{inc} : rayonnement reçu par le pyranomètre en W m^{-2}
 e : tension délivrée par le pyranomètre en μV
 s : sensibilité du pyranomètre en $\mu\text{V W}^{-1} \text{m}^{-2}$

Le calcul du rayonnement reçu par un pyr géomètre est différent. En effet, la fenêtre optique en silicium est conçue pour laisser passer le rayonnement infrarouge. La surface sensible de

ce capteur peut être assimilée à un corps noir : à une température donnée, elle rayonne dans les grandes longueurs d'onde (IRL) et perd de l'énergie suivant la loi de Stefan-Boltzmann :

$$E = \sigma T^4$$

E rayonnement émis en Watts m⁻²
 σ constante de Stefan-Boltzmann = 5.67 x 10⁻⁸ W m⁻² K⁻⁴
T température de la surface sensible en K

La tension délivrée par le capteur sera alors proportionnelle à la différence entre le rayonnement reçu et celui émis par la surface sensible. Il est donc nécessaire d'ajouter à l'intérieur du pyrgéomètre, très proche de l'élément sensible, un capteur de température afin d'estimer le rayonnement IRL émis et de calculer le rayonnement incident grâce à :

$$E_{\text{inc}} = \frac{e}{s} + \sigma T^4$$

E_{inc} : rayonnement reçu par le pyrgéomètre en W m⁻²
e : tension délivrée par le pyrgéomètre en μV
s : sensibilité du pyrgéomètre en $\mu\text{V W}^{-1} \text{m}^{-2}$
 σ : constante de Stefan-Boltzmann
t : température de la surface sensible en K

La mesure de la température du capteur est donc indispensable pour calculer le rayonnement de grande longueur Ra ou Rt. Si on ne s'intéresse qu'au bilan net, c'est-à-dire à la différence entre Ra et Rt, celle-ci est superflue puisque les deux termes en σT^4 s'annulent, en supposant que les surfaces sensibles des capteurs pour Ra et Rt sont à la même température.

2.2 Les sources d'erreur

La température ambiante affecte la réponse du capteur, l'intensité et la direction du rayonnement ont également une influence sur la linéarité de la mesure. Les constructeurs indiquent une incertitude journalière qui intègre ces sources d'erreur.

Les appareils haut de gamme (par exemple CGR4 et CMP21 de Kipp et Zonen) sont caractérisés en fonction de la température : une courbe d'étalonnage individuelle indique l'influence de celle-ci dans une large plage d'utilisation et permet de diminuer l'incertitude de mesure. Des courbes de correction standard sont également délivrées avec ces capteurs pour quantifier l'erreur de linéarité en fonction de l'angle d'incidence et de l'intensité du rayonnement.

De plus, il existe les erreurs d'offset (décalage en français) de type A qui affectent les pyranomètres, celles de type B qui concernent également les pyrgéomètres et l'offset de chauffage de dôme (window heating offset) qui touchent uniquement ces derniers. Nous allons expliciter ces erreurs.

Par ciel clair, la température apparente de la voûte céleste est négative (échelle Celsius). Ceci induit un refroidissement du dôme, créant ainsi un léger flux thermique d'IRL de l'élément sensible vers le ciel. On observe particulièrement ce phénomène pendant les nuits par ciel dégagé : la surface sensible est plus froide que le corps du capteur et la thermopile délivre un signal légèrement négatif. C'est l'erreur *d'offset de type A*. Lorsque le pyranomètre est utilisé dans une enceinte avec éclairage artificiel, le réchauffement du dôme provoque l'effet inverse (offset positif). Une ventilation appropriée du dôme et du corps du pyranomètre réduit cette erreur. Les constructeurs proposent cet accessoire pour certains modèles.

Une variation de la température du corps du pyranomètre ou du pyrgeomètre induit une modification du gradient thermique entre les soudures froides (corps du capteur) et chaudes (surface sensible) de la thermopile. Ce changement cause l'erreur *d'offset de type B*. Cette erreur est quantifiée pour une variation de température de 5°C/h. Un élément de compensation interne intégré dans certains modèles minimise cette tension de décalage.

Le rayonnement solaire, de courte longueur d'onde, chauffe le dôme (fenêtre en silicium) du pyrgeomètre destiné à ne mesurer que les grandes longueurs d'onde. La différence de température ainsi créée entre le dôme et la thermopile induit un transfert de chaleur vers l'élément sensible qui vient s'ajouter au rayonnement IRL à mesurer et qui cause l'erreur nommée *window heating offset* par les anglo-saxons, surestimant le rayonnement infrarouge incident réel. Elle est donnée par les constructeurs pour un rayonnement global incident de 1 000 W/m². La compensation de cette erreur par des mesures de température avec des capteurs miniatures placés dans le dôme est délicate. Certains fabricants ont minimisé cette erreur en réduisant le gradient de température entre dôme et corps du capteur en favorisant le couplage thermique entre ces deux éléments.

2.3 Le choix et l'installation des capteurs

Le **tableau 1**, ci-dessous, issu d'une plaquette commerciale Kipp et Zonen, présente des modèles de pyrromètres différentiels, plus communément appelés bilanmètres, intégrant dans un même boîtier tous les capteurs nécessaires à la mesure du rayonnement net.

SPECIFICATIONS					
Measurement	CNR 1		CNR 2		NR LITE
	SW	LW	Net SW	Net LW	Net Total
Signal outputs	2	2	1	1	1
Temperature output	-	1	-	-	-
Response time (95%)	< 18 s	< 18 s	< 10 s	< 10 s	< 60 s
Offset type A	< 15 W/m ²	-	< 15 W/m ²	-	-
Offset type B	< 4 W/m ²	< 4 W/m ²	< 5 W/m ²	-	-
Window heating offset	-	< 25 W/m ²	-	< 25 W/m ²	-
Field of view	180°	150°	180°	150°	180°
Directional error	< 25 W/m ²	-	< 25 W/m ²	-	< 30 W/m ²
Temperature dependence of sensitivity (-10 °C to +40 °C)	< 4 %	< 4 %	< 5 %	< 5 %	-
Daily uncertainty	< 10 %	-	< 10 %	-	-
Expected output range under atmospheric conditions	0 to +50 mV	-5 to +5 mV	0 to +50 mV	-5 to +5 mV	-25 to +25 mV
Heater	12 VDC, 6 W		-		-
Operating temperature	-40 to +80 °C		-40 to +80 °C		-30 to +70 °C
Weight, including rod, without cable	2500 g		360 g		490 g
Cable length	10, 25, 50 m		10, 25, 50 m (with connector)		15 m

CNR SERIES NET RADIOMETER RANGE					
<p>NR LITE</p>	<p>CNR 2</p>	<p>CNR 1</p>			
<p>CNR 1</p>					
Dimensions in mm					

Kipp & Zonen B.V. reserves the right to alter specifications of the equipment described in this documentation without prior notice

Tableau 1 : Différents modèles de bilanmètres KIPP et ZONEN

Le modèle le plus simple, *NRLITE*, donne uniquement l'information R_{net} total, le constructeur ne s'engage pas sur une incertitude journalière chiffrée.

Le *CNR2* permet la mesure séparée des rayonnements nets dans les spectres solaire (SW) et de grande longueur d'onde (LW), l'incertitude journalière maximum est donnée.

Enfin le *CNR1* est l'appareil le plus complet, avec la mesure séparée des quatre composantes, comme décrit précédemment. On constate que même cet appareil a une incertitude journalière maximum qui approche 10 %. Les personnes qui veulent « boucler le bilan d'énergie » ne doivent pas oublier le niveau élevé de cette incertitude

Un autre fabricant néerlandais, Hukseflux, propose un matériel de performances voisines.

Les expérimentateurs exigeants (et fortunés) pourront réaliser des mesures de rayonnement net plus précises en assemblant eux-mêmes les pyranomètres et pyrgéomètres haut de gamme. Ceci nécessite un support adapté très robuste pour supporter le poids élevé d'un tel équipement (**photos 2 et 3**).

Nous venons en effet de lister les sources d'erreurs dues aux instruments eux-mêmes, il faut également respecter des règles d'installation afin de ne pas dégrader davantage la précision des mesures. Si la contrainte horizon dégagé est assez aisée à respecter pour les capteurs regardant le ciel en choisissant une orientation sud, l'absence d'artefact due au support est plus difficile à maîtriser. En effet, les capteurs face au sol doivent être suffisamment hauts au dessus du couvert végétal afin de voir une surface représentative : 1 à 2 m. pour une prairie, plus pour des ensembles moins homogènes comme les forêts. Le support du capteur doit être rigide et rester stable dans le temps afin de garantir l'horizontalité des appareils qui est vérifiée lors de l'installation et ensuite périodiquement. La structure verticale du support doit aussi avoir la dimension apparente la plus faible possible par rapport à la végétation, vue du capteur. Ces deux contraintes sont difficiles à concilier car plus on éloigne le capteur, plus la flexion du support horizontal est grande.



Photos 2 et 3 © Inra/Patrick Gross : Support pour capteurs de rayonnement

2.4 Exemple de mesures réalisées sous différentes conditions atmosphériques (figures : 3, 4 et 5)

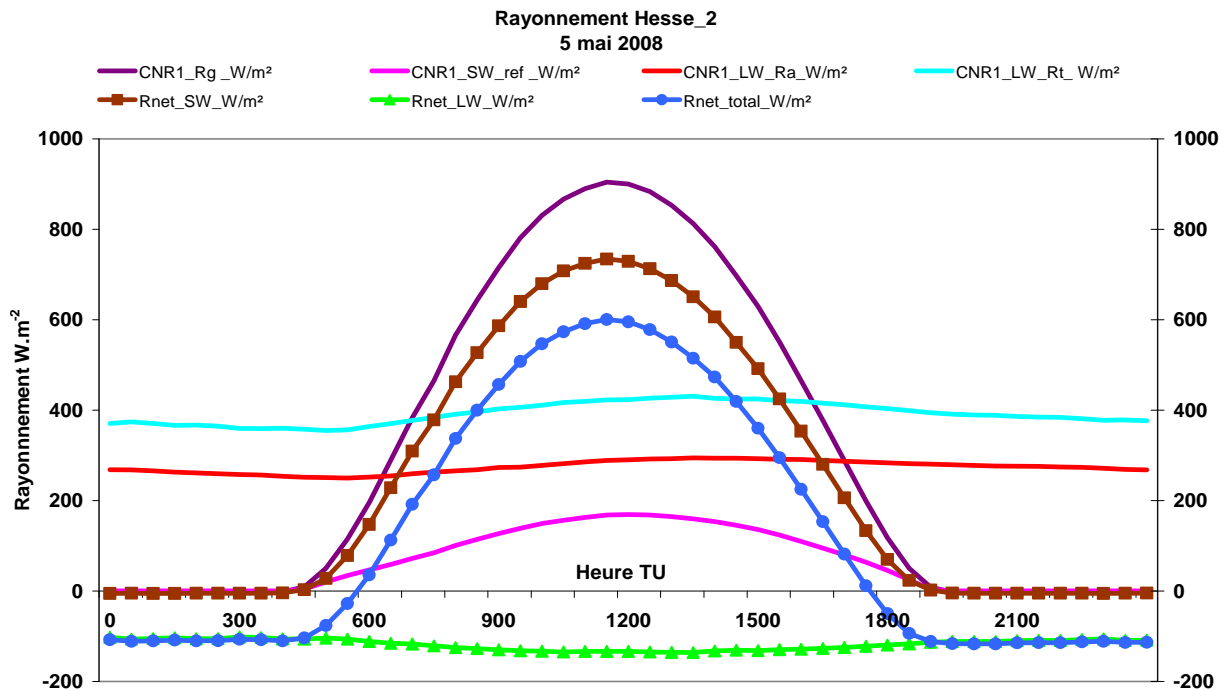


Figure 3 : Variation des différentes composantes du rayonnement net pendant une journée avec ciel dégagé et faible humidité, même en période nocturne.

Le rayonnement global (courbe violette) varie entre 0 et 900 $W m^{-2}$. La courbe rose (rayonnement solaire réfléchi) correspond à un albédo de $\approx 0,16$. Le bilan radiatif dans les courtes longueurs d'onde est représenté par la courbe avec carrés bruns. Le rayonnement terrestre (courbe bleue) est toujours supérieur au rayonnement atmosphérique (courbe rouge) : la différence pour les grandes longueurs d'onde est négative (courbe avec triangles verts) et s'accroît pendant la journée lorsque la température de l'ensemble végétation-sol s'élève plus que celle de la voûte céleste.

Le bilan net total (courbe avec ronds bleus) est positif pendant la période de 6 h à 18 h, lorsque R_g a un niveau suffisant.

Cette cinétique journalière idéale est assez peu fréquente dans notre région. Les journées avec un ciel clair sont souvent accompagnées de fin de nuit avec une humidité relative forte (**figure 4**) occasionnant la formation de brouillards dans l'air et de condensations sur les pyrromètres. Ceci affecte particulièrement le capteur pointant vers le ciel : au lieu de « voir » un ciel froid, ce dernier mesure, pour tout ou partie, le rayonnement des gouttelettes d'eau, à la température de l'air. Le rayonnement net de grande longueur d'onde est ainsi proche de zéro.

Dans ce cas, il est difficile de distinguer entre la condensation sur le capteur et la brume présente dans l'air. Une option chauffage existe sur certains bilanmètres : CNR1 Kipp et Zonen par exemple. Ce chauffage n'est possible que si l'énergie électrique nécessaire est disponible, 6 W h minimum. C'est rarement le cas pour les acquisitions autonomes avec batteries. Idéalement, ce chauffage ne devrait être activé que pendant la période nocturne : d'une heure avant le coucher du soleil à une heure après le lever. Ceci minimise les erreurs d'offset supplémentaires induites par ce chauffage sur le capteur pyranomètre en période diurne.

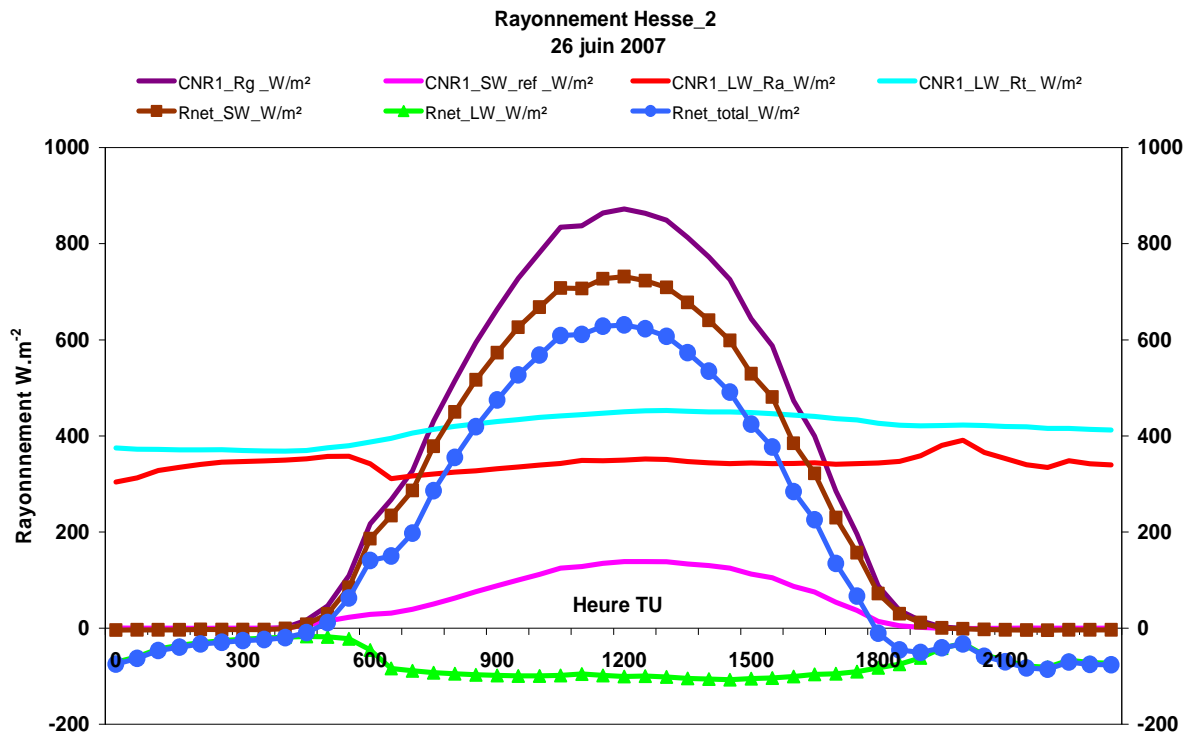


Figure 4 : Effets de l'humidité relative élevée en fin de nuit :

- la condensation sur le capteur et le brouillard provoquent la remontée du rayonnement atmosphérique (courbe rouge), le rayonnement net est proche de zéro ;
- le petit pic observé en soirée, entre 19h et 21h, est dû à un passage nuageux : l'humidité relative mesurée alors ne pouvant pas faire suspecter une formation de brume ou de rosée.

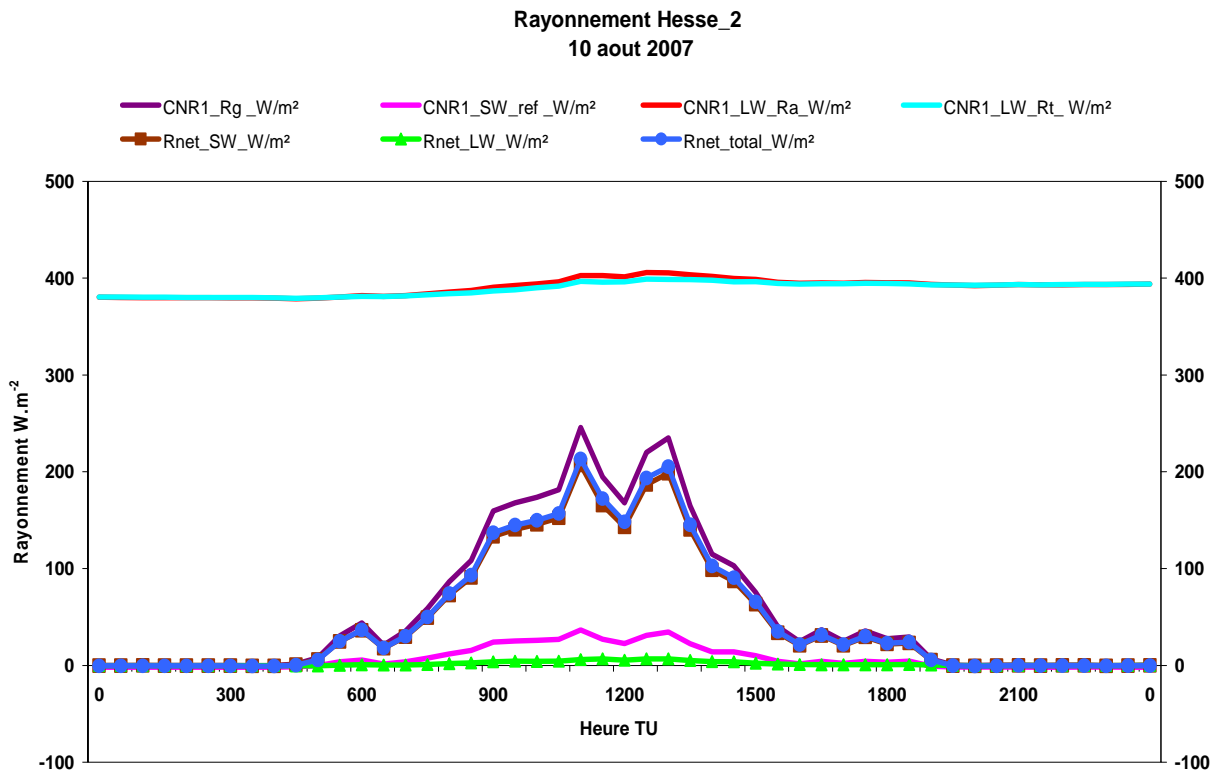


Figure 5 : *Journée nuageuse sans pluie :*

- les températures du couvert végétal et des nuages sont très proches ;
- les rayonnements terrestre et atmosphérique sont prépondérants et quasiment identiques ;
- le rayonnement net total et de courte longueur d'onde se confondent.

Conclusion

La mesure du rayonnement net avec une précision répondant aux nécessités scientifiques est possible à condition de bien choisir le matériel en fonction des objectifs et en tenant compte des différentes sources d'erreur présentées ci-dessus. Des précautions doivent être prises pour la validation des mesures, notamment lorsque l'humidité est proche de la saturation.

La liste présentée n'est pas exhaustive, elle recense des matériels de classes de performance et de prix gradués répondant aux exigences courantes de la recherche à l'Inra.

Bibliographie

De Parcevaux S., Huber L. (2007) Bioclimatologie concepts et applications, *Editions Quae*.

Documentations techniques Kipp et Zonen

Documentations techniques Hukseflux

