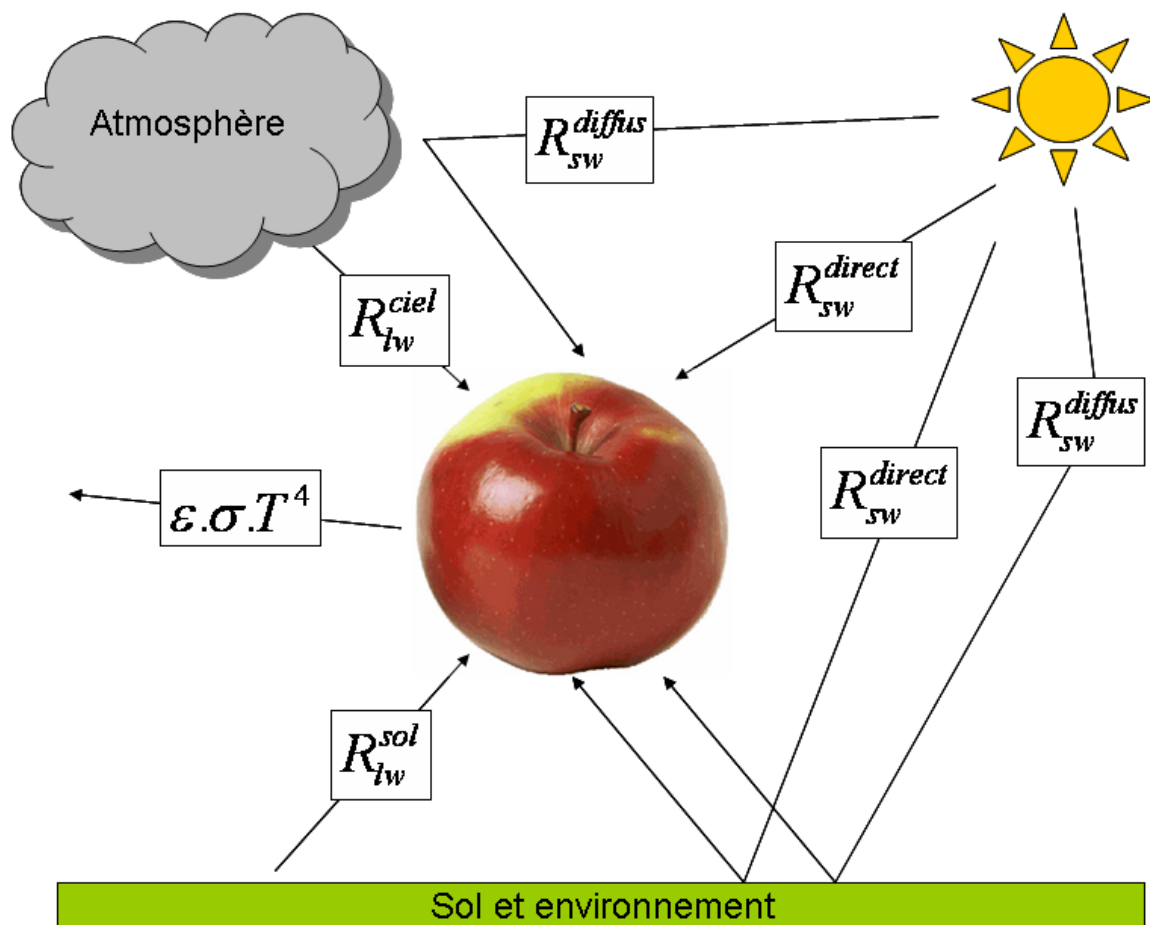


## CHAPITRE III

### Utilisation des capteurs et des résultats de mesures de rayonnement dans les activités de recherche



Composantes du rayonnement mesurées



## Utilisation de MétéoSat et de méthodes statistiques pour le contrôle des données de rayonnement global

Frédéric Huard<sup>1</sup>

**Résumé :** *Le contrôle des mesures de rayonnement global est une opération délicate en raison de la structure des différents réseaux en France (maillages irréguliers, faible nombre de points d'observation au sol...) et de la forte variabilité spatiale et temporelle de l'irradiation solaire. L'objectif de ce travail est de développer une approche méthodologique pour analyser la variabilité spatio-temporelle du rayonnement global et la mise au point de procédures de contrôle en "temps réel" des mesures issues du réseau agrométéorologique de l'Inra. Le bilan de cette étude a permis d'estimer les distances inter-postes critiques au-delà desquelles les méthodes de reconstitution trouvent leurs limites.*

**Mots-clés :** Rayonnement global, MétéoSat, extrapolation, interpolation, distance critique

### Introduction

L'Inra gère sur l'ensemble du territoire français un réseau agrométéorologique composé d'une soixantaine de stations équipées de pyranomètres pour la mesure du rayonnement global. Les capteurs font l'objet d'un étalonnage annuel et les mesures sont validées avant d'alimenter une base de données. Cependant, compte tenu de la structure spatiale du réseau qui n'a pas de vocation synoptique, mais aussi en raison du nombre restreint d'autres réseaux, les procédures de contrôle et de correction ne répondent pas totalement aux besoins d'une gestion optimale. La reconstitution de valeurs journalières manquantes ou erronées reste un problème aigu pour lequel l'utilisation de méthodes statistiques spatiales n'est pas toujours possible. Nous avons donc initié une étude afin d'évaluer, d'une part, les estimations de rayonnement global issues du satellite MétéoSat et, d'autre part, plusieurs techniques statistiques et géostatistiques de reconstitution.



pyranomètre

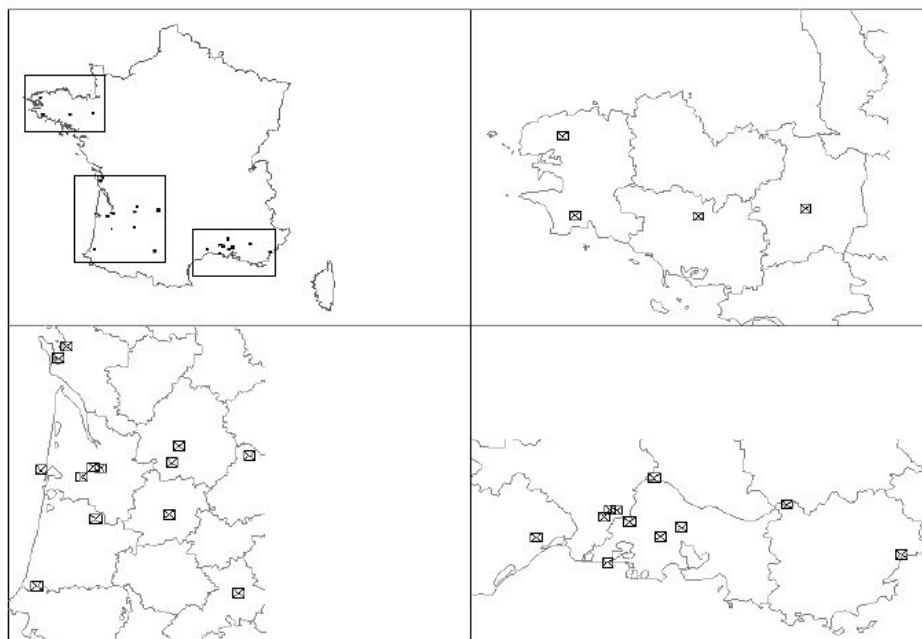
<sup>1</sup> US 1116 Inra- Agroclim, , F-84000 Avignon ☎ 04 32 72 23 75 ✉ [frederic.huard@avignon.inra.fr](mailto:frederic.huard@avignon.inra.fr)

## 1. Données

### 1.1 Données au sol

Trois régions expérimentales à climat et densité de points de mesures différents ont été considérées où des pyranomètres mesurent le rayonnement global dans réseau agrométéorologique de l'Inra (**figure 1**) :

- le Sud-Ouest (13 stations) ;
- le Sud-Est (11 stations) ;
- la Bretagne (4 stations).



**Figure 1** : Localisation des trois régions d'étude

Les mesures sont réalisées par des stations automatiques équipées d'un capteur classe 1 ou 2 OMM (Organisation mondiale de la météorologie). Les classes traduisent la précision de l'appareil. Il existe deux classes pour les pyranomètres : la classe 1 pour les appareils homologués dotés d'une précision inférieure à 5 % et la classe 2 pour les capteurs homologués de précision de 5 à 7 %. Au-delà, les capteurs ne sont pas homologués). Agroclim dispose ainsi de pyranomètres Kipp & Zonnen CM6B (classe 1) qui remplacent peu à peu les Cimel CE180 (classe 2). Les appareils sont étalonnés chaque année par un service spécialisé de l'Inra<sup>2</sup>. Les dérives observées sont toujours inférieures à 2 %.

### 1.2 Données MétéoSAT-Soda

Les données MétéoSAT sont extraites du serveur SoDa (Solar radiation Database for environment, <http://www.soda-is.com>) mis en place par l'Ecole nationale supérieure des mines (ENSM).

Le traitement des images est effectué à partir de la méthode Héliosat 2, également développée par l'ENSM (Wald *et al.* 2002 - Wald, 2000 - Rigollier, 2000 - Cros, 2004).

Le serveur SoDa donne accès aux données à une résolution spatiale de 5 à 250 km (pixels de 5 km de côté pour la France) et à pas de temps horaire minimum. Les données

<sup>2</sup> Unité Inra Agroclim – F-84000 Avignon - contact : Daniel Roux - [daniel.roux@avignon.inra.fr](mailto:daniel.roux@avignon.inra.fr)

quotidiennes sont associées à un code de disponibilité (ou de fiabilité) qui varie de 0 à 5 et qui correspond au taux d'images utilisées pour l'estimation quotidienne. Les rayonnements estimés à partir de moins de 40 % d'images ne sont pas délivrés (indices inférieurs à 2).

La précision, en terme de RMSE (Root Mean-Square Error : racine carrée de l'écart quadratique moyen) relatif calculé sur 60 sites européens et 30 sites africains, de juillet 1994 à juin 1995, est de 24 % pour les données horaires, 18% pour les quotidiennes, 13 % pour les décadaires et 12 % pour les mensuelles (Wald, 2000).

## 2. Méthodes

### 2.1 Evaluation des données MétéoSat

Dans un premier temps, les estimations MétéoSat ont été directement comparées aux mesures pyranométriques au cours de la période 2000-2003 sur l'ensemble des sites, en considérant les mesures au sol comme références. Ce premier point pose le problème de la signification spatiale des comparaisons, car cela revient à comparer la valeur d'une zone moyennement spatialisée à une valeur ponctuelle. Or la taille de la surface moyennée a une forte influence sur la différence (Pinker et Laszlo, 1991).

### 2.2 Extrapolations

Les extrapolations sont obtenues en utilisant des couples de points de mesures au sol. Pour la région test du Sud-Est, on compte ainsi un jeu de 55 couplets (11 stations), 78 couplets dans le Sud-ouest (13 stations) et 6 couplets en Bretagne (4 stations). Les équations de régression sont calculées sur la période 2000-2002 puis appliquées sur les données de l'année 2003. Les résultats ainsi obtenus sont ensuite comparés aux mesures.

### 2.3 Interpolations

Plusieurs techniques d'interpolation peuvent être utilisées. La plus simple s'appuie sur l'inverse du carré de la distance inter-poste. Cependant, pour être efficace, cette méthode doit s'appuyer sur un réseau de points répartis régulièrement dans l'espace, ce qui n'est pas le cas ici. De fait, le krigeage universel a été préféré et testé malgré la relative lourdeur de sa mise en oeuvre. Pour valider les reconstitutions, la valeur de chaque point a été estimée à partir des (n-1) points restants puis comparée à sa valeur mesurée.

### 2.4 Structure spatiale de MétéoSat

Il s'agit de reconstituer des séries de rayonnement global à partir d'un point de mesure et d'appliquer la variabilité spatiale des champs observés à partir des images MétéoSat :

$$*Rg_j = Rg_i \cdot [MS_i/MS_j]$$

avec  $*Rg_j$  le rayonnement global estimé en un point j quelconque,  $Rg_i$  le rayonnement mesuré au point de référence i,  $MS_i$  et  $MS_j$  les estimations MétéoSat des rayonnements au point de référence i et aux points quelconques j.

## 3. Résultats

### 3.1. Evaluation des données MétéoSat

Les résultats indiquent un RMSE moyen de 17 % pour l'ensemble des sites, confirmant ainsi les estimations trouvées dans la littérature. Toutefois, on note une grande variabilité, tant géographique que temporelle. Ainsi, les résultats s'avèrent meilleurs dans le réseau Sud-Est, moins bons dans le Sud-Ouest et décevants en Bretagne (**tableau 1**).

| RMSE %   | Sud-Est | Sud-Ouest | Bretagne |
|----------|---------|-----------|----------|
| Moyen    | 12      | 18        | 21       |
| Indice 2 | 17      | 25        | 29       |
| Indice 3 | 14      | 18        | 23       |
| Indice 4 | 7       | 16        | 19       |

**Tableau 1 :** Evaluation de la qualité des estimations MétéoSat en fonction de l'indice de disponibilité des mesures

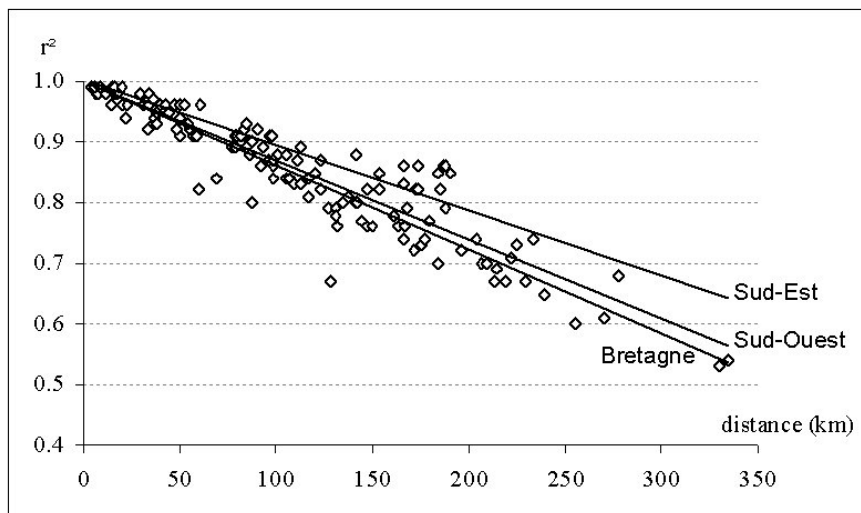
Les estimations MétéoSat sont également liées à l'indice de disponibilité. Une relation étroite existe entre les indices de disponibilité et les types de temps. Ainsi, un indice de type 2 traduit plutôt une situation météorologique perturbée avec un ensoleillement limité (inférieur à 1 000 joules/cm<sup>2</sup>/jour) ; à l'inverse un indice au moins égal à 4 est associé à la période estivale et de fortes valeurs de rayonnement, supérieure généralement à 2 000 joules/cm<sup>2</sup>/jour (**tableau. 2**). Les gisements solaires contrastés selon les régions expliquent de fait les disparités régionales des résultats.

| Rg (joules/cm <sup>2</sup> /jour) | Sud-Est | Sud-Ouest | Bretagne |
|-----------------------------------|---------|-----------|----------|
| Moyen                             | 1842    | 1480      | 1447     |
| Indice 2                          | 855     | 639       | 615      |
| Indice 3                          | 1610    | 1364      | 1292     |
| Indice 4                          | 2678    | 2064      | 1961     |

**Tableau 2 :** Valeurs moyennes du rayonnement sur les régions d'étude

### 3.2 Extrapolations

Les coefficients de corrélation calculés pour les trois régions sont hautement significatifs (supérieurs à 0,90) lorsque la distance est inférieure à 50 km. Toutefois, ils décroissent rapidement après cette distance (**figure 2**).



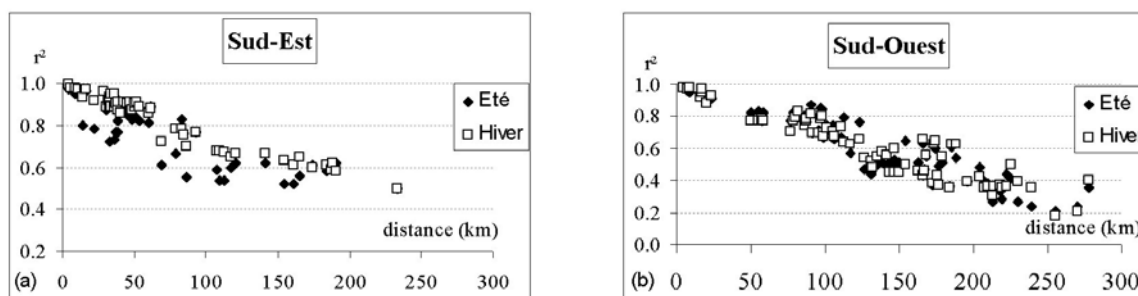
**Figure 2 :** Coefficients de corrélation des valeurs de rayonnement global entre deux points de mesures en fonction de leur distance

Aucune distinction géographique ne semble se dessiner, si ce n'est un meilleur score pour le Sud-Est dans les distances supérieures à 100 km. Une caractérisation saisonnière basée sur deux périodes, l'une estivale (juin à août) et l'autre hivernale (décembre à février) pour les régions du Sud-Est et du Sud-Ouest montre un comportement temporel différentiel (meilleurs scores en hiver) dans le Sud-Est, mais n'est pas perceptible dans le Sud-ouest (**figure 3**).

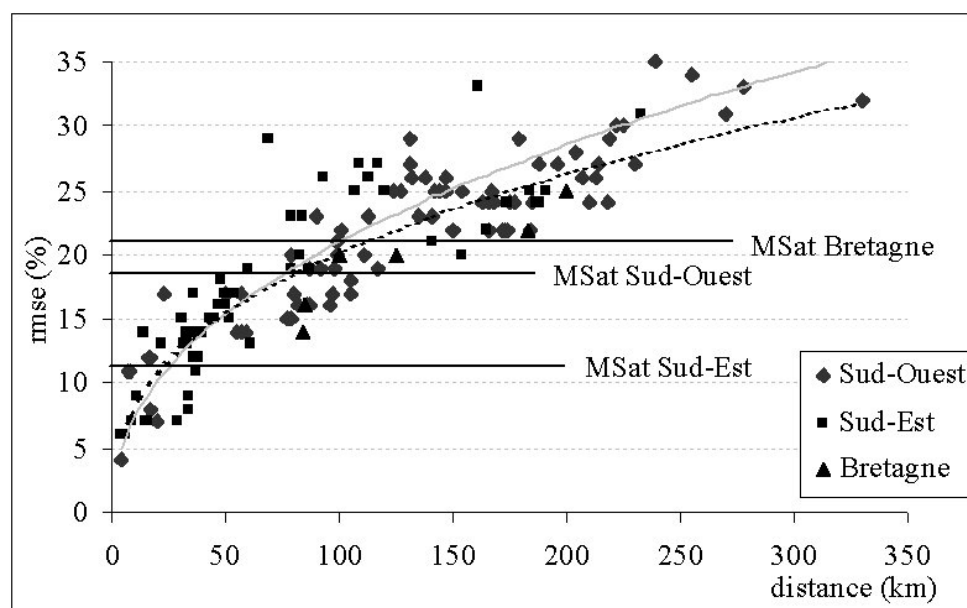
La précision des estimations par extrapolation varie selon la distance en suivant une fonction puissance (**figure 4**). En moyenne, au delà de 60 km dans le Sud-est et 20 km dans le Sud-ouest, les reconstitutions sont moins précises que les estimations MétéoSat. Le seuil de 130 km environ observé en Bretagne n'est pas significatif en raison du faible nombre de couplets (6) et des distances inter-postes toujours supérieures à 80 km.

Pour chacune des situations observées, l'accroissement du RMSE est très rapide dès les premiers kilomètres : il atteint en moyenne 10 % à 20 km et 15 % dès 45 km. Un effet de pépité (offset à l'origine) de 5 % est mis en évidence et indique le biais systématique minimum associé à cette méthode. Il peut être également relié à la précision instrumentale.

Ces résultats sont globalement en accord avec les observations réalisées par Perez *et al.* (1997) montrant que l'utilisation du satellite s'avérait meilleure au-delà d'une distance de 50 km sur la base d'un réseau spatialement bien distribué. On est toutefois éloigné de la distance critique de 15 km avancée par Struzik (2001).



**Figure 3 :** Saisonnalité des corrélations dans le Sud-est (a) et le Sud-ouest (b)



**Figure 4 :** Extrapolation du rayonnement global et distance critique

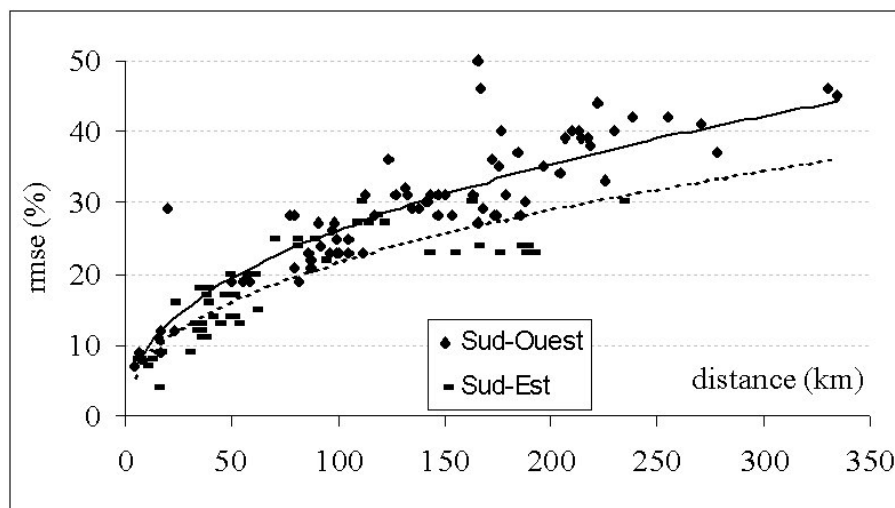
L'analyse saisonnière montre des résultats toujours contrastés selon des types de temps et les sites mais confirme les premiers résultats à savoir que l'extrapolation est significativement meilleure l'été : le seuil de 15% de RMSE relatif n'est dépassé qu'à partir de 90 km dans le Sud-Ouest et quasiment 300 km dans le Sud-Est. Durant cette période de beau temps, l'extrapolation est donc généralement préférable à l'utilisation des données MétéoSat, surtout dans le Sud-Ouest. La situation est différente durant l'hiver, 15 % de RMSE étant atteint dès une vingtaine de kilomètres et 20% à partir de 50 km.

Pour obtenir une estimation moyenne de la qualité des extrapolations vis-à-vis des estimations MétéoSat dans le cadre des deux sous-réseaux Sud-Est et Sud-Ouest, on a sélectionné pour chacun des postes les meilleures extrapolations. On s'aperçoit que globalement, compte tenu de la configuration des sous-réseaux et plus précisément de la distance inter-poste, les résultats sont comparables (**tableau 3**).

| RMSE % | Sud-Est | Sud-Ouest |
|--------|---------|-----------|
| Moyen  | 13      | 18        |
| Eté    | 7       | 13        |
| Hiver  | 19      | 24        |

**Tableau 3 :** Synthèse des extrapolations réalisées dans le Sud-Est et le Sud-Ouest

Pour compléter cette analyse et mettre en évidence l'extrême variabilité spatiale du rayonnement, des traitements similaires ont été entrepris en remplaçant directement les postes entre eux - méthode du "copier-coller" (**figure 5**). En effet, si cette méthode apparaît simpliste, elle n'en est pas moins largement utilisée par de nombreux gestionnaires de réseaux et sous certaines configurations pour reconstituer certaines valeurs manquantes.



**Figure 5 :** Performance de la reconstitution du rayonnement par substitution des postes en eux

On constate dans un premier temps un effet de pente systématique équivalent à celui observé pour l'extrapolation. Ensuite le nuage se disperse très rapidement, signe d'une variabilité spatiale très importante. Au vu des premiers résultats précédents, il est évident que cette méthode de reconstitution doit être prohibée même pour des stations distantes de quelques kilomètres.



### 3.3 Interpolations

Les interpolations sont effectuées par krigeage universel et les résultats sont performants (**tableau 4**).

| RMSE % | Sud-Est | Sud-Ouest | Bretagne |
|--------|---------|-----------|----------|
| Moyen  | 9       | 14        | 21       |
| Eté    | 6       | 11        | 18       |
| Hiver  | 14      | 17        | 25       |

**Tableau 4 :** Résultats des interpolations par krigeage

Les résultats contrastés entre l'été et l'hiver sont de nouveau mis en évidence. Les valeurs observées sont comparables, voire meilleures, que celles issues des études de Zelenka (1999) en Suisse, indiquant un RMSE moyen de 19 %.

En dehors de la région Bretagne, qu'il faut peut être mettre de côté compte tenu de la faiblesse numérique de l'échantillon, les résultats sont meilleurs, par comparaison à ceux issus de l'analyse des données de MétéoSat, avec un RMSE relatif moyen qui est abaissé de 3 à 5 % mais dont la diminution peut atteindre 8 % en moyenne l'hiver dans le Sud-Ouest.

### 3.4 Structure spatiale de MétéoSat

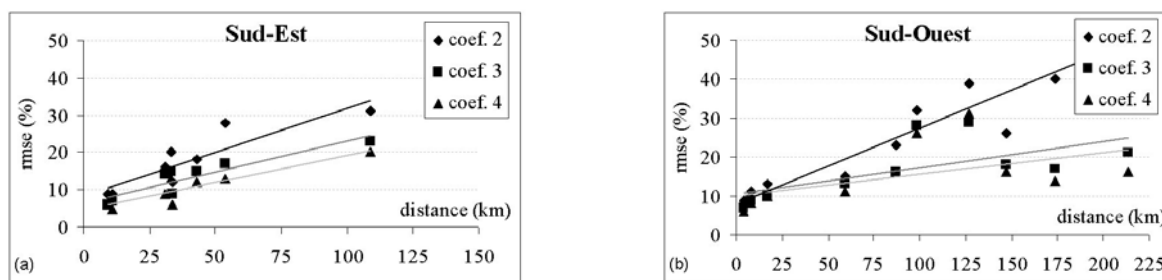
L'hypothèse est de considérer que la structure spatiale des champs MétéoSat traduit fidèlement la variabilité du rayonnement global même si les valeurs ponctuelles sont entachées d'imprécision. On va donc s'appuyer sur cette distribution spatiale et l'appliquer aux mesures au sol. Un point de référence central est déterminé dans chacune des trois régions d'étude puis les différences relatives avec les autres postes sont calculées uniquement à partir des données MétéoSat. Ces valeurs correspondent alors à des coefficients qui sont ensuite affectés aux données mesurées par le pyranomètre de cette station référence afin de reconstituer celles des postes voisins. Pour s'affranchir de tout problème de mesure sur les stations de référence ayant pu altérer les résultats, ces calculs ont été de nouveau réalisés à partir d'une référence différente et ont abouti globalement aux mêmes observations.

Les résultats sont dans l'ensemble proches de ceux observés lors de l'évaluation de MétéoSat et de l'extrapolation (**tableau 5**).

| RMSE %   | Sud-Est | Sud-Ouest | Bretagne |
|----------|---------|-----------|----------|
| Moyen    | 13      | 18        | 28       |
| Indice 2 | 19      | 26        | 28       |
| Indice 3 | 14      | 17        | 16       |
| Indice 4 | 10      | 15        | 25       |

**Tableau 5 :** Reconstitution en utilisant la variabilité spatiale des estimations MétéoSat dans les 3 régions en fonction de l'indice de disponibilité

L'importance du type de temps, à travers le coefficient de validité, associée à la distance du point de référence est de nouveau mise en évidence (**figure 6**).



**Figure 6 :** Reconstitution par utilisation de la structure spatiale de MétéoSat

#### 4. Application à la gestion des données du réseau

Au regard des résultats obtenus, il n'est pas possible de traiter des pas de temps inférieurs au quotidien. Du reste, les travaux de Perez *et al.* (1997) sur des données horaires, ont montré que l'extrapolation génère une erreur de l'ordre de 15 % en termes de RMSE relatif dès une distance de 4 km avec un effet de pépite (offset) de 10 %.

Si les résultats obtenus lors de cette étude peuvent paraître décevants vis-à-vis d'une problématique de gestion et de reconstitution de données manquantes, il en résulte toutefois des informations pouvant directement aider au développement de procédures :

- à partir des méthodes utilisées, le "rayon d'influence" d'une mesure de rayonnement quotidien est de l'ordre de la vingtaine de kilomètres en moyenne ;
- il n'est pas possible de reconstituer des données avec une précision inférieure à 5 % dans le meilleur des cas ;
- l'interpolation par krigeage est préférable à l'extrapolation quand elle peut être mise en place (sous réserve d'une densité suffisante). Si ce n'est pas possible, l'extrapolation ne peut être utilisée pour la correction ou reconstitution qu'en utilisant un poste voisin distant d'une trentaine de kilomètres au maximum l'été et une dizaine de kilomètres les autres saisons, même s'il faut différencier également les régions. Sinon, on utilisera données MétéoSat afin de minimiser l'erreur ;
- la méthode du copier/coller est à bannir, même pour des postes distants de quelques kilomètres.

Pour une mise en pratique, il est nécessaire d'établir des sous-réseaux (à l'image du Sud-Ouest et du Sud-est et plus conséquents qu'en Bretagne) où l'interpolation par krigeage est possible. Pour les stations extérieures à ces sous-réseaux :

- trouver au moins une station distante de moins de 20 km (éventuellement rechercher dans d'autres réseaux) ;
- calculer pour chacun des couplets des équations de régression saisonnières et ce, pour des données quotidiennes, sur une période d'au minimum deux années ;
- reconstituer et corriger les données quotidiennes à partir de ces résultats et des données MétéoSat ;
- proposer en moyenne les estimations MétéoSat pour les stations n'ayant pas de mesures de rayonnement à moins de 30 km et ne faisant pas partie d'un sous-réseau où l'interpolation par krigeage est possible, en annonçant la précision de l'estimation.

## Conclusion

L'étude a permis de hiérarchiser les méthodes et les stratégies utilisées pour le contrôle et la validation des données de rayonnement bien que la mise en évidence d'une variabilité spatiale et temporelle rend la problématique encore plus complexe. L'interpolation par krigeage s'avère la solution offrant les meilleures performances mais reste sujette à la densité des postes de mesures. Elle s'avère délicate à mettre en œuvre dans des procédures en routine automatique et quotidienne. En outre, il ne faut pas s'attendre dans le meilleur des cas à une précision inférieure à 10-15 % en termes de RMSE relatif, ce qui montre l'intérêt des données de MétéoSat dont la précision actuelle est légèrement inférieure.

La bibliographie indique cependant que le cokrigeage, qui n'a pas été testé lors de cette étude, serait plus performant mais son utilisation, encore plus lourde que le krigeage universel, n'est pas adaptée dans le cadre d'un traitement opérationnel de contrôle et de validation. Les perspectives sont toutefois encourageantes, avec les nouveaux algorithmes de traitement des images MétéoSat seconde génération (MSG), notamment la méthode Heliosat 3, et l'exploitation de nouveaux canaux qui donneront des estimations avec une précision prévue inférieure à 10 %.

## Bibliographie

- Cros S. (2004) Création d'une climatologie du rayonnement solaire incident en ondes courtes à l'aide d'images satellitales. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 113 p.
- Perez R., Seals R., Zelenka A. (1997) Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data, *Solar Energy*, **60**, 89-96.
- Pinker RT., Laszlo I. (1991) Effects of spatial sampling of satellite data on derived surface solar irradiance. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **8**, 96-107.
- Rigollier C. (2000) Vers un accès à une climatologie du rayonnement solaire : estimation de l'irradiation globale à partir d'images satellitales. Thèse de doctorat, Université de Nice, 214p.
- Struzik P. (2001) Spatialisation of solar radiation. Draft report on possibilities and limitations. Cost action 718 Meteorological application for agriculture. 3-rd management committee and working group meeting, Budapest 27-28 September 2001. 11p.
- Wald L. (2000) SoDa : integration and exploitation of networked solar radiation databases. European Geophysical Society Meeting, XXV General Assembly, Nice, France, 25-29 April 2000.
- Wald L., Albuissou M., Best C., Delamare C., Dumortier D., Gaboardi E., Hammer A., Heinemann D., Kift R., Kunz S., Lefevre M., Leroy S., Martinoli M., Menard L., Page J., Prager T., Ratto C., Reise C., Remund J., Rimoczi-Paal A., Van der Goot E., Vanroy F., Webb A. (2002) SoDa: a project for the integration and exploitation of networked solar radiation databases. In: *Environmental Communication in the Information Society*, W. Pillmann, K. Tochtermann Eds, Part 2, pp. 713-720. Published by the International Society for Environmental Protection, Vienna, Austria.



# Mesure du rayonnement naturel pour la modélisation de la température des organes

## Application aux fruits

André Marquier<sup>1</sup>, Boris Adam<sup>1</sup>, Lydie Guilioni<sup>2</sup>, Marc Saudreau<sup>1</sup>, Michaël Chelle<sup>3</sup> & Hervé Sinoquet<sup>1</sup>

**Résumé :** Cet article présente une expérimentation mise en place dans un projet innovant du département Environnement et agronomie (EA). Nous développons, plus particulièrement les principes de la mesure du rayonnement naturel à l'aide d'un bilanmètre de chez Kipp & Zonen : les capteurs qui le constituent, les grandeurs mesurées et les précautions à prendre lors de son utilisation notamment dans le domaine de l'infrarouge thermique. Ensuite nous montrons l'intérêt de telles mesures lors de la validation d'un code de calcul simulant la dynamique thermique de fruits.

**Mots clés :** fruit 3D, dynamique thermique, rayonnement naturel

### Introduction

La température est un paramètre clef dans le développement des fruits. Elle agit sur de nombreux processus liés à la qualité des fruits comme l'acidité, la teneur en sucre, la couleur et sur le développement de bio-agresseurs (pathogènes, insectes). Tous ces aspects sont économiquement importants car ils conditionnent la valeur marchande des fruits. Or la température d'un fruit est le résultat d'un échange de chaleur entre le fruit et son environnement direct caractérisé par le microclimat local au voisinage du fruit ; cet environnement dépend du climat global au-dessus du couvert et de l'architecture des arbres. Un feuillage « dense » verra ces fruits plutôt ombragés et protégés du vent alors qu'un feuillage « aéré » conduira à des fruits plutôt éclairés et fortement ventilés. Face aux changements climatiques et au développement d'une agriculture durable respectueuse de l'environnement et des consommateurs, notamment par la réduction de l'usage en verger de produits phytosanitaires, il est nécessaire d'approfondir nos connaissances sur les relations entre le climat, l'architecture des arbres et leurs conséquences sur la qualité des fruits et le développement des bioagresseurs.

Dans ce cadre, l'UMR PIAF du centre Inra de Clermont-Ferrand tente de comprendre et de modéliser les relations entre l'architecture des arbres, le microclimat du verger et la température des fruits. La première étape, démarrée en 2005 dans un projet innovant du département EA, a consisté à modéliser les interactions physiques (transferts d'énergie) entre un fruit et son environnement. Ce modèle prend en compte à la fois l'aspect volumique du fruit et la complexité des variations temporelles et spatiales du microclimat environnant comme par exemple l'alternance ombre et soleil, les variations de température de l'air et de la

---

<sup>1</sup> UMR 547 Physique et physiologie intégrative de l'arbre fruitier et forestier, PIAF – Inra-Univ.Clermont II  
F-63100 Clermont-Ferrand ☎ 04 73 62 43 68 ✉ [andré.marquier@clermont.inra.fr](mailto:andré.marquier@clermont.inra.fr)

<sup>2</sup> UMR 759 Ecophysiologie des plantes sous stress environnementaux, LEPSE, Inra Montpellier SupAgro  
F-34060 Montpellier

<sup>3</sup> UMR1091 Environnement et grandes cultures EGC Inra - F-78850 Thiverval-Grignon, France

vitesse du vent. Nous présentons ici l'expérimentation mise en place pour la validation de ce modèle et nous insistons sur les mesures du rayonnement naturel effectuées et leurs utilisations.

## 1. Matériel et méthode

### 1.1 Modèle

Le système physique auquel nous nous intéressons est un organe végétal volumique isolé placé dans des conditions climatiques naturelles donc fluctuantes. L'approche retenue est celle du bilan d'énergie. Cette approche classique en physique conduit à considérer que la distribution spatiale et la variation temporelle de la température dépendent de deux types de facteurs :

- facteurs externes : le microclimat environnant (rayonnement, température de l'air, vent, humidité),
- facteurs internes : sa capacité à conduire la chaleur (diffusivité thermique), à perdre de l'eau par évaporation (résistance cuticulaire par exemple), à permettre le mouvement d'eau.

D'un point de vue modélisation physique, ce système est complexe et présente des non-linéarités difficiles à appréhender simplement. Dans un tel système, une étude exhaustive des processus physiques, combinée aux discussions avec les écophysiologistes du fruit et du bois nous a permis de justifier des hypothèses simplificatrices (Santin, 2004). Les principales hypothèses retenues sont les suivantes :

- la teneur en eau des organes est constante au cours du temps ;
- les flux de chaleur et de masse couplés (effet Dufour et effet Soret) sont négligeables ;
- le flux de chaleur est gouverné par la conduction thermique, donc modélisé par la loi de Fourier ;
- organe à géométrie ellipsoïdale.

Suivant ces hypothèses, le système mathématique se résume alors à une équation classique de conduction de la chaleur (**équation 1a**) à laquelle s'ajoutent des conditions limites restituant l'interaction avec le microclimat (**équation 1b**) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T(\vec{x}, t)}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (\vec{k}(\vec{x}) \cdot \vec{\nabla} T(\vec{x}, t)) \quad \forall \vec{x} \in \text{Organe} \\ \left[ \vec{k}(\vec{x}) \cdot \vec{\nabla} T(\vec{x}, t) \right] \cdot \vec{n} = \lambda_E(\vec{x}, t) + \phi_c(\vec{x}, t) + R(\vec{x}, t) \quad \forall \vec{x} \in \mathbf{S} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(1a)} \\ \text{(1b)} \end{array}$$

$\vec{n}$  est la normale à la surface  $\mathbf{S}$  de l'organe

où  $\rho$  est la densité volumique ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $C_p$  la capacité calorifique ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) et  $\vec{k}$  la conductivité thermique de l'organe ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).  $\lambda_E(\vec{x}, t)$ ,  $\phi_c(\vec{x}, t)$ , et  $R(\vec{x}, t)$  représentent les apports ou les pertes de chaleur avec l'environnement à la surface du fruit ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Nous distinguons, le flux de chaleur latente lié à l'évaporation de l'eau  $\lambda_E(\vec{x}, t)$ , le flux convectif lié au vent  $\phi_c(\vec{x}, t)$  et le rayonnement net à la surface du fruit  $R(\vec{x}, t)$ . Ces 3 paramètres et ces 3 flux doivent être caractérisés afin de déterminer via la résolution du système (**équations 1a et 1b**) la température  $T$  du fruit. Nous avons donc conduit l'expérimentation pour déterminer ces 6 inconnues.

## 1.2 Expérimentation

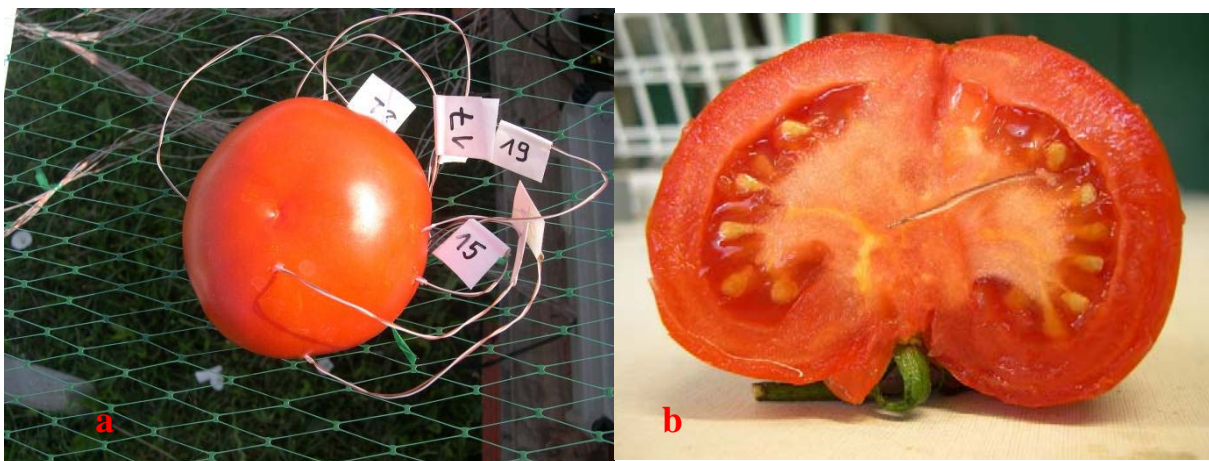
### 1.2.a Généralités

La première phase de l'expérimentation a consisté à caractériser la densité volumique  $\rho$ , la capacité calorifique  $C_p$  et la conductivité thermique de l'organe  $\vec{k}$  pour chaque fruit. L'objectif de cet article n'étant pas de détailler cette partie, le lecteur intéressé pourra contacter l'auteur ou se référer à Saudreau *et al.*, 2007.

La mise en place d'un modèle comporte une phase de validation. Nous avons donc posé des fruits sur un filet (**figure 1**) et nous les avons soumis aux variations journalières du microclimat puis nous avons mesuré leurs dynamiques thermiques via des thermocouples (type T - cuivre-constantan) (**figures 2**). Afin d'avoir des réponses contrastées, nous avons utilisé différents types de fruits : pêches, pommes de type Golden mûres et vertes, pommes de type Red Chief, tomates vertes et rouges, et raisins verts et rouges. En fonction de la taille des fruits, nous avons pu utiliser 2 à 7 thermocouples par fruit (**figures 2**). L'essentiel était d'avoir au moins un thermocouple au centre et un à la surface du fruit afin de caractériser le gradient spatial. De par la faible raideur des fils des thermocouples, le positionnement des capteurs au centre des fruits a été particulièrement délicat. Une mesure précise des positions a été entreprise *a posteriori* mais celle-ci doit être améliorée (**figure 2b**). L'acquisition des données a été effectuée à l'aide d'une centrale d'acquisition DataLogger Campbell (CR10X) associée à des multiplexeurs (AM16/32). Pour chaque fruit, l'évolution temporelle de la température a été mesurée pendant 3 jours avec un pas de temps d'une minute.



**Figure 1 :** Dispositif de mesure de la température de différents fruits



**Figures 2 :** Visualisation des thermocouples disposés sur une tomate rouge.

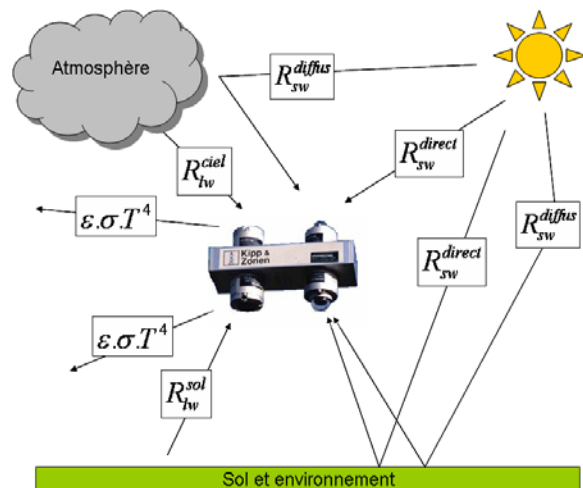
En parallèle du suivi des températures intra-fruit, le microclimat ressenti par les fruits a été enregistré en plaçant les capteurs microclimatiques au plus près de la table de mesure (**figure 3**). Le dispositif comprenait :

- des mesures de rayonnement : rayonnement solaire diffus (pyranomètre Kipp & Zonen avec anneau équatorial), rayonnement de courte longueur ( $R_{sw}$ ) en provenance du soleil, rayonnement de grandes longueurs d'onde ( $R_{lw}$ ) en provenance de l'atmosphère (rayonnement atmosphérique) et en provenance du sol (bilanmètre CNR1 Kipp and Zonen) afin d'estimer le rayonnement net  $R(\vec{x}, t)$  (**eq. 1b**).
- des mesures relatives à l'air ambiant : vitesse (anémomètre à coupelles), direction (girouette), humidité relative et température (thermo-hygromètre capacitif Vaisala HMP45a), qui ont permis d'estimer la perte de chaleur par évaporation  $\lambda_E(\vec{x}, t)$  et le flux de chaleur convectif  $\phi_c(\vec{x}, t)$  (**eq. 1b**).

Ces données ont été enregistrées à l'aide d'une centrale d'acquisition Campbell CR10X sur quelques jours avec une fréquence d'acquisition de 5 secondes et moyennées toutes les minutes.



**Figure 3** : Dispositif de mesures du microclimat : bilanmètre CNR1 (Kipp & Zonen) au premier plan, Pyranomètre avec bande équatoriale au deuxième plan puis mât météo.



**Figure 4** : Illustration des composantes mesurées par le bilanmètre CNR1 (Kipp & Zonen)

### 1.2.b Mesure du rayonnement

Le rayonnement net  $R(\vec{x}, t)$  est la différence entre rayonnement reçu et perdu. Un fruit placé dans son environnement naturel reçoit de l'énergie via le rayonnement solaire, via le rayonnement thermique émis par l'atmosphère et les différents éléments constituant le paysage : sol, feuillage, etc. et il perd de l'énergie par rayonnement thermique lié à sa température. Nous avons donc décomposé  $R(\vec{x}, t)$  en une composante de courte longueur d'onde  $R_{sw}(\vec{x}, t)$  correspondant au rayonnement solaire (UV, PAR et NIR : rayonnement ultraviolet (B et C) de 300 nm à 400 nm, le rayonnement photosynthétiquement actif de 400 à 700 nm et rayonnement proche infrarouge de 700 à 3000 nm) et une composante de grande longueur d'onde  $R_{lw}(\vec{x}, t)$  correspondant au rayonnement atmosphérique, à l'émission



du fruit et à l'émission thermique de son environnement (sol, arbre, haie, etc.) (TIR, de 5  $\mu\text{m}$  à 50  $\mu\text{m}$ ). En prenant en compte que seule une partie de ce rayonnement est absorbé par le fruit, le rayonnement net s'écrit alors :

$$R(\vec{x}, t) = (1 - a_{sw})R_{sw}(\vec{x}, t) + (1 - a_{lw})R_{lw}(\vec{x}, t) - \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4(\vec{x}, t) \quad (4)$$

où  $a_{sw}$  and  $a_{lw}$  sont les coefficients de réflexion (albédo) du fruit considéré pour les courtes longueurs d'onde et grandes longueurs d'onde respectivement,  $\varepsilon$  est l'émissivité du fruit et  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{J K}^{-4} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  la constante de Stefan-Boltzmann. Les valeurs de  $a_{sw}$ ,  $a_{lw}$  et  $\varepsilon$  ont été déterminées via des mesures pour  $a_{sw}$  (spectromètre PPsystem Unispec) et données bibliographiques.

Les composantes  $R_{sw}(\vec{x}, t)$  et  $R_{lw}(\vec{x}, t)$  ont été mesurées grâce à un bilanmètre, CNR1 de Kipp & Zonen (**figure 3** au premier plan). Le rayonnement solaire est mesuré avec 2 pyranomètres CM3, l'un mesure le rayonnement venant du ciel,  $R_{sw}^{global}(\vec{x}, t)$ , et l'autre dirigé vers le sol mesure le rayonnement solaire réfléchi  $R_{sw}^{sol}(\vec{x}, t)$ . Le rayonnement thermique est mesuré via deux pyrgeomètres CG3 : l'un mesure le rayonnement thermique du ciel,  $R_{lw}^{ciel}(\vec{x}, t)$ , et l'autre dirigé vers le sol mesure le rayonnement thermique du sol  $R_{lw}^{sol}(\vec{x}, t)$  (**figure 4**).

D'un point de vue pratique, la mise en place du bilanmètre est simple. En revanche, l'obtention du rayonnement thermique nécessite des précautions. En effet, tout corps émet naturellement un rayonnement fonction de sa température ( $\sim \sigma \cdot T^4$ ) (**figure 4**). Ainsi les 2 pyrgeomètres du CNR1, émettent également un rayonnement qui est pris en compte lors de la mesure. Une lecture directe des capteurs ne donne donc pas l'accès à  $R_{lw}^{ciel}(\vec{x}, t)$  et  $R_{lw}^{sol}(\vec{x}, t)$ . Le CNR1 est équipé d'une Pt100 qui permet de mesurer la température des capteurs et ainsi de corriger la mesure de  $R_{lw}^{ciel}(\vec{x}, t)$  et  $R_{lw}^{sol}(\vec{x}, t)$ . Cette opération peut être faite soit directement lors de l'expérimentation en programmant cette correction au niveau de la centrale d'acquisition Campbell (programme fourni avec le CNR1) soit *a posteriori* lors du traitement des données. Dans ce dernier cas, il est important de sauvegarder également la température des capteurs !

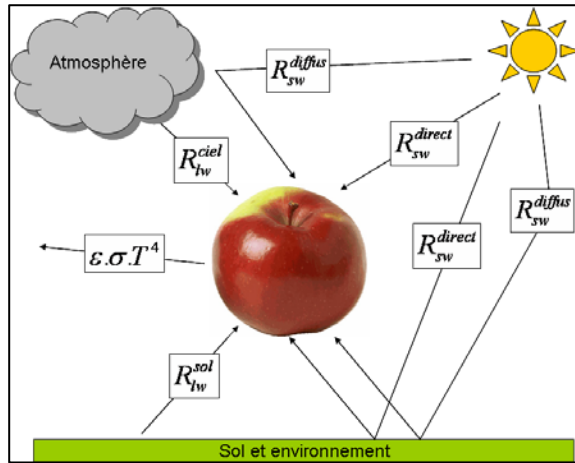
De la même manière le rayonnement solaire global  $R_{sw}^{global}(\vec{x}, t)$  peut être décomposé en une composante directe venant du soleil  $R_{sw}^{direct}(\vec{x}, t)$  et une composante diffuse  $R_{sw}^{diff}(\vec{x}, t)$  :

$$R_{sw}^{global}(\vec{x}, t) = R_{sw}^{direct}(\vec{x}, t) + R_{sw}^{diff}(\vec{x}, t)$$

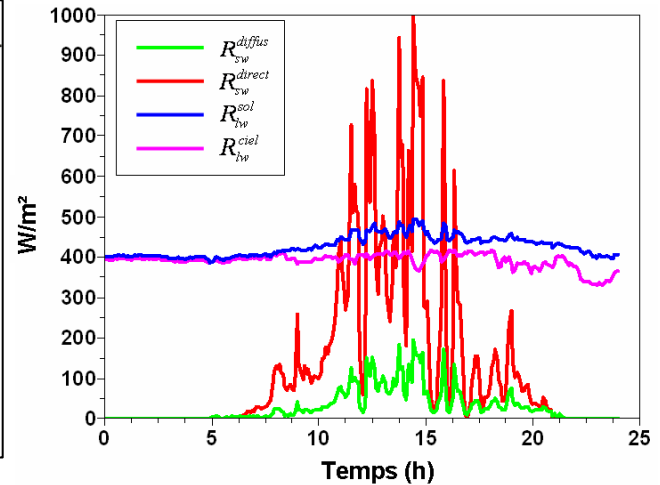
La composante diffuse est mesurée avec un pyranomètre CM3 équipé d'un anneau équatorial qui masque le rayonnement direct provenant du soleil. La composante directe est alors déduite des mesures comme suit :

$$R_{sw}^{direct}(\vec{x}, t) = R_{sw}^{global}(\vec{x}, t) - R_{sw}^{diff}(\vec{x}, t)$$

La **figure 5** résume les composantes mesurées lors de cette expérimentation. La **figure 6** montre l'importance relative de chacune de ces composantes lors d'une journée de ciel clair d'été avec présence irrégulière de nuages (juillet 2005).



**Figure 5** : Composantes du rayonnement mesurées

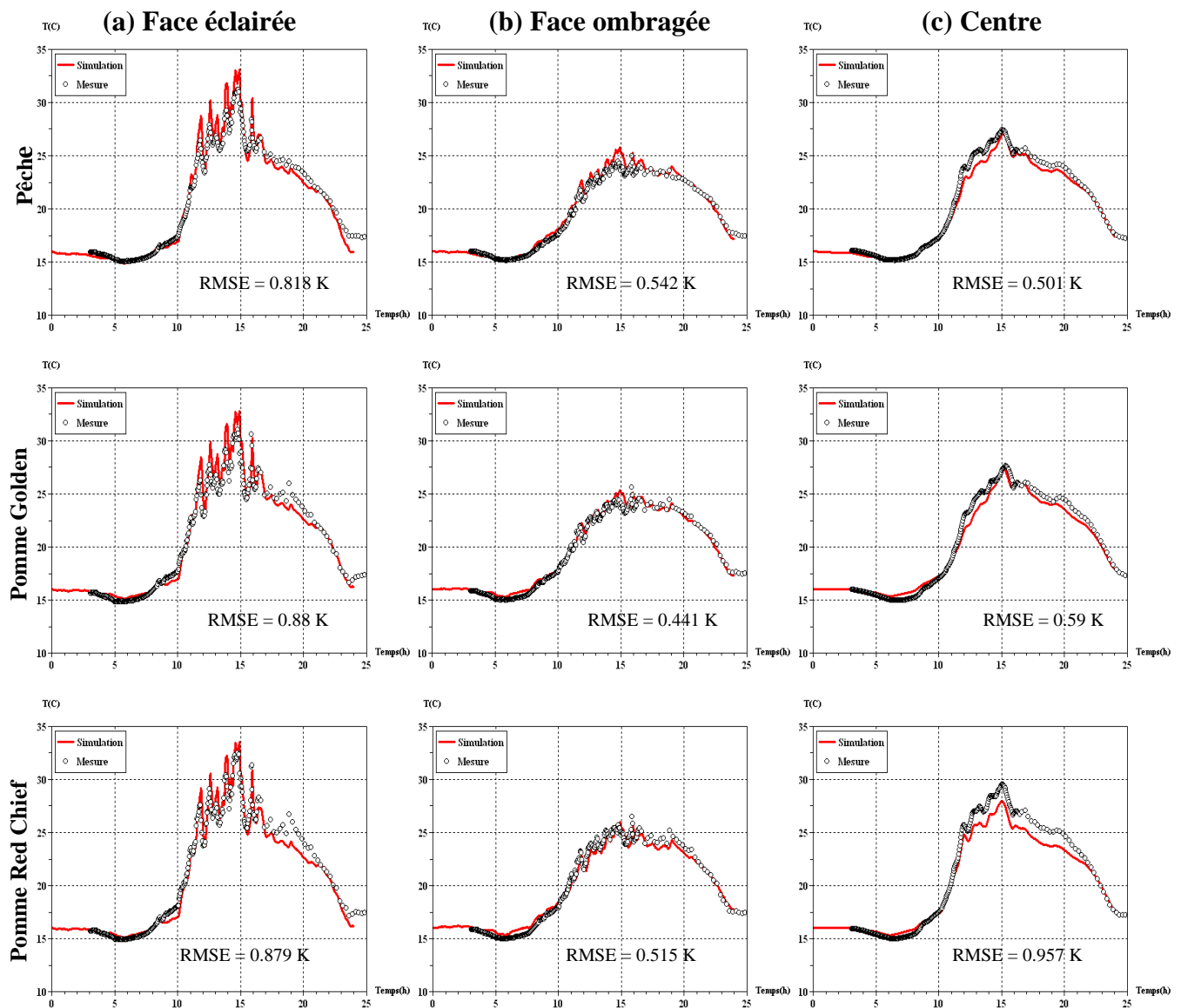


**Figure 6** : Exemple de rayonnements mesurés lors d'une journée d'été

## 2. Application des mesures

La mise en œuvre conjointe du bilanmètre et d'un pyranomètre équipé d'une bande équatoriale, nous a donc permis de caractériser le microclimat lumineux environnant les fruits. Toutefois, ces capteurs mesurent le rayonnement reçu sur une surface horizontale, or, le fruit est à géométrie sphérique. L'utilisation directe des mesures n'est donc pas possible. La dernière étape consiste à estimer le rayonnement arrivant réellement sur les fruits. La mise en œuvre de cette étape fait à la fois intervenir des considérations géométriques (passage d'un plan à une sphère) et physiques (isotropie du rayonnement diffus), que le lecteur intéressé trouvera en consultant Monteith et Unsworth (1990) et Saudreau *et al* (2007).

La mesure du rayonnement associée à la mesure de la température de l'air, de hygrométrie de l'air, et de la vitesse du vent, a été utilisée en entrée du modèle de transfert thermique (équations 1a et 1b). La **figure 7** montre la comparaison entre la température des fruits simulée et la température des fruits mesurée dans le cas d'une pêche, d'une pomme Golden et d'une pomme RedChief. Les simulations restituent fidèlement la dynamique thermique des fruits aussi bien en intensité qu'en fréquence.



**Figure 7 :** Comparaison des températures prédites par le modèle avec les températures mesurées. Chaque ligne correspond à un fruit et chaque colonne à une position sur ou dans le fruit

### 3. Conclusion

Nous avons entrepris une mesure du rayonnement naturel afin de caractériser l'environnement radiatif de fruits. Son utilisation a permis de valider un modèle de transfert de chaleur au sein de fruits 3D. Il est important de souligner que cette utilisation ne pouvait être fructueuse qu'à partir d'une bonne connaissance des mesures à effectuer et des appareils de mesures du rayonnement à mettre en œuvre. En effet, chaque appareil est dédié à un type de rayonnement particulier (NIR, TIR, diffus, direct) ; la mesure doit donc se faire dans des conditions bien précises et avec précaution : horizontalité des capteurs, absence de dépôt de rosé sur les

capteurs, par exemple. Dans le cas de la mesure du rayonnement diffus de courte longueur d'onde avec un anneau équatorial, l'utilisateur prendra soin de régler ce dernier régulièrement. Rappelons également qu'avec l'utilisation du bilanmètre la prise en compte de la température des capteurs est nécessaire pour une mesure séparée du rayonnement thermique atmosphérique et du rayonnement thermique en provenance du sol.

Enfin rappelons qu'avant chaque expérimentation, tout appareil de mesure doit être testé par comparaison à des données en provenance d'un autre capteur.

## **Bibliographie**

- Monteith J.L. & Unsworth M.H., (1990) *Principles of Environmental Physics – 2nd ed°*, London, E. Arnold.
- Santin O. (2004) *Modélisation de la distribution 3D de la température au sein d'organes végétaux*. Rapport de DEA M2SAP, Ile de France. INRA EGC.
- Saudreau M, Sinoquet H, Santin O, Marquier A, Adam B, Longuenesse JJ, Guilioni L, Chelle M. (2007) A 3-d model for simulating the spatial and temporal distribution of temperature within ellipsoidal fruit. *Agricultural and Forest Meteorology* **147**, 1–15.

## **Estimation de rayonnements d'origine solaire reçus à la surface terrestre grâce au modèle 6S de transfert radiatif dans l'atmosphère et des mesures d'un photomètre solaire**

*Olivier Marloie<sup>1</sup>, Frédéric Baret, Jean-François Hanocq*

**Résumé :** *Cet article présente un exemple d'utilisation d'un modèle de transfert radiatif dans l'atmosphère afin de simuler le rayonnement d'origine solaire reçu à la surface du sol. Le modèle choisi est celui mis en œuvre dans le code 6S (second simulation of the satellite signal in the solar spectrum) utilisant des données d'épaisseur optique mesurées grâce à des photomètres solaires. Nous décrivons dans un premier temps, le code 6S (principe et utilisation), le réseau mondial de photomètres solaires, AERONET, mettant à disposition des données d'épaisseur optique et dans un second temps, des comparaisons d'estimations à des mesures réalisées sur le centre Inra d'Avignon. Les résultats des comparaisons montrent une bonne adéquation entre les mesures et les estimations dans les domaines de longueurs d'onde de 300 à 3 000 nm.*

**Mots clés :** rayonnements solaires, modèle, transfert radiatif

### **Introduction**

L'estimation de rayonnements d'origine solaire reçus à la surface terrestre peut se révéler intéressante lorsque l'on ne dispose pas d'instruments pour sa mesure ou lorsque l'on considère des bandes spectrales bien précises. Des méthodes permettent de simuler le rayonnement global en tout point en utilisant des données satellitaires (Météosat par exemple) mais elles sont d'une précision limitée à une échelle de temps courte et sur un domaine spatial limité. L'avantage d'utiliser un modèle de transfert radiatif dans l'atmosphère tel que le code 6S (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*; Vermote *et al.* 1994, 1997) réside dans le fait de pouvoir estimer à partir d'un faible nombre d'entrées, le rayonnement non seulement sur l'ensemble du domaine solaire mais également dans des bandes spectrales plus réduites. Il permet également d'estimer les composantes directes et diffuses. Cependant, son utilisation nécessite de disposer d'information sur les caractéristiques de l'atmosphère (épaisseur optique des aérosols notamment) au moment de l'estimation. Ces informations sont obtenues à partir de données photométriques issues de mesures réalisées par des photomètres solaires et en de nombreux points répartis dans le monde grâce au réseau mondial AERONET (Holben *et al.*, 1998).

Dans un premier temps, nous décrirons rapidement le code 6S et le réseau AERONET puis nous comparerons les sorties du modèle et les mesures réalisées sur le centre Inra d'Avignon.

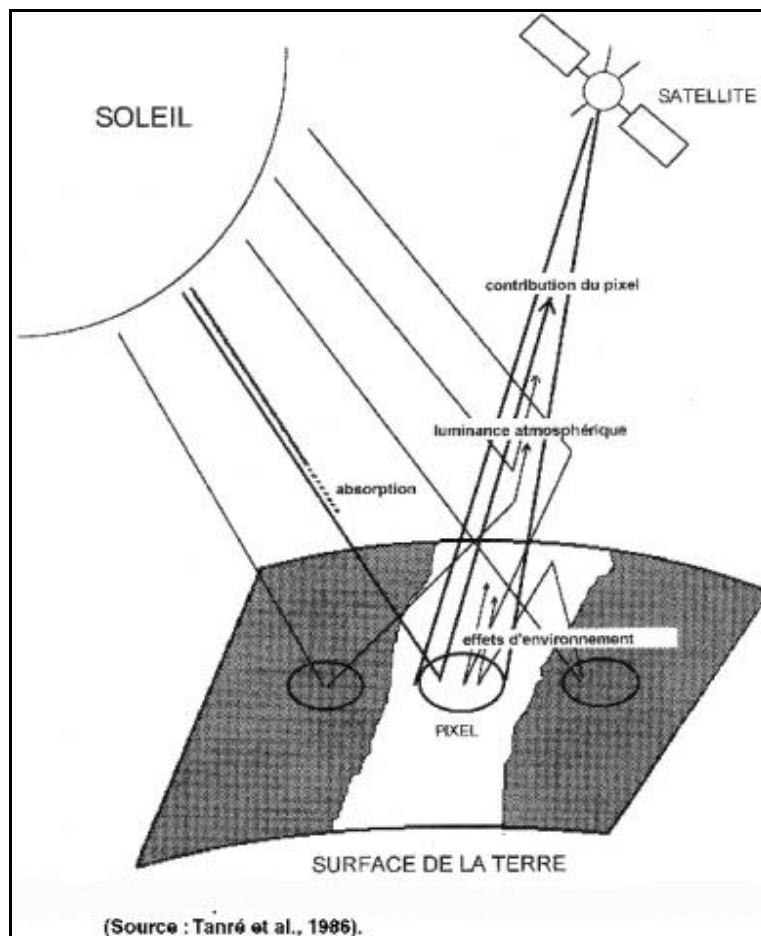
---

<sup>1</sup> UMR1114 - Environnement méditerranéen et modélisation des agro - hydro systèmes (EMMAH) INRA-Univ. Avignon et Pays de Vaucluse – F-84914 Avignon ☎ 04 32 72 23 47 ✉ [olivier.marloie@avignon.inra.fr](mailto:olivier.marloie@avignon.inra.fr)

## 1. Le code 6S

Le laboratoire d'optique atmosphérique (LOA) de Lille a développé ce code pour corriger les mesures radiométriques des effets de l'atmosphère (absorption par les gaz, diffusion par les molécules et les aérosols). Il simule le signal émis par une surface (de 0,25 à 4,0 microns) et il est observé par un capteur radiométrique embarqué (satellite, avion) à différentes altitudes et sous différentes conditions de l'atmosphère, d'éclairement solaire et d'angle de visée.

Ce code repose sur la modélisation des processus de transferts radiatifs dans l'atmosphère en simulant les flux directs et diffus arrivant au sol en fonction de la longueur d'onde (résolution : 2,5 nm).



**Figure 1 :** *Trajet atmosphérique et effets de l'atmosphère sur la mesure radiométrique*

Ce logiciel se présente sous la forme d'un fichier exécutable. La ligne de commande intègre des options et le nom du fichier contenant les paramètres nécessaires aux calculs des grandeurs de sortie.

En entrée (**figure 2**), il faut définir successivement :

- **la géométrie** : définie soit par l'entrée des angles solaires (zénithal et azimutal) et des angles de visée radiométrique, soit par l'entrée des date, heure, longitude et latitude nécessaires au calcul des angles solaires et des conditions de visée propres à un satellite donné (Landsat, SPOT, AVHRR,...) ;

- les caractéristiques atmosphériques, déterminant l'absorption et la diffusion :

- pour les molécules de gaz (ozone, vapeur d'eau, oxygène, dioxyde de carbone, méthane, oxyde nitrique et monoxyde de carbone) : choix entre un modèle d'atmosphère (tropical, latitude moyenne d'hiver ou d'été, subarctique d'hiver ou d'été, et standard US 62), l'entrée de données de radiosondage ou l'entrée de données des contenus intégrés en vapeur d'eau et en ozone de l'atmosphère ;
- pour les aérosols troposphériques : choix du modèle d'aérosols (continental, désertique, maritime ou urbain) ou définition d'un modèle à partir des proportions (%) des constituants possibles (poussières, constituants solubles, particules océaniques et suies de carbone) ; concentration des aérosols, à partir soit de la visibilité horizontale, soit de l'épaisseur optique des aérosols à la longueur d'onde de 550 nm.

- les caractéristiques spectrales : choix entre des conditions spectrales prédéfinies correspondant aux canaux des satellites et capteurs les plus usuels (en particulier NOAA, Landsat MSS, TM et SPOT HRV en mode multi spectral), l'entrée de caractéristiques spectrales définies par une longueur d'onde et une bande spectrale définie par ses bornes supérieure et inférieure ;

- les caractéristiques de surface : homogène ou hétérogène pour la détermination des effets d'environnement ; réflectance de la surface : soit constante sur l'intervalle spectral préalablement déterminé soit spectralement variable (il faut alors entrer la réflectance par intervalle de 0,005  $\mu\text{m}$  ; possibilité d'utiliser des courbes de réflectance prédéfinies pour l'eau claire, l'eau de lac, le sable et la végétation verte).

|  |
|--|
| <p><b>Géométrie</b><br/>angle solaire zénithal : 69,94°, angle solaire azimutal : 0°<br/>angle d'obs. zénithal : 8,00°, angle d'obs. azimutal : 102,00°</p> <p><b>Caractéristiques atmosphériques</b><br/>description du modèle atmosphérique :<br/>vapeur d'eau et ozone (<math>U_{\text{H}_2\text{O}} = 0,86 \text{ g/cm}^2</math>, <math>U_{\text{O}_3} = 0,35 \text{ cm/atm}</math>)<br/>type d'aérosols : continental<br/>conditions optiques : épaisseur optique à 550 nm = 0,034<br/>altitude de la cible (km) : - 0,03<br/>altitude du capteur (km) : - 1 000</p> <p><b>Caractéristiques spectrales</b><br/>longueur d'onde inf. = 0,3 <math>\mu\text{m}</math> longueur d'onde sup. = 2,800 <math>\mu\text{m}</math></p> <p><b>Caractéristiques de surface</b><br/>type de surface cible : homogène<br/>réflectance : 0,2</p> |
|--|

**Figure 2 :** Exemple d'un fichier d'entrées du logiciel 6S

En sortie (**figure 3**), on obtient les éléments suivants :

- les valeurs intégrées de la réflectance apparente (en %) de la surface visée, de la luminance totale ( $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ ) mesurée par le capteur et de la transmittance gazeuse ;
- les valeurs normalisées (en %) de l'éclairement solaire au niveau du sol (% de rayonnement direct, diffus et en provenance de l'environnement de la cible) et de la réflectance mesurée au niveau du satellite (contributions de l'atmosphère, de l'environnement et de la cible) ;
- les valeurs absolues correspondantes en  $\text{W.m}^{-2}$  pour l'éclairement au niveau du sol et en  $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$  pour les luminances au niveau du satellite ;
- l'éclairement solaire (hors atmosphère) intégré sur la bande spectrale considérée.

|  |                         |   |
|--|-------------------------|---|
| Réflectance apparente : 0,1202   |                         |   |
| Luminance totale ( $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$ ) : 7,193 |                         |   |
| Transmittance gazeuse totale : 0,818   |                         |   |
| Eclairement solaire reçu au sol :  |                         |   |
|  | Valeurs normalisées (%) | Valeurs absolues ( $\text{W.m}^{-2}$ )          |
| Eclairement direct :   | 82,7                    | 116,32  |
| Eclairement diffus :   | 16,1                    | 20,55   |
| Contribution environnement :   | 0,8                     | 0,95  |
| Signal reçu au niveau du satellite :   |                         |   |
|  | Réflectances (%)        | Luminances ( $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ ) |
| Contribution atmosphère :  | 5,2                     | 3,10  |
| Contribution environnement :   | 0,4                     | 0,23  |
| Cible (pixel) :  | 6,4                     | 3,86  |
| Total :  | 8,1                     | 2,138   |
| Spectre solaire intégré ( $\text{w.m}^{-2}$ ) : 1 370,03                       |                         |   |
| Fonction filtre intégrée (en mic) : 2,5  |                         |   |

**Figure 3 :** Données de sortie du logiciel 6S

Le rayonnement total reçu à la surface terrestre est égale à la somme des éclairagements directs, diffus et de la contribution de l'environnement, multipliée par la l'intervalle de longueur d'onde sur lequel a été réalisé la simulation (2,5  $\mu\text{m}$  dans cet exemple) :

$$R_g = (E_{\text{direct}} + E_{\text{diffus}} + C_{\text{environnement}}) * 2,5 = 344,5 \text{ W.m}^{-2}.$$



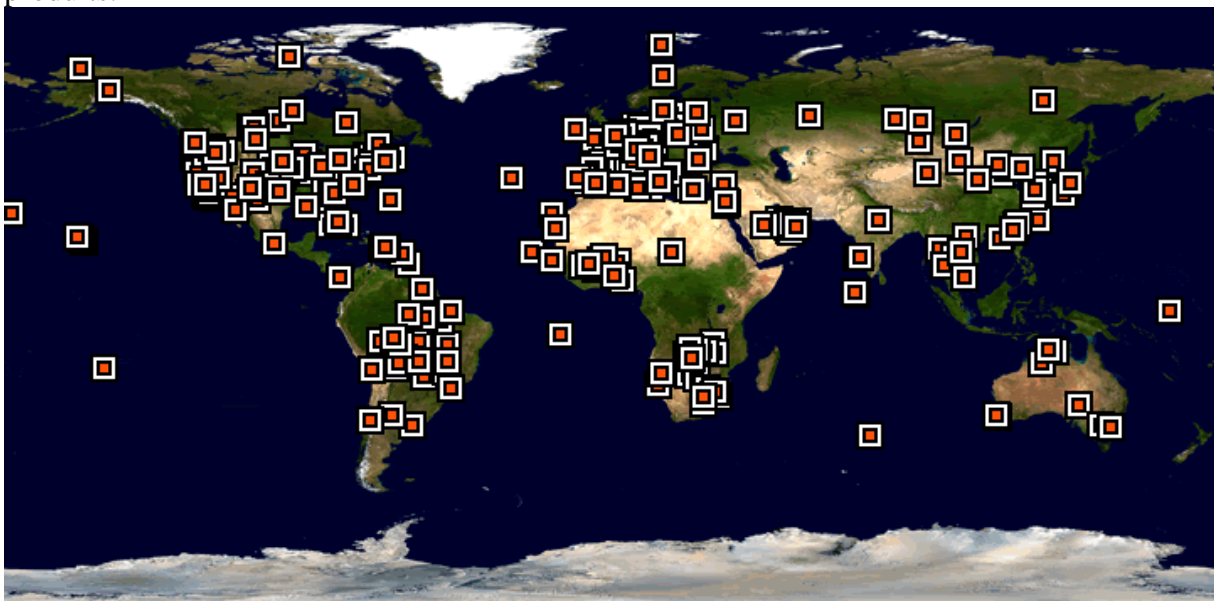
### 3. Mesure de l'épaisseur optique des aérosols : Le réseau AERONET

Les aérosols sont des particules très légères dont la taille varie du centième de micron à quelques dizaines de microns, ils sont en suspension dans l'atmosphère, d'origine naturelle et anthropique c'est-à-dire liées à l'activité humaine et dont la durée de vie est plutôt brève ; elles peuvent être transportées sur de très grande distance.

L'épaisseur optique d'aérosols, ou AOD (Aerosol Optical Depth) caractérise la transparence du milieu atmosphérique, plus spécifiquement comment les aérosols affectent le passage de la lumière à travers l'atmosphère pour une longueur d'onde donnée.

Les photomètres solaires au sol permettent de déterminer localement l'épaisseur optique en mesurant l'éclairement direct ( $W.m^{-2}$ ) provenant du soleil et arrivant à la surface terrestre. Ils sont constitués d'un détecteur qui vise le soleil et qui suit sa course tout au long de la journée. L'éclairement solaire au "sommet" de l'atmosphère étant connue, la mesure de sa valeur à la surface, après traversée de l'atmosphère, permet de connaître la transmission de l'atmosphère.

AERONET (Aerosol RObotic NETwork, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) est un réseau de mesure des propriétés optiques et microphysiques des particules aérosols contenus dans l'atmosphère. Ce réseau a été initié au début des années 1990 par la NASA et le laboratoire d'optique atmosphérique du CNRS (composante française du réseau AERONET ORE PHOTONS : PHOTométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire, <http://www-loa.univ-lille1.fr/photons>) afin de caractériser et de surveiller les aérosols sur l'ensemble du globe (**figure 4**). AERONET fournit des observations intégrées sur la colonne atmosphérique : épaisseur optique spectrale, distribution des tailles des particules, contenu en vapeur eau, produits.



Source : AERONET

**Figure 4 :** Carte d'implantation des sites de mesure du réseau AERONET

Ces observations sont essentielles pour la recherche (compréhension du rôle des aérosols sur le climat, étude sur la qualité de l'air) ainsi que pour la validation ou l'évaluation de variables déduites des images satellitaires.

Les photomètres utilisés dans le réseau AERONET sont exclusivement les instruments automatiques de la marque CIMEL (**figure 5**). Ils sont équipés de 8 filtres pour mesurer l'éclairement (composante directe du rayonnement incident) dans les longueurs

d'onde 340, 380, 440, 500, 670, 870, 1 020 et 1 640 nm. Le réseau impose l'entretien et l'étalonnage des instruments ainsi que le traitement et la distribution en quasi-temps réel des données. Les données de tous les sites de mesures sont envoyées toutes les heures au centre de réception des données par transmission satellite (GOES, METEOSAT, GMS).



**Figure 5 :** photomètre solaire CIMEL CE318 utilisé dans le réseau AERONET  
Centre Inra d'Avignon

#### **4. Comparaison des estimations avec des mesures *in situ***

La version 4.1 du logiciel 6S a été testée en simulant le rayonnement total dans le domaine solaire (300 – 3 000 nm) et visible (400 – 700 nm) sur le centre Inra d'Avignon. Nous avons estimé ces valeurs à partir de la totalité des mesures (épaisseur optique, contenu en vapeur d'eau) acquises par le photomètre solaire du réseau AERONET installés sur ce site (**figure 5**). Nous avons téléchargé sur le site AERONET les données photométriques qui correspondent au meilleur niveau de qualité (level 2,0 : vérification des performances de l'instrumentation, étalonnage, filtrage des données affectées par la présence de nuages).

Pour les conditions géométriques, il est nécessaire de fournir l'angle zénithal du soleil lors de la mesure de l'épaisseur optique ainsi que le jour et le mois. Pour les conditions atmosphériques, nous avons choisi un modèle d'atmosphère standard dont les caractéristiques (pression atmosphérique, composition) sont fixées à leur valeur nominale, les aérosols sont de type continental. La surface est supposée homogène avec une réflectance fixée à 0,1 dans le domaine visible et à 0,2 pour le domaine proche et moyen infrarouge. La bande spectrale sur laquelle est réalisée l'estimation, est calée sur la sensibilité spectrale des capteurs de mesure des rayonnements servant dans ces comparaisons.

Les résultats de mesure disponibles sur le centre Inra d'Avignon sont des valeurs moyennes du rayonnement par pas de 10 minutes pour les années allant de 2004 à 2008. Elles sont calculées à partir de mesures réalisées toutes les 15 secondes. Les résultats de mesure sont exprimés en unité énergétique ( $\text{W.m}^{-2}$ ) dans le domaine solaire et en unité photonique dans le domaine visible ( $\mu\text{mol.m}^{-2} .\text{s}^{-1}$ ).

Liste des capteurs utilisés dans le domaine solaire :

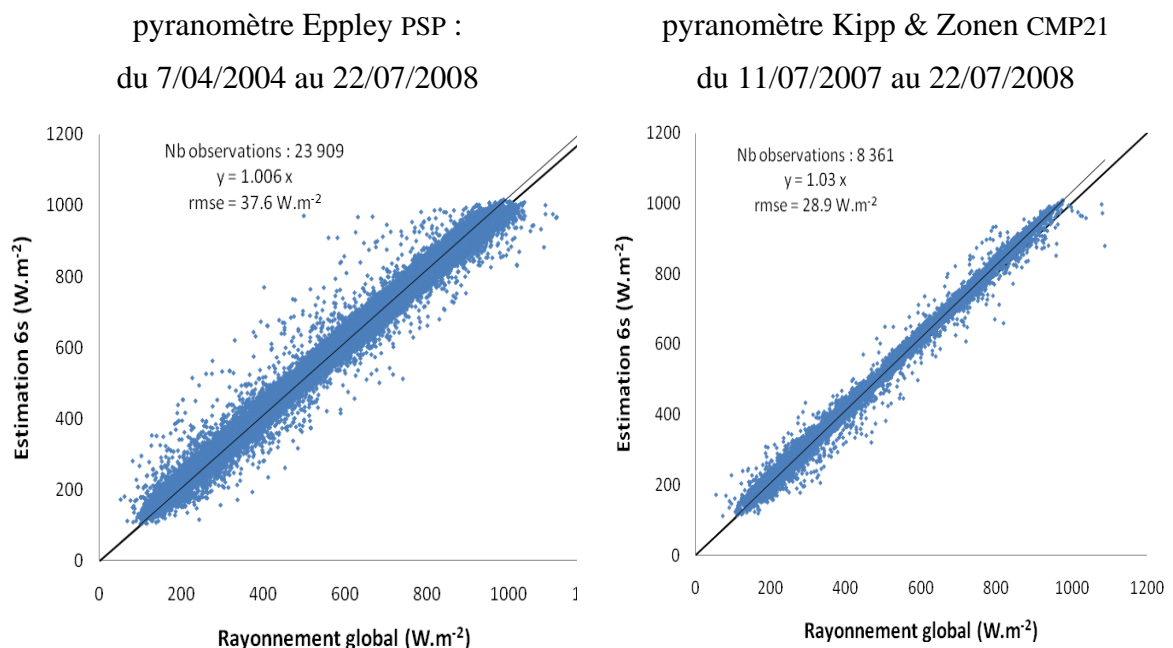
- pyranomètre Eppley PSP (sensibilité spectrale 285 - 2 800 nm, étalonné au centre radiométrique de Météo France de Carpentras) mis en place le 7/04/2004 ;
  - pyranomètre Kipp & Zonen CMP21 (sensibilité spectrale 310 - 2 800 nm, étalonné au centre radiométrique de Météo France de Carpentras) mis en place le 11/07/2007.
- L'incertitude de mesure (avec un niveau de confiance de 95 %) est inférieure à 5 % sur des cumuls journaliers dans les cas de suivi continu du rayonnement global tel qu'il est pratiqué sur notre site (en appliquant les recommandations de l'Organisation mondiale de la météorologie).

Liste des capteurs utilisés dans le domaine visible :

- quantummètre Li-Cor LI190SB (sensibilité spectrale 400 - 700 nm, étalonné par Li-Cor Inc.) mis en place le 16/10/2007. Le constructeur de ce capteur annonce une erreur relative sur la mesure inférieure à 5 % ;
- capteur d'ensoleillement delta-T BF3 (sensibilité spectrale 400 - 700 nm, étalonné par Delta-T) et mis en place le 10/11/2004. Ce capteur délivre par ailleurs une mesure de la composante diffuse du rayonnement incident. Ceci permet de calculer la fraction diffuse étant le rapport entre la composante diffuse et le rayonnement total reçu à la surface terrestre. La précision annoncée par le constructeur est de  $\pm 12\%$  sur la mesure du rayonnement incident et de  $\pm 15\%$  sur la mesure de la composante diffuse du rayonnement.

Les données d'épaisseur optique disponibles ont des pas de temps variables et représentent des valeurs instantanées. Afin de réaliser la comparaison, nous avons utilisé la valeur estimée à partir de l'épaisseur optique dont l'heure d'acquisition est la plus proche du centre de la période de la mesure du rayonnement (10 minutes). Seules les données dont l'angle zénithal du soleil est inférieur à  $80^\circ$  sont utilisées pour ces comparaisons.

Résultats dans le domaine solaire

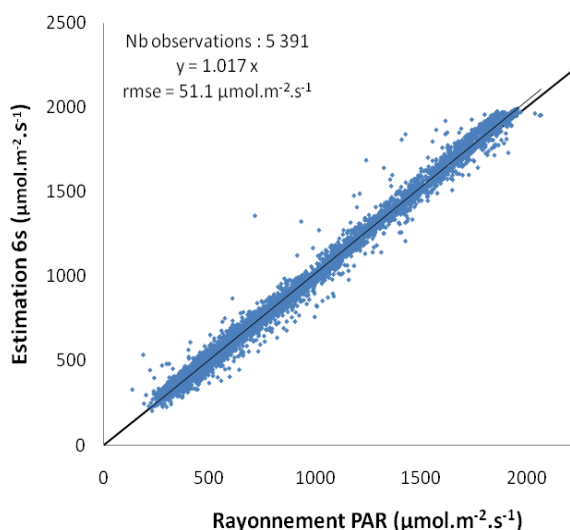


### Résultats dans le domaine visible (400 – 700 nm) :

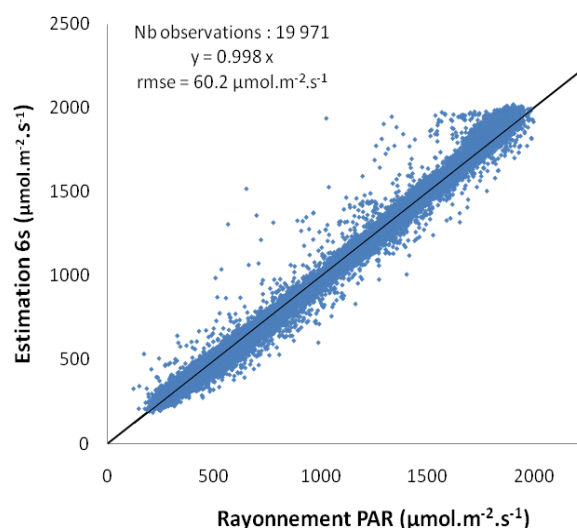
Les grandeurs de sorties de 6S étant exprimées en unité énergétique, le facteur de conversion en unité photoniques est celui défini pour des conditions de ciel clair (soleil, ciel bleu) :

$$1 \text{ W.m}^{-2} = 4,57 \text{ } \mu\text{mol.m}^{-2} \text{ .s}^{-1}.$$

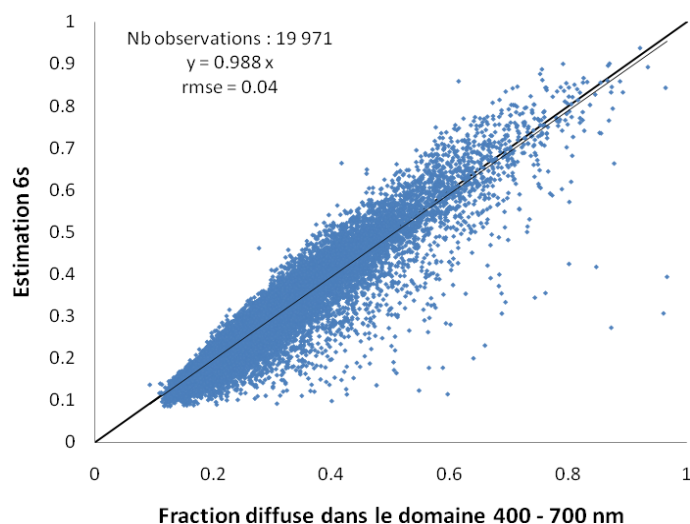
Quantum mètre Li-Cor LI-190SB :  
du 16/10/2007 au 22/07/2008



Capteur d'ensoleillement Delta T BF3  
du 10/11/2004 au 22/07/2008



Fraction diffuse calculée à partir des mesures délivrées par le capteur d'ensoleillement Deltat T BF3



Nous remarquons une bonne corrélation entre les estimations et les observations quel que soit le domaine spectral ainsi qu'un faible biais. La fraction diffuse dans le domaine visible est elle aussi assez bonne quoiqu'un peu plus bruitée. Compte tenu des incertitudes de mesure provenant des erreurs des instruments (de l'ordre de 5 % pour le PSP, CMP21 et LI190SB ; concernant le BF3, 12 % pour le rayonnement total et 15 % pour la mesure de la composante diffuse), de grandeurs d'influence (température) et aussi de l'entretien des capteurs (nettoyage

des salissures sur les dômes, vérification horizontalité, changement desséchant), les écarts observés et représentés par le calcul des écarts quadratiques moyens sont assez faibles. Le bruit observé provient d'une part, des différences de représentativité des données (mesures instantanées d'épaisseur optique, mesures intégrées des rayonnements, mesures pas forcément bien synchronisées) et d'autre part, des problèmes instrumentaux, conséquences soit d'erreurs de mesure, soit de salissures sur les dômes des instruments (poussières, déjections d'oiseaux). Il faut signaler tout de même que ces simulations sont réalisées pour des conditions de ciel plutôt clair (sans nuages bien définis). Le code 6S fait l'hypothèse d'une atmosphère homogène au niveau de la visibilité. Lorsque le ciel est fractionné avec des nuages bien structurés de type cumulus, les simulations sont beaucoup moins bonnes.

En conclusion, nous avons constaté sur notre site d'Avignon que le code 6S était bien adapté pour simuler le rayonnement d'origine solaire reçu à la surface du sol dans le domaine solaire et visible dans des conditions de ciel plutôt homogène (ciel non fractionné). Simple d'utilisation 6S demande peu d'entrées pour peu que l'on dispose d'un photomètre solaire du réseau AERONET à proximité. En extrapolant, nous jugeons qu'il est également utilisable pour d'autres applications en simulant le rayonnement dans d'autres bandes spectrales plus réduites du domaine solaire.

## **Bibliographie**

Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanré D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., (1998) AERONET-A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization, Remote Sensing of the Environment, 66, 1-16.

Smirnov A., Holben B.N., Eck T.F., Dubovick O., Slutsker I. (2000) Cloudscreening and quality control algorithms for the AERONET database, Remote Sensing of the Environment, 73, 337- 349.

Vermote E.F., Tanré D., Deuzé J.L., Herman M., Morcrette J.J. (1997) Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6s: An Overview. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing. vol. 35. n°. 3.

Vermote E.F., Tanré D., Deuzé J.L., Herman M., Morcrette J.J. (1997) "Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum (6S) - User guide version 2." University of Maryland / Laboratoire d'optique Atmosphérique / European Centre for Medium Range Weather Forecast.

## **Logiciel**

Vermote E., Tanré D., Deuzé J.L., Herman M. Morcrette J.J. (1999) Second Simulation of the satellite signal in the solar spectrum (6S), Software, Version 4.1, Department of Geography, University of Maryland and Laboratoire d'Optique Atmosphérique, U.S.T.L.

## **Sites Internet**

AERONET : <http://aeronet.gsfc.nas.gov/> (consulté le 9/01/2009)

Code 6S – Site du LOA : [http://www-loa.univ-lille1.fr/SOFTWARE/Msixs/msixs\\_gb.html](http://www-loa.univ-lille1.fr/SOFTWARE/Msixs/msixs_gb.html) (consulté le 9/01/2009)

Code 6S – Site MODIS : [http://modis-sr.ltdri.org/6S\\_code/index.html](http://modis-sr.ltdri.org/6S_code/index.html) (consulté le 9/01/2009)





## 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

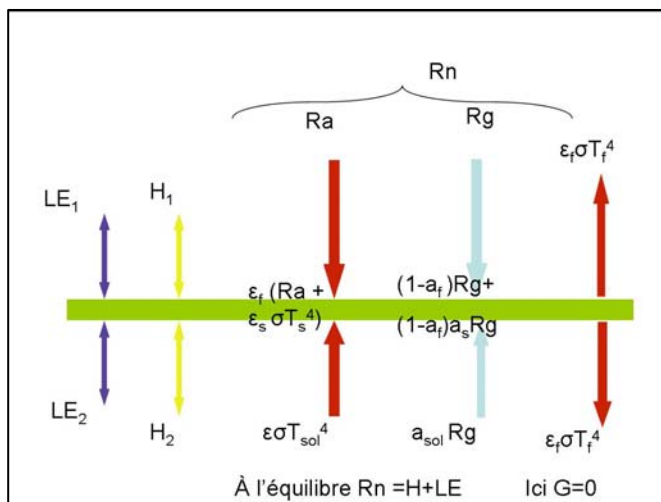
Le dépôt de rosée se produit lorsque la température de la feuille est inférieure à la température du point de rosée de l'air. La température du point de rosée est une caractéristique de l'air humide : plus l'air contient de vapeur d'eau plus la température du point de rosée est proche de celle de l'air. 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 :

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

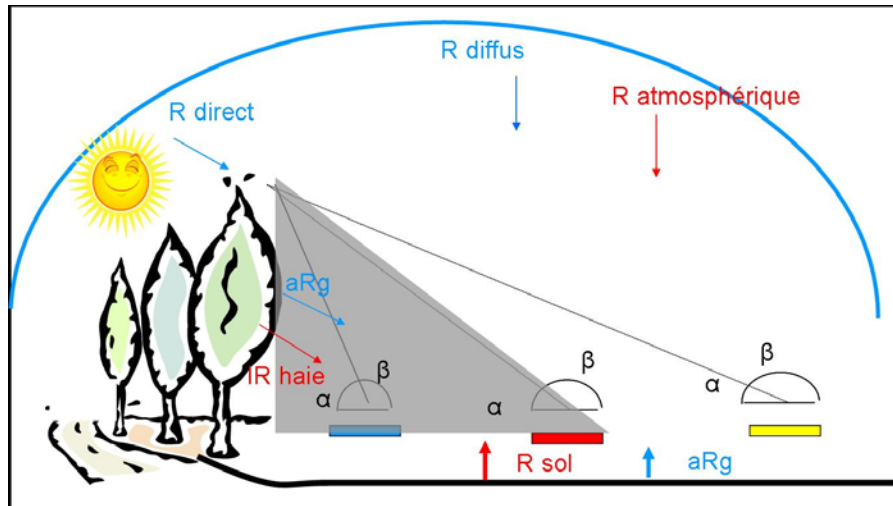
Et pour la feuille sèche juste avant le dépôt de rosée et sans transpiration.

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

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).

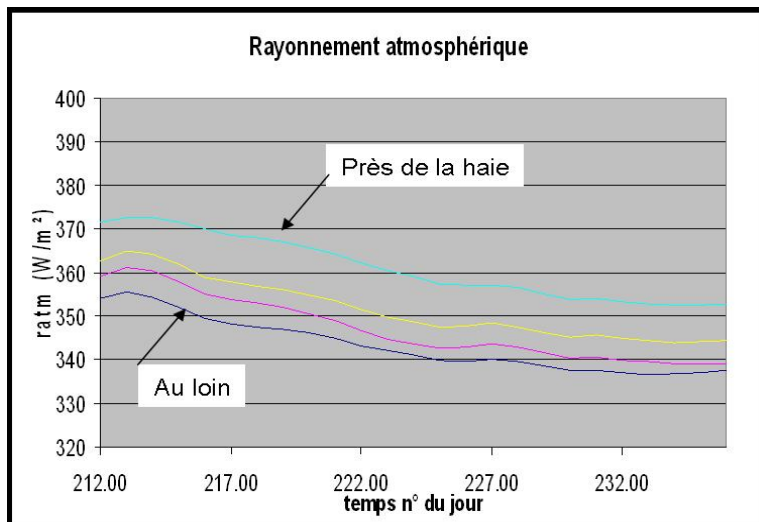
Dans les grandes longueurs d'onde, les feuilles recevront sur la face supérieure le rayonnement atmosphérique ainsi que le rayonnement de la haie, en proportion des angles solides  $\alpha$  et  $\beta$ . Sur la face inférieure elles recevront le rayonnement du sol ou dans le cas de notre expérimentation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

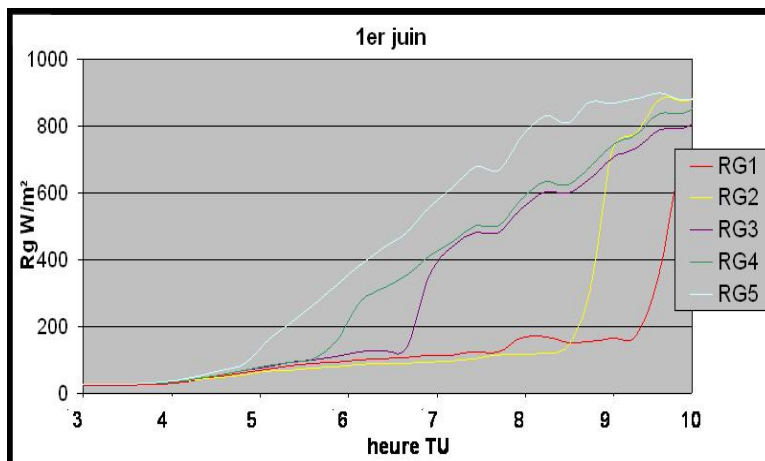
## 4. Illustration des modifications dues à la haie

### 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)

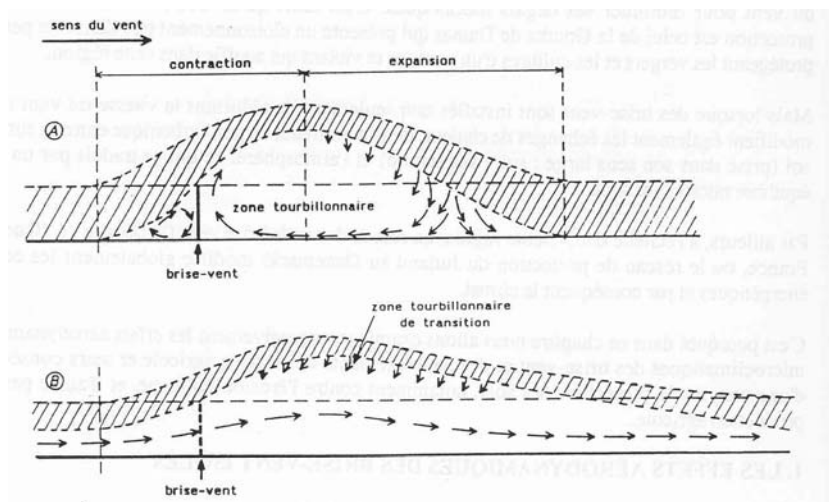
### 4.2 Modification du rayonnement solaire reçu

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

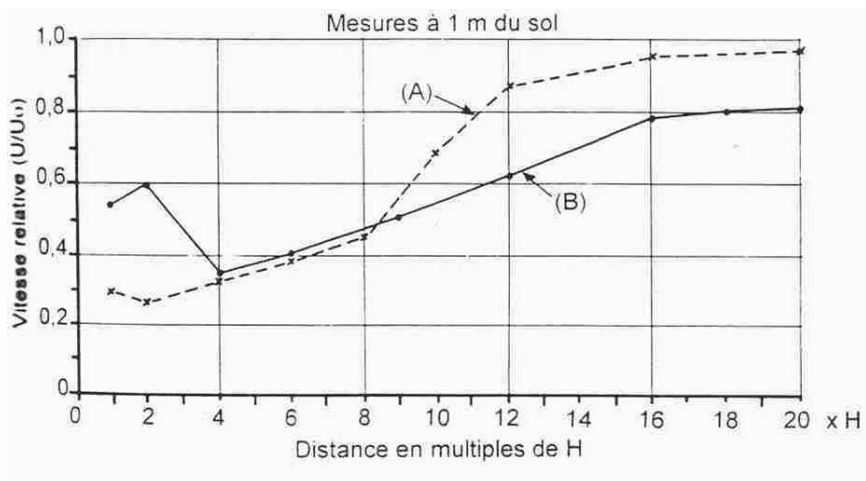
rapidement au cours de la matinée. Pendant ce temps le capteur Rg1 qui est à l'ombre ne reçoit que le rayonnement diffus d'une partie de la voûte céleste plus la réflexion par la haie de ce rayonnement qui représente ce jour là 25 % du rayonnement global. Cette différence va conserver la rosée près de 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**).

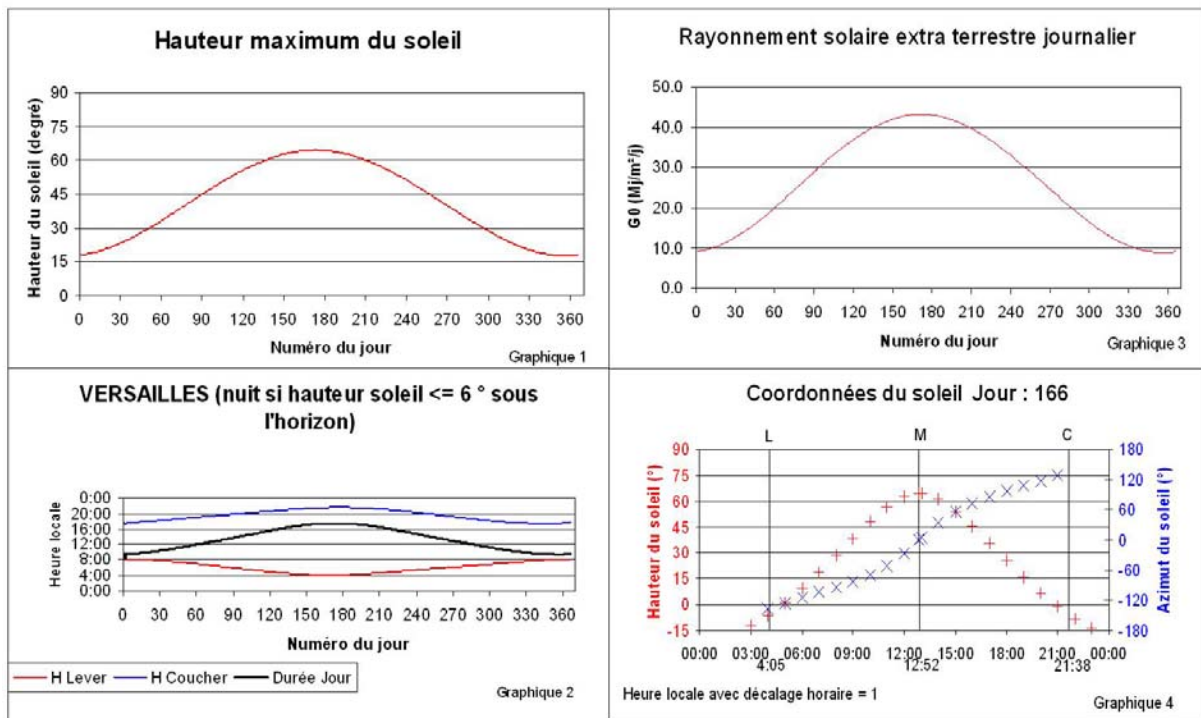
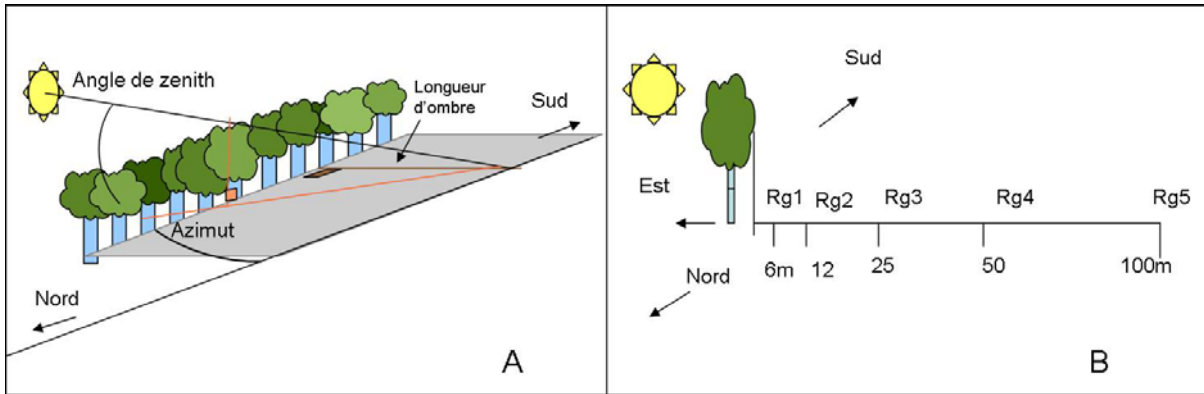


Figure 7 : Eléments astronomiques fournis par la feuille de calcul (Versailles, 2008)

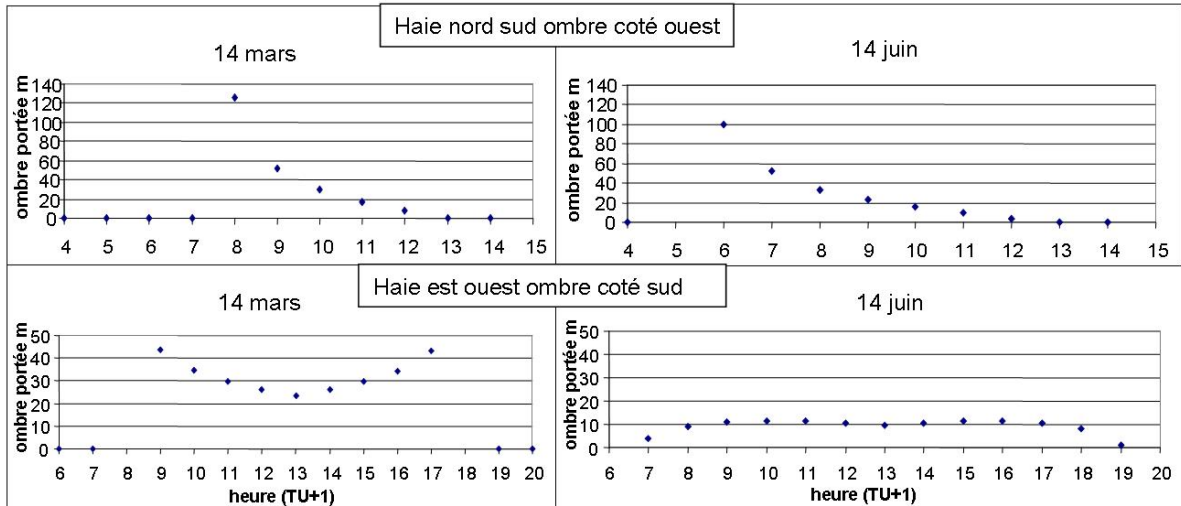
## 5.2 Calcul de l'ombre portée perpendiculairement à la haie

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.

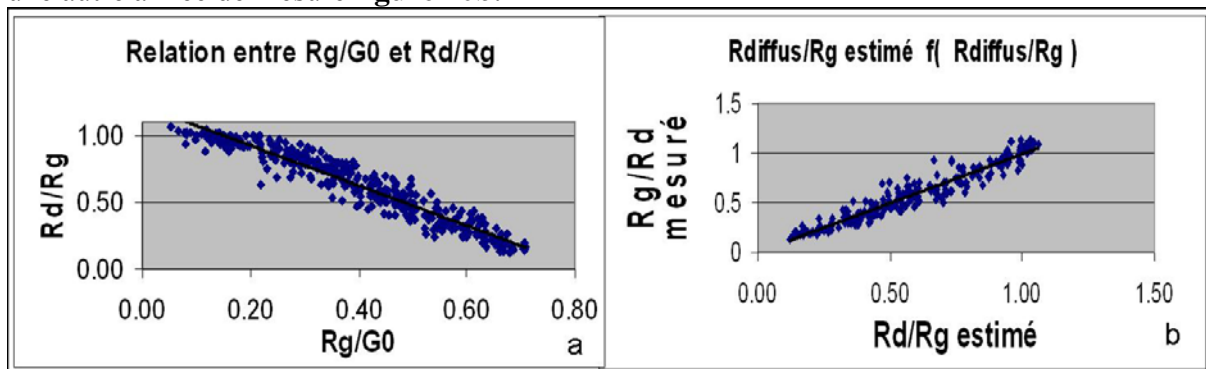
## 6. Formation de rosée et estimation de sa durée

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.

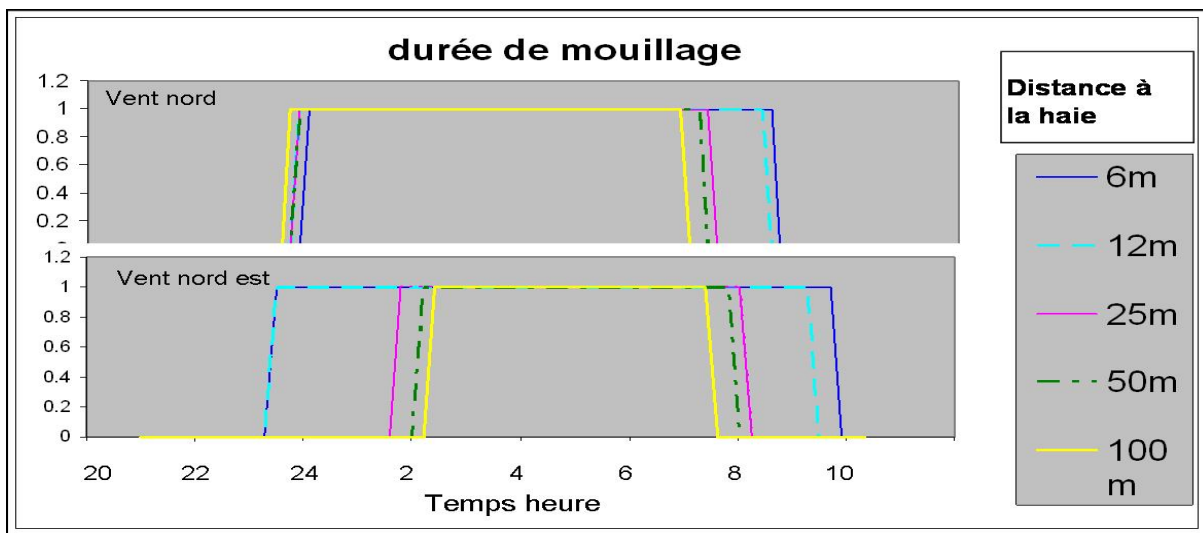
Le coefficient d'échange a été estimé à partir de la relation  $g_b = k Nu/d$ .  $Nu$ , le nombre de Nusselt, est un nombre adimensionnel qui caractérise les transferts thermiques. Il s'exprime en fonction du nombre de Reynolds qui est lui-même dépendant de la vitesse du vent.

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.

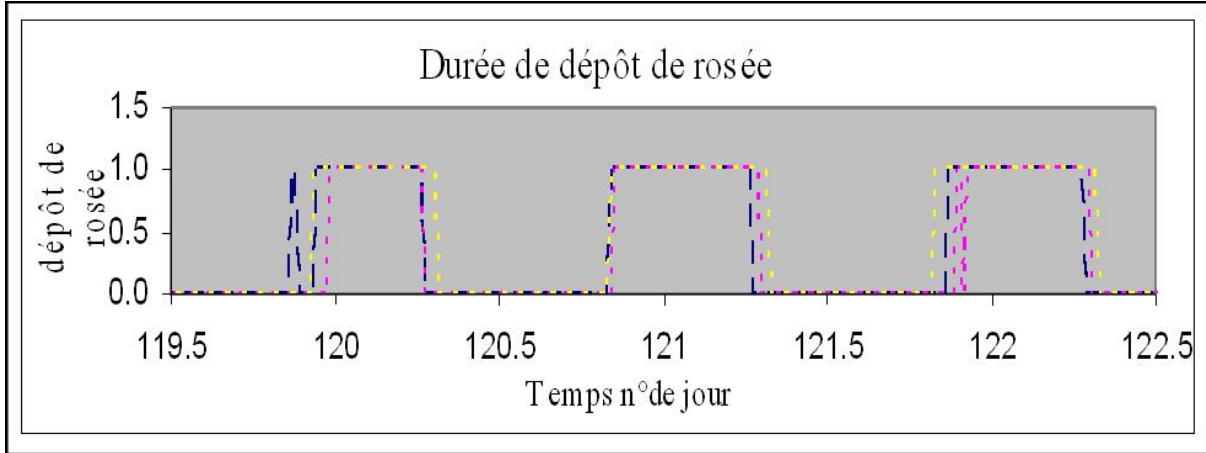


**Figure 11** : Dépôt de rosée au cours de 2 nuits pour des capteurs placés à différentes distances d'une haie orientée Nord – Sud.

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.



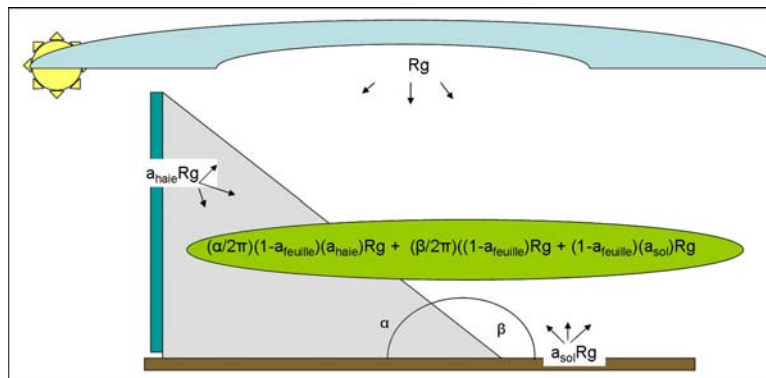
**Figure 12** : Dépôt de rosée en rouge mesuré par des capteurs en bleu estimé et en jaune par observation oculaire. L'échelle de dépôt de rosée marche en tout ou rien : on note 1 quand il y a de la rosée et 0 quand c'est sec.

## 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 :

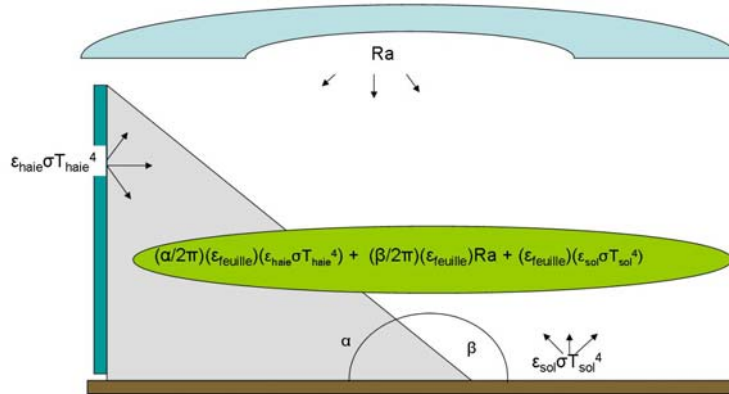
$R_n = R_s + R_l - n \varepsilon \sigma T_f^4$  (1.2)  $R_s$  et  $R_l$  représentent pour la feuille, le bilan, des courtes et des grandes longueurs d'onde.

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



**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





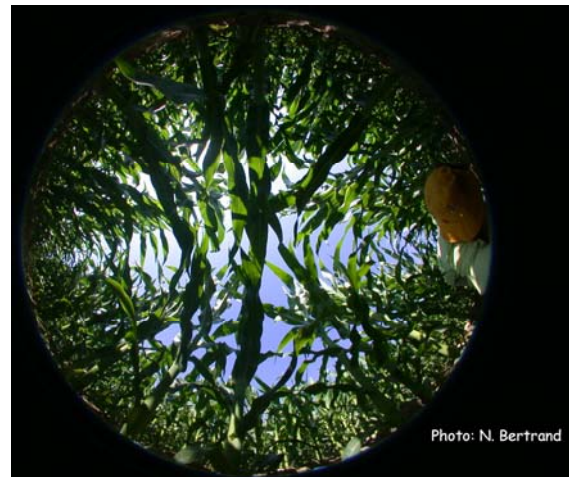
## CAN-EYE, logiciel de traitement d'images pour l'estimation de l'indice foliaire

Marie Weiss<sup>1</sup>, Frédéric Baret<sup>1</sup>, Benoît de Solan<sup>1,2</sup>, Valérie Demarez<sup>3</sup>, Nadine Bertrand<sup>1</sup>

**Résumé :** Nous présentons le freeware CAN-EYE, logiciel de traitement d'images pour l'estimation des variables de structure des couverts végétaux comme la fraction de trou, le LAI ou le fAPAR à partir de la prise de photographies numériques dans la végétation. Dans un premier temps, nous décrivons le fonctionnement du logiciel et nous définissons les différentes variables estimées à partir de la fraction de trou, puis nous terminons par deux exemples de résultats qui montrent l'aptitude et l'intérêt de la photographie numérique et de CAN-EYE pour la mesure de ces variables.

**Mots clés :** traitement d'images, LAI, PAI, classification, fraction de trou, pourcentage de couverture

**Photo :** maïs ©Inra/Nadine Bertrand



### Introduction

L'indice foliaire (ou LAI, Leaf Area Index, qui correspond à la demi-surface développée des éléments verts rapportée à 1m<sup>2</sup> de sol horizontal), la fraction de couverture du sol (pourcentage de végétation vue sur le sol) ou encore la fraction de rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par la végétation (fAPAR) sont des variables clés du fonctionnement de la végétation. Il est donc nécessaire de les quantifier afin de déterminer les entrées des modèles utilisés ou développés à l'Inra ou encore de valider les simulations d'autres modèles (modèles de culture de type STICS, modèles de prairie de type PASIM...).

La mesure dite « directe » d'indice foliaire consiste à prélever l'ensemble des feuilles de la végétation sur 1 m<sup>2</sup> de sol, puis à mesurer la totalité de leur surface avec un planimètre. Afin d'assurer une représentativité de cette mesure dans une parcelle de culture, de prairie ou de forêt, il faut répéter ces prélèvements à plusieurs endroits de la parcelle. La mise en place de telles mesures nécessite donc beaucoup de main d'œuvre et de temps. De plus, elles sont destructives, ce qui pose des problèmes lorsque l'on souhaite effectuer un suivi temporel de la parcelle.

<sup>1</sup>Inra UMR 1114 Environnement méditerranéen et modélisation des agro-hydrosystèmes, F-84914 Avignon

☎ 04 32 72 23 79

✉ [marie.weiss@avignon.inra.fr](mailto:marie.weiss@avignon.inra.fr)

<sup>2</sup> ARVALIS Institut du végétal, station expérimentale, F-91720 Boigneville

<sup>3</sup> CESBIO -Centre d'études spatiales de la biosphère-, 18 avenue E. Belin, F-31401 Toulouse Cedex 9

Pour remédier à ces inconvénients, des méthodes dites de « mesures indirectes » ont été mises en place. Elles sont non destructives et sont toutes basées sur une mesure de la transmittance du couvert végétal, c'est-à-dire du rapport entre la quantité de rayonnement incident (au-dessus du couvert végétal) et la quantité de rayonnement transmis à l'intérieur de ce couvert. Autrement dit, cela revient à mesurer le pourcentage de trous (ou fraction de trou) vus lorsque l'on vise dans une direction donnée. Une revue complète des méthodes indirectes (et directes) est fournie dans Bréda *et al*, (2003) et Jonckheere *et al* (2004).

Parmi les méthodes indirectes, l'utilisation de la photographie hémisphérique a pris un essor considérable ces dernières années du fait de l'accessibilité aux appareils photographiques numériques et des possibilités actuelles de calcul des ordinateurs qui rendent l'utilisation de cette technique très attractive. Les appareils photographiques peuvent être équipés d'une lentille « fish-eye » (angle d'ouverture de 180°) pour évaluer la fraction de trou dans toutes les directions. Le freeware CAN-EYE ( [http://www.avignon.inra.fr/can\\_eye/](http://www.avignon.inra.fr/can_eye/) ), que nous avons développé, permet de traiter les images acquises avec de tels systèmes afin de déterminer d'une part la fraction de trou de la végétation et, d'autre part d'en déduire des variables biophysiques des couverts végétaux telles que le LAI ou le fAPAR, via l'inversion de modèles de transfert radiatifs.

## 1. Comment CAN-EYE fonctionne-t-il ?

Contrairement à la plupart des logiciels existants, CAN-EYE traite plusieurs photos acquises au-dessus d'une même parcelle en même temps, ce qui réduit le temps de traitement (entre 2 mn et 20 mn selon la complexité des photos). De plus, il est possible de réaliser des masques sur les photos pour éliminer les parties indésirables (pieds de l'utilisateur, par exemple, lorsque l'image est acquise au-dessus du couvert). Il est possible de traiter aussi bien des images acquises au-dessus du couvert végétal (visée vers le sol), lorsque celui-ci est bas, qu'acquises en-dessous du couvert (par exemple, pour les forêts, visée vers le ciel), dans trois types de configuration : photographie hémisphériques (fish-eye), photographies panoramiques (pas d'utilisation de lentille) acquises à la verticale du couvert végétal ou photographies panoramiques prises avec un appareil photo incliné à 57,5°. Enfin, pour des raisons de traçabilité, toutes les étapes effectuées sont sauvegardées dans un rapport html et les résultats dans des fichiers au format texte ou excel.

CAN-EYE fonctionne en trois étapes principales (**figure 1**) :

- la première étape consiste à déterminer les paramètres du traitement : étalonnage de l'appareil photographique muni de la lentille fish-eye, résolution angulaire pour le calcul de la fraction de trou, format des fichiers de sortie ;
- la deuxième étape consiste à traiter les images, donc à déterminer quelle est la partie utile de l'image (masquage de certaines parties de l'image) et quels sont les pixels dans cette partie qui correspondent à de la végétation, quels sont ceux qui correspondent à des trous (c'est-à-dire du sol, si les photos sont prises au-dessus de la végétation ou bien du ciel si les photos sont prises en dessous de la végétation). Cette étape consiste principalement à appliquer une méthode de classification supervisée sur les images ;
- la troisième étape consiste à calculer les variables biophysiques d'intérêt à partir des images classifiées, par inversion de modèles de transfert radiatif.

Le freeware a été développé sous matlab®. Il est disponible sous forme de fichier exécutable pour windows. Avant de lancer CAN-EYE, il est nécessaire d'installer la librairie « MATLAB



Component Runtime » fournie avec le logiciel. Les images doivent être en format jpeg ou tiff, formats délivrés par l'ensemble des appareils photographiques numériques existants.

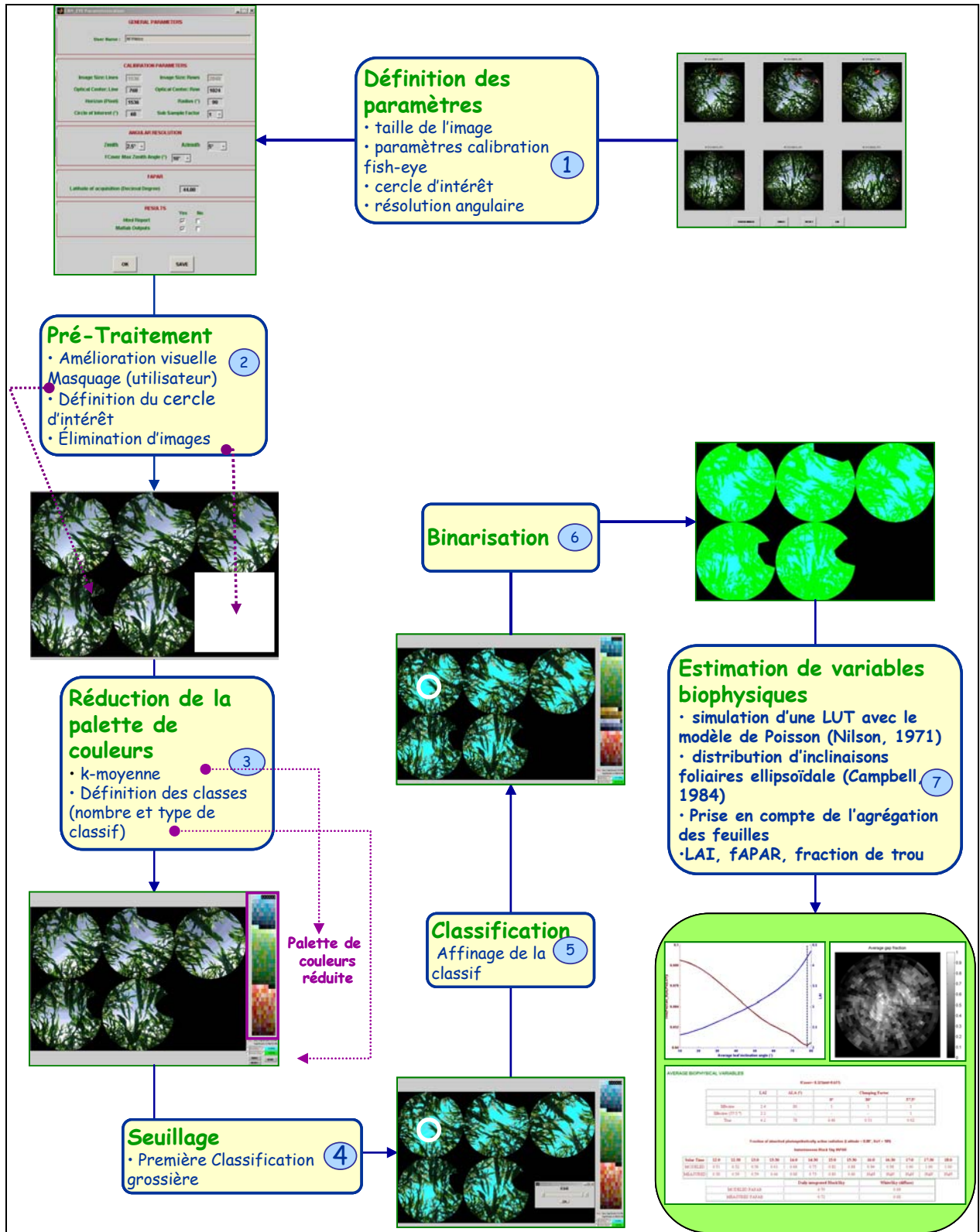


Figure 1 : Schéma typique de traitement de 6 photos acquises dans un couvert de maïs, prises en vue de dessous avec un appareil photo numérique équipé d'une lentille fish-eye

## 1.1 Paramétrage de CAN-EYE

Afin de traiter des images hémisphériques, il faut étalonner l'appareil photographique et la lentille fish-eye, à savoir déterminer la position du centre optique dans les images et la loi de projection du système. On suppose une loi de projection polaire (ce qui est le cas pour la plupart des lentilles), c'est-à-dire que les distances angulaires entre objets sont proportionnelles à la distance radiale en pixels dans le plan image. Il est donc nécessaire de connaître le centre optique, l'angle d'ouverture de la lentille en degrés et le diamètre maximal de l'image hémisphérique en pixels pour caractériser le système.

Selon le type de lentille fish-eye utilisée (grand angle d'ouverture) CAN-EYE propose aussi de limiter la partie de l'image utile. En effet, pour des angles de visée élevés (sur les bords de l'image), la résolution de l'image n'est pas assez bonne et, selon le type de couvert végétal étudié, on observe essentiellement des pixels mixtes, pour lesquels, par définition, il est impossible de distinguer la végétation des trous.

Enfin, l'utilisateur doit renseigner le logiciel sur la résolution angulaire avec laquelle il souhaite calculer la fraction de trou : plus celle-ci sera fine, plus les calculs seront précis mais avec un temps de traitement croissant (**figure 1, point 1**).

## 1.2 Traitement des images

La première étape du traitement des images consiste à sélectionner de façon interactive les images d'un répertoire que l'on souhaite traiter en même temps (élimination d'images floues ou surexposées ou encore d'images qui ne font pas partie du traitement). L'utilisateur peut ensuite changer la luminosité des images pour permettre une meilleure discrimination visuelle des éléments de végétation. Enfin, il est également possible de masquer, de manière interactive, une ou des parties d'image (objets insolites comme les pieds de l'utilisateur).

A l'issue de ces différentes sélections (**figure 1, point 2**), l'utilisateur peut passer à l'étape de classification qui lui permet (**figure 1, point 5**) :

- soit de sélectionner des pixels et de les classer dans une classe donnée. Dans ce cas tous les pixels de l'ensemble des images ayant la même couleur que le pixel sélectionné seront classés dans la même classe ;
- soit de sélectionner une couleur dans la palette de couleur réduite comme appartenant à une des classes (324 couleurs **figure 1, point 3**). Dans ce cas tous les pixels de l'ensemble des images ayant la même couleur seront classés dans la même classe.

Au préalable, l'utilisateur, en fonction des images à traiter, a trois options pour accélérer de manière significative le temps de traitement :

- la première est de ne classer que les pixels appartenant à la végétation et tous les pixels non classés sont considérés comme des trous ;
- la deuxième correspond à l'inverse c'est-à-dire classer les pixels appartenant aux trous, les autres étant considérés comme de la végétation ;
- la troisième consiste à classer d'une part les pixels appartenant à la végétation, d'autre part les trous et à laisser CAN-EYE classer les pixels mixtes restants en fonction de leur distance en termes de couleur à chaque classe.

Il est à noter qu'avec les deux premières options le temps de traitement est plus rapide et elles sont généralement suffisantes pour estimer avec une bonne précision le LAI. Pour aider à la classification CAN-EYE propose un prétraitement des images par un seuillage des images basé sur la luminosité, un indice de vert et un indice de brun (**figure 1, point 4**).



Suite à l'étape de classification, on obtient des images binaires (trous/végétation). CAN-EYE effectue ensuite une moyenne pondérée de ces images en fonction des zones masquées pour produire une image en fraction de trou bidirectionnelle à partir de laquelle les variables biophysiques d'intérêt (**figure 1, point 6**).

### 1.3 Estimation des variables biophysiques

Une description détaillée des différentes hypothèses, modèles et méthodes résumées dans cet article se trouve dans Weiss *et al* (2004) et Jonckheere *et al*, (2004).

#### 1.3.a De la fraction de trou au LAI

La variable mesurée, grâce à la prise de photographie numérique est la fraction de trou bidirectionnelle  $P_0(\theta_v, \varphi_v)$  qui dépend des directions zénithale ( $\theta_v$ ) et azimutale ( $\varphi_v$ ) et qui est reliée à l'indice foliaire suivant (Nilson, 1971) :

$$P_0(\theta_v, \varphi_v) = e^{-\lambda_0 \cdot G(\theta_v, \varphi_v) \cdot LAI / \cos(\theta_v)} \quad \text{Eq 1}$$

Où

- $\lambda_0$  est le paramètre d'agrégation des feuilles qui décrit le fait que les feuilles ne sont pas distribuées aléatoirement dans le couvert mais qu'elles sont « agrégées » autour d'un même plant ou d'une même branche par exemple.
- $G(\theta_v, \varphi_v)$  est la fonction de projection des feuilles dans la direction  $(\theta_v, \varphi_v)$ . Dans CAN-EYE, on utilise le modèle de distribution ellipsoïdale des inclinaisons foliaires (Campbell, 1986 ; Campbell, 1990 ; Wang and Jarvis, 1988), caractérisé par un angle moyen d'inclinaison foliaire (ALA : Average Leaf Angle).

On peut également calculer la fraction de trou monodirectionnelle qui correspond à la fraction de trou bidirectionnelle intégrée sur la direction azimutale et ne dépend donc plus que de l'angle zénithal de visée.

#### 1.3.b Estimation du LAI et de l'angle d'inclinaison des feuilles à partir de mesures de fraction de trou

En utilisant l'équation 1, il existe plusieurs manières d'estimer l'indice foliaire :

- utilisation d'une seule direction ( $\theta_v=57.5^\circ$ ) : pour cette direction particulière, il a été montré (Warren-Wilson, 1963) que la fraction de trou est indépendante des inclinaisons foliaires et que  $G(\theta_v, \varphi_v) \approx 0.5$ , ce qui implique donc :

$$LAI_{57} = \frac{-\ln(P_0(57.5^\circ))}{0.93} \quad \text{Eq 2}$$

Cette technique peut-être appliquée de deux façons avec CAN-EYE : soit par l'utilisation d'un appareil équipé d'une lentille fish-eye, dans ce cas seul l'anneau zénithal de fraction de trou autour de l'angle  $57,5 \pm 2,5^\circ$  est utilisé pour le calcul du LAI ; soit par l'utilisation d'un appareil photographique (sans lentille) incliné à  $57,5^\circ$  par rapport à la verticale ;

- utilisation de directions multiples (appareil photographique équipé d'une lentille fish-eye) : l'estimation du LAI et de l'angle d'inclinaison foliaire se fait en inversant le modèle décrit par l'équation 1. L'inversion est basée sur l'utilisation de tables de correspondance ou Look-Up-Table (LUT) (Weiss *et al.*, 2000). Dans ce cas, il est possible de tenir compte

ou non ( $\lambda_o=1$ ) de l'agrégation des feuilles et donc d'estimer deux valeurs de LAI : le LAI effectif et le LAI vrai, sachant que  $LAI_{eff} = \lambda_o LAI_{vrai}$ , ainsi que les angles d'inclinaison des feuilles associés. Le  $LAI_{vrai}$  devrait être proche du LAI tel que mesuré par un planimètre.

### 1.3. c LAI ou PAI ?

Il est à noter que lorsque l'on réalise des mesures par des méthodes indirectes (basées sur la fraction de trou), il est plus rigoureux de parler de PAI (Plant Area Index) plutôt que de LAI (Neumann *et al.*, 1989). En effet, les éléments de végétation verte peuvent également être des tiges ou des épis (dans le cas d'une culture de blé).

### 1.3.d Calcul de la fraction de couverture du sol

Elle est définie comme la fraction de sol couvert par la végétation vue dans la direction du nadir (à la verticale), soit :

$$fCover = 1 - P_o(0) \quad \text{Eq 3}$$

Elle peut être obtenue, soit en utilisant un appareil muni d'un fish-eye (et en extrayant la partie des images correspondant aux directions proches de la verticale), soit en utilisant simplement un appareil photographique (sans fish-eye) visant le couvert végétal à la verticale.

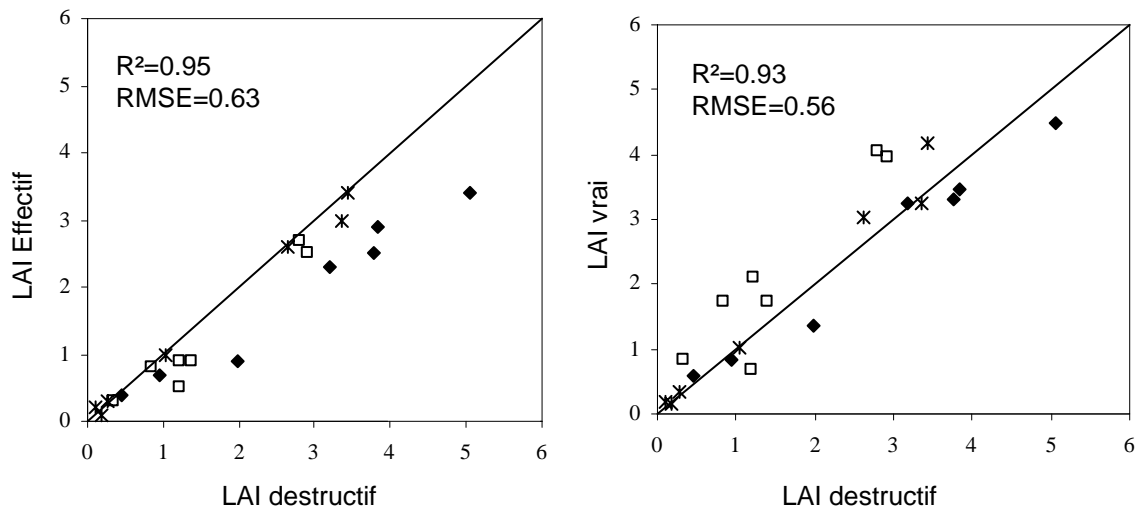
### 1.3.e Calcul du fAPAR

Le fAPAR est la fraction de rayonnement photosynthétiquement actif (400 – 700 nm) absorbé par le couvert. Il varie en fonction de la position du soleil, donc de la date et de la latitude auxquelles sont acquises les images (paramètres d'entrée de CAN-EYE). La composante directe du fAPAR peut être approchée comme la fraction de rayonnement direct intercepté par la végétation, c'est-à-dire, 1 moins la fraction de trou dans la direction du soleil. On peut alors calculer le fAPAR direct, intégré sur la journée en calculant la trajectoire du soleil pour la date et la latitude. On peut également calculer la composante diffuse du fAPAR (rayonnement diffus absorbé par la végétation) en intégrant la fraction de trou monodirectionnelle sur l'angle zénithal.

## 2. Quelques exemples de résultats

### 2.1 Estimation du PAI à partir de directions de visée multiples

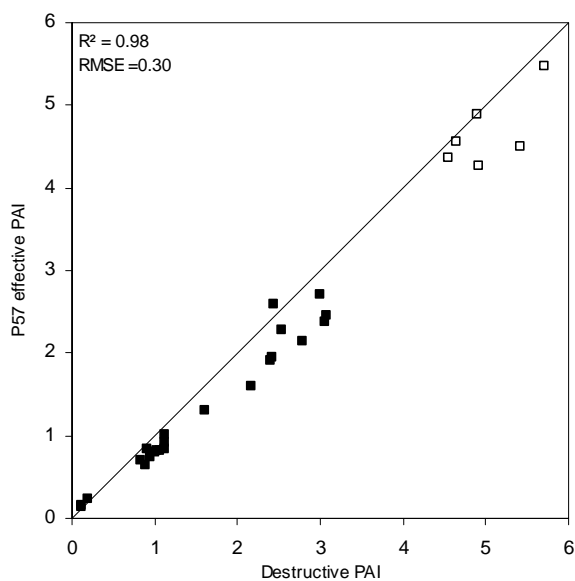
La **figure 2** présente les résultats obtenus par Demarez *et al* (2008) pour la comparaison des PAI effectif et vrai obtenus avec CAN-EYE sur 3 parcelles (maïs, tournesol, blé) en 2004 et en 2005. Si la corrélation entre les deux types de mesures est très bonne ( $R=0,95$ ), on observe un biais systématique de sous-estimation du PAI destructif par le PAI effectif de CAN-EYE car les 3 types de parcelles correspondent à des couverts agrégés. Lorsque l'on compare les mesures destructives aux PAI vrai de CAN-EYE, l'adéquation reste bonne ( $R^2 = 0,93$ ) et l'erreur d'estimation est réduite ( $RMSE = 0,56$ ), il n'y a plus de sous-estimation systématique.



**Figure 2 :** Comparaison entre les mesures CAN-EYE de PAI (effectif à gauche, vrai à droite) et des mesures destructives acquises sur du maïs (symboles pleins), du tournesol (carrés) et du blé (étoiles).

## 2.2 Estimation du PAI à partir d'une seule direction de visée

La **figure 3** présente les résultats obtenus par Baret *et al* (2008) sur des mesures acquises sur 7 parcelles de blé et une parcelle de Triticale entre 2006 et 2008. L'acquisition des images étaient réalisées à 1 m au-dessus du couvert de blé, avec un appareil incliné à  $57,5^\circ$  par rapport à la verticale (**Eq 2**). Les résultats montrent une très bonne adéquation entre les valeurs estimées par CAN-EYE et les mesures destructives avec un coefficient de corrélation  $R^2$  de 0,98 et une erreur au sens des moindres carrés (RMSE) de 0,3. La comparaison de ces mesures avec des mesures réalisées avec le LAI-2000 montre aussi une bonne adéquation entre les deux méthodes ( $R^2 = 0,94$  et  $RMSE = 0,24$ ) avec une sous estimation du PAI par le LAI-2000 certainement due au fait que le LAI-2000, placé au sol (contrairement à l'appareil photo qui est placé à 1m au-dessus du couvert végétal), a une certaine épaisseur et que par conséquent, la végétation qui se trouve en-dessous de l'instrument n'est pas prise en compte.



**Figure 3 :** Comparaison entre le PAI mesuré de façon destructive avec le PAI estimé à partir de CAN-EYE. Les photos rectangulaires sont acquises avec un appareil incliné à  $57,5^\circ$  par rapport à la verticale sur du blé. Les symboles vides correspondent aux mesures acquises après le stade floraison, les symboles pleins à des mesures prises avant le stade élancement maximale de la tige.

### 3. Conclusion

La prise de photographie dans les couverts végétaux conduit à l'obtention d'informations pertinentes et précises sur la structure de la végétation. Contrairement à la méthode destructive, elle permet d'échantillonner de plus grandes surfaces et d'effectuer un grand nombre de répétitions dans l'espace et dans le temps (suivi d'un même échantillon sur un cycle cultural complet par exemple) sans perturber le comportement de la végétation. Le freeware CAN-EYE offre un traitement facile et assez rapide des photos hémisphériques. La version 6.1 ([http://www.avignon.inra.fr/can\\_eye](http://www.avignon.inra.fr/can_eye)) est actuellement en test et elle sera disponible fin 2008 : le traitement des images par le logiciel (masquage, découpage, classification) a été repensé pour prendre en compte des images de plus en plus résolues (et donc de plus en plus gourmandes en mémoire). CAN-EYE V6.1 propose également de nouvelles fonctionnalités comme la mise en place d'une technique pour étalonner les systèmes appareil photo/fish-eye, la prise en compte de la pente selon le modèle d'España *et al.* (2008), d'autres possibilités de calculer le LAI effectif (équation de Miller, calcul du LAI-2000). Pour les versions futures, une attention particulière sera donnée aux problèmes liés à l'estimation du facteur d'agrégation.

### 4. Bibliographie

[http://www.avignon.inra.fr/can\\_eye](http://www.avignon.inra.fr/can_eye)

- Bréda N.J.J. (2003) Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of experimental botany*, 54: 2403-2417.
- Campbell G.S. (1986) Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. *Agric. For. Meteorol.*, 36: 317-321.
- Campbell G.S. (1990) Derivation of an angle density function for canopies with ellipsoidal leaf angle distributions. *Agric. For. Meteorol.*, 49: 173-176.
- Demarez V., Duthoit S., Baret F., Weiss M. and Dedieu G. (2008) Estimation of leaf area and clumping indexes of crops with hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(4): 644-655
- Baret F., DeSolan B., and Weiss M. (2008) PAI estimates from digital photos at 57.5° zenith angle over wheat crops. *Agric. For. Meteorol.*, submitted.
- España M.-L., Baret F. and Weiss M. (2008) Slope correction for LAI estimation from gap fraction measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(10): 1553-1562.
- Jonckheere I. *et al.*, (2004) Reviews of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors, and hemispherical photography. *Agric. For. Meteorol.*, 121: 19-35.
- Neumann H.H., Hartog G.D. and Shaw, R.H. (1989) Leaf area measurements based on hemispheric photographs and leaf-litter collection in a deciduous forest during autumn leaf-fall. *Agric. For. Meteorol.*, 45: 325-345.
- Nilson T. (1971) A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands. *Agric. Meteorol.*, 8: 25-38
- Wang Y.P. and Jarvis P.G. (1988) Mean leaf angles for the ellipsoidal inclination angle distribution. *Agric. For. Meteorol.*, 43: 319-321.
- Warren-Wilson J. (1963) Estimation of foliage denseness and foliage angle by inclined point quadrats. *Aust. J. Bot.*, 11: 95-105.
- Weiss M., Baret F., Myneni R.B., Pragnère A. and Knyazikhin Y. (2000) Investigation of a model inversion technique to estimate canopy biophysical variables from spectral and directional reflectance data. *Agronomie*, 20: 3-22.
- Weiss M., Baret F., Smith G.J. and Jonckheere I. (2004) Methods for *in situ* leaf area index measurement, part II: from gap fraction to leaf area index: retrieval methods and sampling strategies. *Agric. For. Meteorol.*, 121: 17-53.

## Détermination du pas de temps de mesure du rayonnement global, sans effet sur la mesure journalière vis-à-vis du rayonnement global de référence

*Pascal Thiébeau<sup>1</sup> et Christian Herre<sup>1</sup>*

2

**Résumé :** *L'autonomie d'alimentation électrique des stations météo mobiles est un problème récurrent. L'une des manières d'assurer la plus longue autonomie possible est d'espacer l'intervalle des mesures élémentaires pour un capteur donné. La question est alors de savoir quel intervalle de mesure conservera une qualité de mesure proche des mesures de capteurs de référence. La mesure du rayonnement global est précisément l'une des mesures pour laquelle cet intervalle doit être déterminé avec rigueur.*

**Mots-clés :** Rayonnement global, intervalle de mesure, mesure de référence



**Photo 1 :** *Dispositif de mesure du rayonnement global*

---

<sup>1</sup> UMR614 Fractionnement des agroressources et environnement  
FARE INRA-Univ. Reims - F-51686 Reims Cedex 2 ☎ 03 26 77 35 89 - [thiebeau@reims.inra.fr](mailto:thiebeau@reims.inra.fr)

<sup>2</sup> La revue a édité cet article dans le numéro 59 et compte tenu de son sujet, le comité d'édition du numéro spécial « Pratiques et outils de mesure des rayonnements naturels entre les domaines visible, solaire et infrarouge » a jugé intéressant de le rééditer dans ce numéro.

## Introduction

La mesure du rayonnement global est une mesure élémentaire des stations météo de référence. En effet, cette donnée est une variable d'entrée des formules de calculs d'estimation de l'évapotranspiration potentiel d'un couvert végétal, ce qui aide au pilotage d'irrigations, ainsi que des modèles de croissance écophysiologicals, afin de modéliser le développement foliaire des peuplements végétaux et leur accroissement de biomasse.

L'autonomie d'alimentation électrique des stations météo mobiles étant limitée, il est nécessaire de bien adapter la fréquence des mesures de chaque capteur. En effet, sur une station météo de référence (agrée Météo France et/ou du parc national Inra), cette mesure est réalisée toutes les 3 à 5 secondes selon les modèles, ce qui n'est pas envisageable pour des stations mobiles. C'est pourquoi après avoir présenté brièvement les caractéristiques techniques des capteurs de rayonnements utilisés et les limites des centrales d'acquisition associées, nous présenterons les résultats obtenus à partir de 3 capteurs de rayonnement global et le test de 12 pas de temps de mesure différents.

Nous définirons ainsi l'intervalle maximum entre 2 mesures élémentaires permettant de conserver une mesure du rayonnement global similaire aux mesures de référence.

## 1. Matériels et méthode

### 1.1 Présentation des capteurs de rayonnement global

Les domaines spectraux des pyranomètres testés englobent les bandes utiles à la photosynthèse des plantes (400-750 nm) ; ils conviennent donc à une utilisation dans le domaine de l'agronomie.

Trois pyranomètres ont été utilisés pour réaliser cette étude. Ils se répartissent en 2 types :

- 2 pyranomètres construits par CIMEL ELECTRONIQUE<sup>3</sup>, modèle CE 180 (capteurs 1 et 2). Ils réalisent des mesures dans les bandes spectrales comprises entre 300 et 2500 nm. Ils ne comportent qu'une seule coque de verre ;
- 1 pyranomètre construit par KIPP & ZONEN<sup>4</sup>, modèle CM6B (capteur 3). Son domaine de mesure spectral se situe entre 305 et 2800 nm. Il comporte deux coques de verre.

Les coques de verre ont été régulièrement nettoyées lors des mesures, afin de ne pas gêner la réception de la lumière. Les thermocouples situés sous une pastille noire du dôme interne, sont protégés des chocs éventuels et des conditions climatiques. L'absence d'humidité sous la coque est assurée à l'aide d'une cartouche de séchage contenant du sel de silicagel remplacé chaque fois que la couleur bleu foncé commence à s'estomper.

Les capteurs sont placés sur un mât, à une hauteur du sol de 2 m, en position parfaitement horizontale contrôlé à l'aide d'une bulle de niveau et d'une vis de réglage. Un câble de 10 m les relie à la centrale d'acquisition de données.

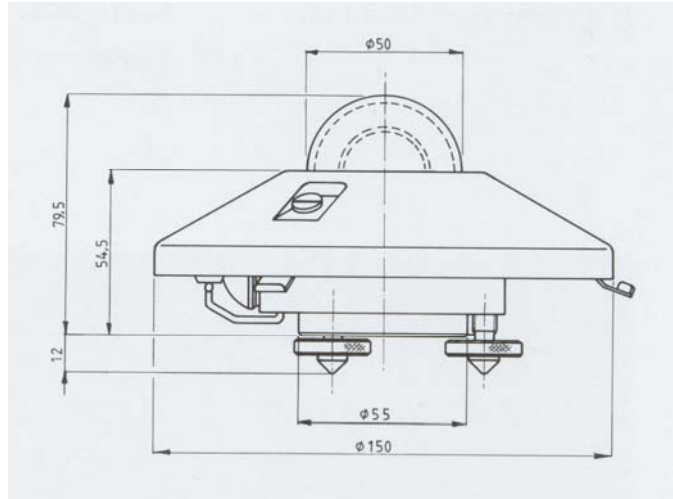
---

<sup>3</sup> CIMEL ELECTRONIQUE, 5 cité de Phaslbouurg, Paris, France

<sup>4</sup> KIPP & ZONEN, Röntgenweg 1, Netherlands



**Photo 2** *Capteur de rayonnement global double coque (CM6B)*



**Schéma 1** : *Capteur de rayonnement global double coque (CM6B)*

## 1.2 Présentation de la centrale de mesure et du protocole d'échantillonnage

La centrale d'acquisition de données est une Grant<sup>5</sup> de la série Ecureuil 1250. Elle fonctionne sur piles internes, complétées d'une batterie externe de 9 à 14 V. Elle est utilisée dans une plage de température comprise entre -30°C et +65°C. Sa mémoire accepte jusqu'à 84 000 mesures qui sont sauvegardées même si les piles viennent à faillir.

Le protocole d'échantillonnage peut être de l'ordre de quelques secondes. Mais le cadre d'utilisation général ne descendant jamais sous le pas de la minute, nous avons conservé ce seuil comme unité de mesure élémentaire.

Le dispositif de mesure a été mis en place à côté de la station météo Inra de Fagnières, dans la Marne, qui sert de station de référence. En effet, ses capteurs font l'objet d'un contrôle annuel, avec production d'un certificat d'étalonnage de la part des services techniques d'AgroClim du Centre Inra d'Avignon.

Pour cette étude, les mesures ont été réalisées du 23 février 2004 au 3 avril 2006 inclus.

## 1.3 Traitement et validation des données

Les pas de temps de mesure retenus correspondent à des multiples de 60 minutes ; en effet, l'acquisition de variables climatiques, comme la pluviométrie, est réalisée au pas d'une heure, en exploitation habituelle de ces centrales. Toutes les voies de la centrale font donc l'objet d'un enregistrement horaire en mémoire et ne peuvent avoir un autre pas. Il est toutefois possible de réaliser des mesures intermédiaires dont seule la moyenne horaire est conservée en mémoire sous réserve qu'il s'agisse d'un multiple de 60 minutes. C'est pourquoi les pas testés au cours de cette étude sont au nombre de 12, ce qui correspond à une mesure toutes les : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20, 30 et 60 mn. Dans ce travail, les valeurs élémentaires ont

<sup>5</sup> Grant Instruments Ltd, Barrington, Cambridge, CB2 5QZ England

été acquises chaque minute pour les trois capteurs et elles ont fait l'objet d'un traitement informatique pour ne conserver que la mesure du pas de temps testé.

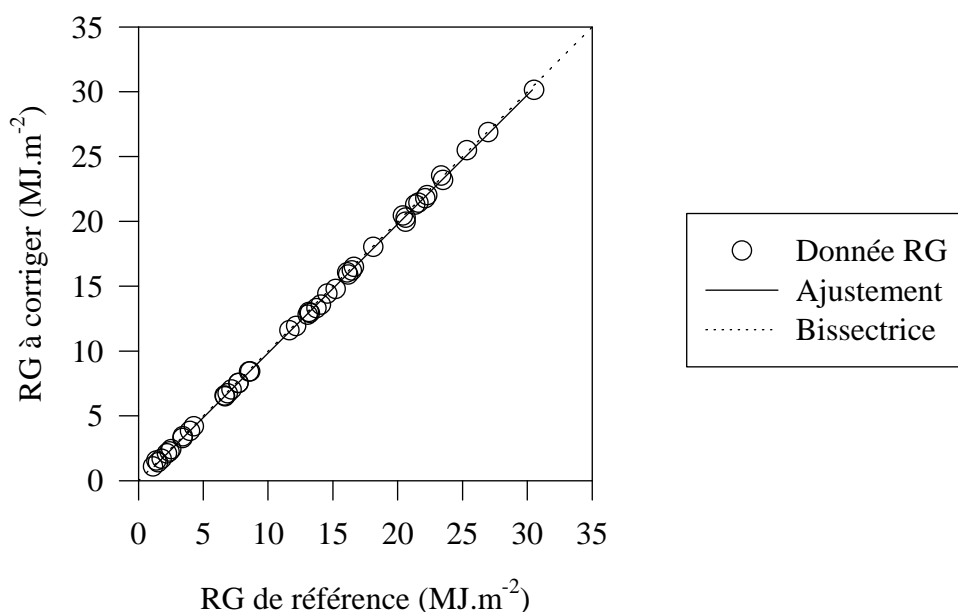
La mémoire de la centrale nous donne une autonomie d'acquisition de 19 jours complets. La base de données recueillie comporte 654 données journalières validées par comparaison aux données du capteur de rayonnement global de référence présent sur le site.

## 2. Résultats et discussion

### 2.1 Etalonnage des capteurs de rayonnement avant le test des pas de temps de mesure

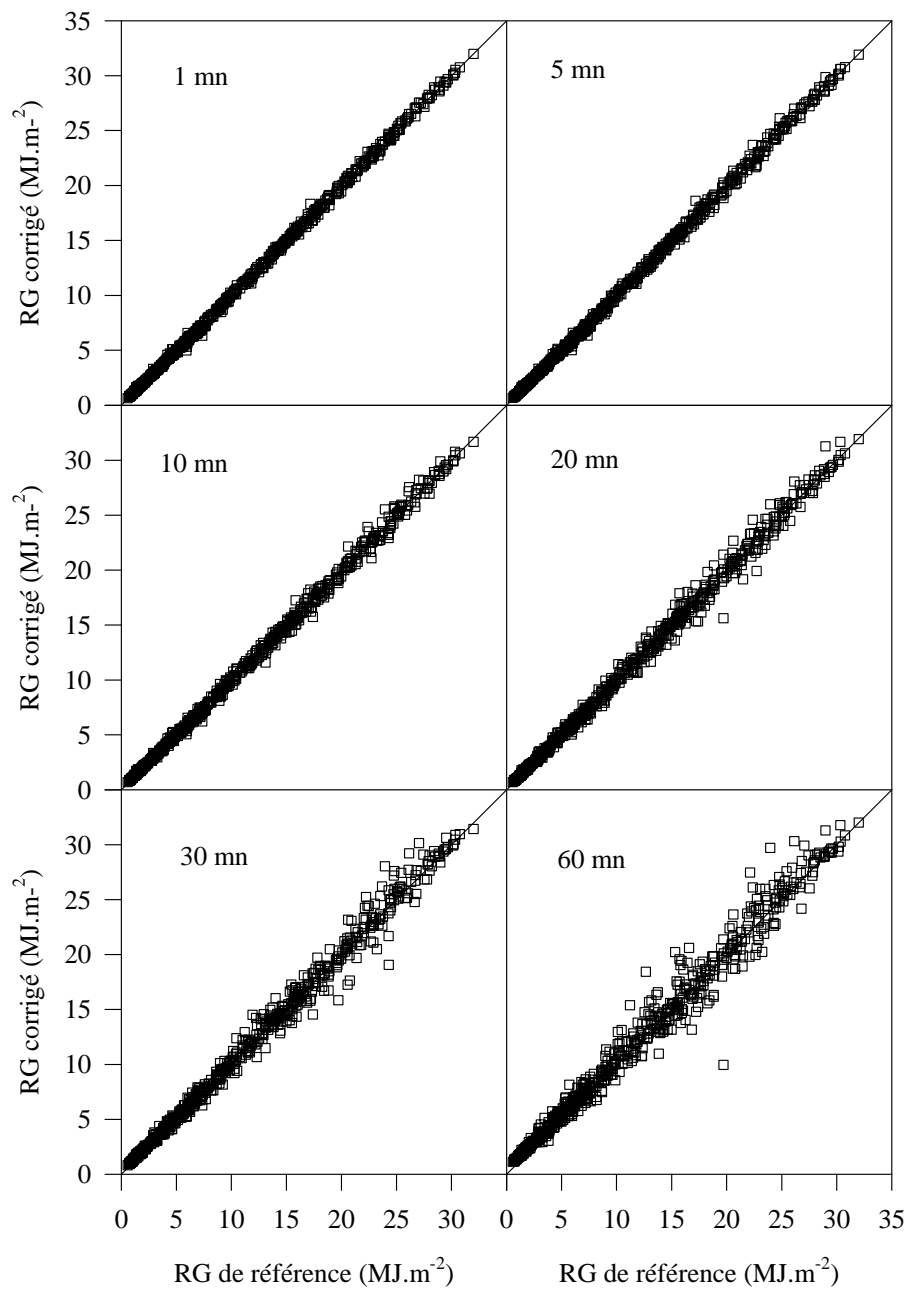
Au cours de la période de mesure, le pyranomètre de référence a été étalonné par AgroClim les 24/11/2003, 11/05/2005 et 30/03/2006. Dans l'intervalle des 2 premières dates, sa dérive n'a été que de 1,1%, tandis qu'il n'y en a pas eu durant la période suivante. Nous pouvons donc considérer comme « vraies » les valeurs de rayonnement global du capteur de référence au cours de la période de mesure concernée.

Pour corriger les valeurs de rayonnement des 3 capteurs utilisés, nous avons extrait de la base 45 données par tirage aléatoire. Ce nombre est celui habituellement retenu pour contrôler et corriger l'étalonnage des capteurs. La **figure 1** montre que cet échantillon est bien réparti dans la gamme de rayonnement observé au cours de la période de mesure.



**Figure 1** : Répartition des données de l'échantillon aléatoire.  
Exemple pour une acquisition au pas d'1 mn.





**Figure 2 :** Exemple de dispersion des points de mesures corrigés en fonction du rayonnement global de référence et selon quelques pas de temps de mesure retenus

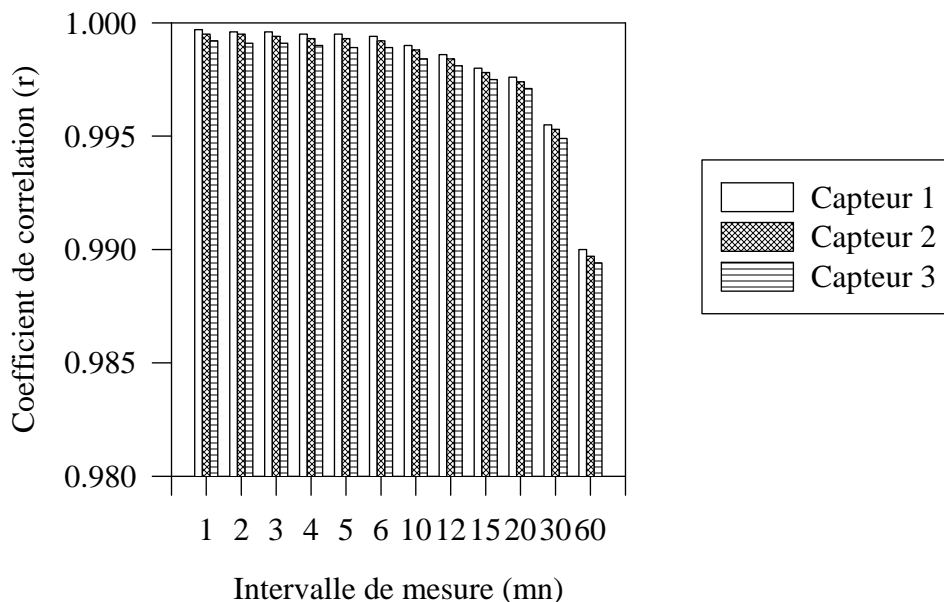
Un ajustement linéaire est ensuite calculé pour chaque capteur et chaque pas de temps de mesures retenu pour corriger les valeurs lues par les capteurs des valeurs réellement obtenues par le capteur de référence. Le calcul de la droite de correction, produit à la figure 1 pour le capteur de rayonnement 1 testé au pas de mesure d'1 mn, montre une dérive de mesure très faible vis-à-vis de la première bissectrice, ne justifiant pas nécessairement le calcul d'une droite de correction. Mais par rigueur de travail, tous les ajustements ont été calculés et toutes les données ont été corrigées *stricto sensu* de cette dérive.

## 2.2 Application des droites de correction aux données élémentaires et calculs des nouveaux ajustements

Les ajustements établis ci-dessus sont appliqués à l'ensemble de la base de données restante (609 valeurs) pour obtenir une valeur de rayonnement corrigée, produisant théoriquement une valeur conforme à celle obtenue par le capteur de référence. L'exemple produit à la **figure 2** montre qu'en fait, moins on intègre de mesures de rayonnement dans la valeur journalière du rayonnement global, plus les mesures se dispersent autour de la première bissectrice ; ce qui est un résultat attendu.

Le calcul des droites d'ajustements linéaires pour chacun de ces capteurs et pas de temps de mesure s'accompagne du calcul du coefficient de corrélation « r », qui peut être considéré comme un critère de qualité de l'ajustement obtenu.

La présentation de ce critère à la **figure 3** montre que l'on obtient pour les 3 capteurs testés la même évolution du coefficient selon le pas de temps de mesure retenu. Ainsi, on peut considérer qu'au-delà d'un pas de 5 à 6 mn, on perd de manière notable de la précision de mesure vis-à-vis d'une mesure réalisée par un capteur de rayonnement de référence.



**Figure 3 :** *Qualité des ajustements obtenus selon le pas de temps retenu pour l'estimation du rayonnement global journalier*

## Conclusion

Pour conserver une estimation correcte de la mesure du rayonnement global journalier vis-à-vis d'un capteur de rayonnement de référence, nous recommandons de ne pas espacer 2 prises de mesures de rayonnement de plus de 5 à 6 mn.

## Références

- GRANT, 1994. Squirrel Série 1250, Manuel d'instruction. 28 p.  
 CIMEL ELECTRONIQUE, 1994. Pyranomètre CE180. Fiche de description technique. 1p.  
 KIPP & ZONEN, 2000. Pyranomètre CM 6B. Fiche de description technique. 1p.