

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

Application aux fruits

André Marquier¹, Boris Adam¹, Lydie Guilioni², Marc Saudreau¹, Michaël Chelle³ & Hervé Sinoquet¹

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 bio-agresseurs.

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

¹ 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

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

³ 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 ρ 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

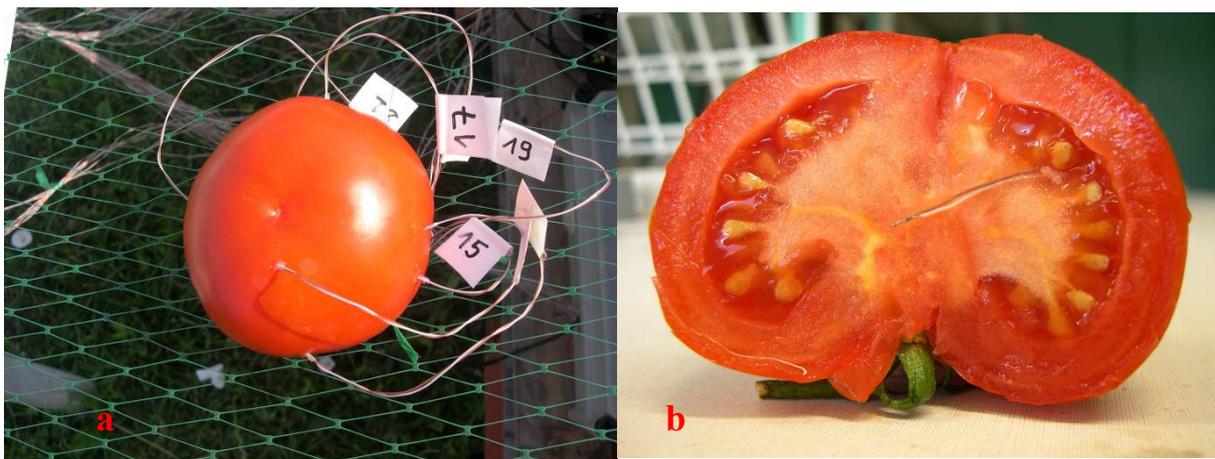
1.2.a Généralités

La première phase de l'expérimentation a consisté à caractériser la densité volumique ρ , 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 $R(\bar{x}, t)$ (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 $\lambda_E(\bar{x}, t)$ et le flux de chaleur convectif $\phi_c(\bar{x}, t)$ (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.

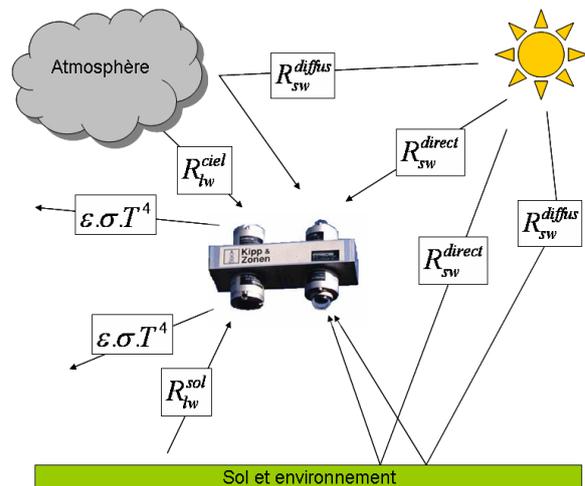


Figure 4 : Illustration des composantes mesurées par le bilanmètre CNR1 (Kipp & Zonen)

1.2.b Mesure du rayonnement

Le rayonnement net $R(\bar{x}, t)$ 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 $R(\bar{x}, t)$ en une composante de courte longueur d'onde $R_{sw}(\bar{x}, t)$ 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 $R_{lw}(\bar{x}, t)$ correspondant au rayonnement atmosphérique, à l'émission

du fruit et à l'émission thermique de son environnement (sol, arbre, haie, etc.) (TIR, de 5 μm à 50 μm). 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, ε 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 ε 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 pyr géomètres 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 pyr géomètres 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).

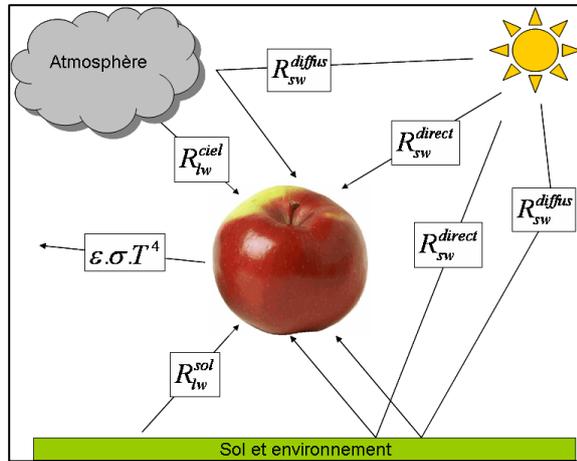


Figure 5 : Composantes du rayonnement mesurées

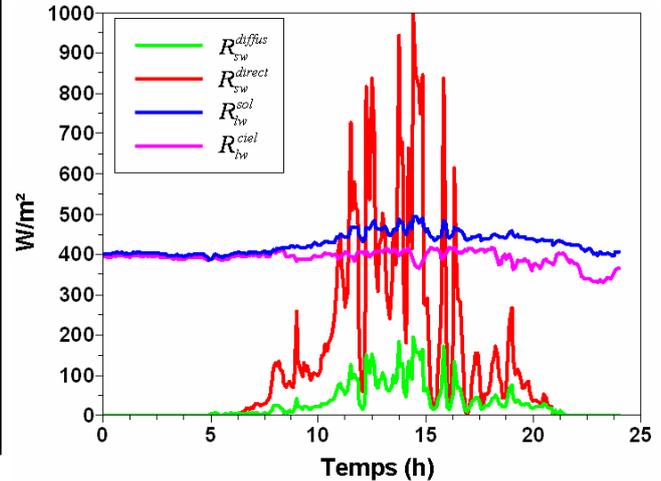


Figure 6 : Exemple de rayonnements mesurés lors d'une journée d'été

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.

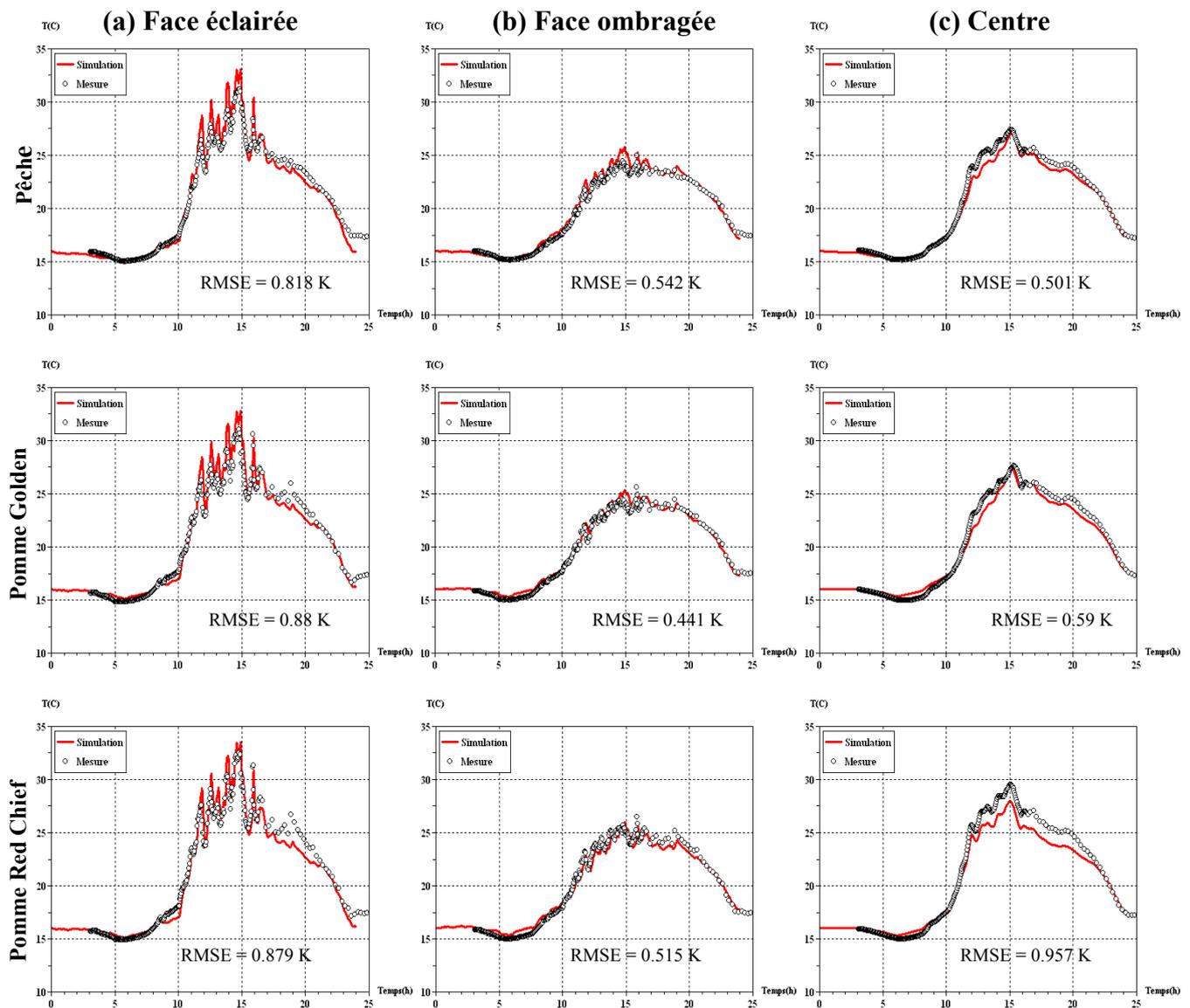


Figure 7 : Comparaison des températures prédites par le modèle avec les températures mesurées. Chaque ligne correspond à un fruit et chaque colonne à une position sur ou dans le fruit

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.