



HAL
open science

Modélisation de l'anisotropie directionnelle dans l'infrarouge thermique au-dessus d'un peuplement de pin maritime

Jean-Pierre Lagouarde, Britta Kurz, Patrick Moreau, Jérôme Ogée, Dominique Guyon

► **To cite this version:**

Jean-Pierre Lagouarde, Britta Kurz, Patrick Moreau, Jérôme Ogée, Dominique Guyon. Modélisation de l'anisotropie directionnelle dans l'infrarouge thermique au-dessus d'un peuplement de pin maritime. Atelier de Modélisation de l'Atmosphère, Météo France, Jan 2007, Toulouse, France. 4 p. hal-02815114

HAL Id: hal-02815114

<https://hal.inrae.fr/hal-02815114>

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MODELISATION DE L'ANISOTROPIE DIRECTIONNELLE DANS L'INFRAROUGE THERMIQUE AU-DESSUS D'UN PEUPEMENT DE PIN MARITIME

Jean-Pierre Lagouarde, Britta Kurz, Patrick Moreau,
Jérôme Ogée, Dominique Guyon, Isabelle Champion

INRA, UR1263 EPHYSE, 71 avenue E. Bourlax, F-33140 Villenave d'Ornon, France

RESUME. Des mesures expérimentales réalisées dans l'infrarouge thermique (IRT) au-dessus de surfaces variées (forêts de pin maritime, milieux urbains...) révèlent une importante anisotropie directionnelle et des effets systématiques de 'hot spot' atteignant plusieurs K en conditions diurnes. Une modélisation de l'anisotropie est développée en vue d'applications multiples : correction des données des satellites à large fauchée, assimilation de données multi-capteurs multi-angulaires de température de surface dans les modèles de transfert et de croissance. La méthodologie est développée et testée dans le cas d'un peuplement de pin maritime des Landes (Sud-Ouest de la France). La modélisation est basée sur la mise en œuvre de maquettes informatiques 3D de couverts forestiers. La génération de scènes dans diverses configurations d'éclairement solaire et de visée est faite à l'aide du logiciel POV-ray et permet d'identifier les diverses facettes du couvert soit éclairées, soit à l'ombre. La température radiative directionnelle résultante est ensuite calculée par combinaison de leurs températures élémentaires issues soit de mesures soit d'un modèle TSVA. Les premiers résultats obtenus sur le peuplement de pin maritime du site INRA du Bray et leur validation par rapport à des mesures aéroportées de température de surface directionnelles sont présentés et discutés.

1. INTRODUCTION

Les mesures de température de surface réalisées dans l'infrarouge thermique (IRT) présentent une forte anisotropie directionnelle. Celle-ci dépend (1) de la structure de la canopée qui conditionne les profils de température à l'intérieur du couvert *via* les transferts couplés énergétiques et radiatifs en même temps que la répartition spatiale des facettes vues par le capteur, et (2) également de la position solaire. La caractérisation de l'anisotropie directionnelle IRT répond à divers besoins : (1) accès à la température de surface des diverses strates du couvert et amélioration des estimations de flux de chaleur sensible, (2) assimilation des données de télédétection multi-angulaires dans les modèles de surface, (3) correction et normalisation de données de capteurs à large champ en vue de l'analyse de séries temporelles ou de la variabilité spatiale, (4) définition de configurations optimales d'observation dans l'IRT et préconisations pour de futurs systèmes spatiaux.

L'étude des effets directionnels dans l'IRT remonte aux années 60 (Paw U, 1992). Lagouarde et al. (2000 et 2004) ont récemment proposé une méthode basée sur l'utilisation en aéroporté d'une caméra IRT équipée d'un objectif grand-angulaire, et ont mis en évidence la présence de 'hot spots' caractéristiques sur des couverts de pin maritime comme sur des milieux urbains.

Plusieurs approches de modélisation ont été proposées. Kimes (1983) et Caselles et al. (1992) se sont appuyés sur des modèles géométriques simples

adaptés aux cultures en rangs (coton et vergers d'orangers). Kimes (1980) et Prévot et al. (1994) ont développé des modèles multi-couches dans lesquels la température directionnelle est calculée à partir de fréquences de trous déduites de profils de LAI et de distributions d'angles d'inclinaison des feuilles. Ces approches exigent la connaissance a priori des distributions de température de surface dans la canopée. Pour s'en affranchir, Prévot et al. (1994) ont proposé de coupler le modèle multi-couches avec un modèle de transfert calculant les températures de surface des éléments de la canopée. Plus récemment des approches basées sur des modèles 3D ont été proposées (Luquet et al., 2003 ; Guillevic et al., 2003 issu de DART développé par Gastellu-Etchegorry et al., 1996). Le présent papier vise à évaluer le potentiel du couplage d'un modèle de transfert avec une maquette 3D de peuplement dans le cas d'un couvert forestier de pin maritime.

2. DONNEES EXPERIMENTALES

Le site expérimental est situé dans la forêt des Landes. Il s'agit du site INRA du Bray (44°43'N, 0°46'W), peuplement d'environ 350m x 500m de pin maritime âgé de 26 ans (lors des mesures en 1996) et de hauteur moyenne des arbres 17.6 m. Le peuplement présente une structure en rangs espacés de 4 m et orientés avec un azimut de 35°. La densité du peuplement est de 518 arbres/hectare. Le LAI est de l'ordre de 3.1 en été, et le taux de couverture se situe autour de 70%.

Les mesures de température de surface ont été effectuées à l'aide d'une caméra IRT (modèle

INFRAMETRICS M760) embarquée à bord d'un avion (CESSNA 180). Le lecteur trouvera tous les détails dans la publication de Lagouarde et al. (2000). Plusieurs séries de mesures ont été faites (en août et septembre 1996) qui ont révélé une importante anisotropie directionnelle et des effets de 'hot spot' marqués. Le travail présenté ici porte sur l'acquisition du 4 septembre 1996 autour de 14:00 TU.

Des mesures détaillées de température de surface des facettes des divers éléments du couvert éclairés et à l'ombre (sous-bois, troncs, aiguilles) ont été également faites au sol à l'aide la même caméra à partir d'une tour, à des dates différentes (5, 6 et 27 août 1998), mais dans des conditions météorologiques et d'état hydrique similaires.

3. L'APPROCHE DE MODELISATION

3.1 Méthodologie

L'approche de modélisation est basée sur l'utilisation de scènes générées à l'aide du logiciel POV-ray (<http://www.povray.org>) à partir de maquettes 3D de structure. Les images de la scène pour une position solaire (azimut et zénith) et une position de l'observateur (angles zénithaux et azimutaux de visée θ_v et φ_v) données sont analysées pour en tirer les six fractions des éléments présents dans la scène (houppiers, tronc et sous-bois éclairés et à l'ombre). La température directionnelle est ensuite estimée par agrégation des six températures de chacun de ces éléments obéissant à la conservation de la loi de Stefan-Boltzmann (l'émissivité étant dans un premier temps supposée constante) :

$$T_s(\theta_v, \varphi_v) = \sqrt[4]{\sum_{i,j} (A_{i,j}(\theta_v, \varphi_v) T_{i,j}^4)}$$

avec $i = 1, 2$ (ombré, éclairé),

et $j = 1, 2, 3$ (pour houppier, sol, tronc)

Les températures élémentaires T_{ij} peuvent être soit fournies par des mesures au sol (pour une phase de validation de la méthode), soit issues d'un modèle de transfert TSVA (en vue d'application opérationnelle à l'assimilation des données IRT par exemple).

3.2 Le modèle 3D de pin maritime

Les premiers essais ont été effectués avec une représentation très simplifiée de l'arbre constitué d'un tronc et d'un seul ordre de branchaison, tous les éléments d'ordre supérieur (branches secondaires, rameaux...) étant concentrés dans des cylindres identiques (Fig. 1). Les paramètres (hauteur du tronc, nombre et angles d'insertion des branches ...) sont issus d'études statistiques sur des arbres réels (Champion et al., 2001). Les deux seuls paramètres à ajuster sont la longueur et le diamètre des cylindres. Ils

sont ajustés par rapport à des mesures de fréquence de trous réalisées sur le peuplement (voir ci-dessous).

3.3 Le modèle 3D de peuplement

Le modèle 3D de peuplement est créé par assemblage d'arbres de forme identique; l'espacement entre rangs est constant tandis que l'espacement entre arbres sur le rang est affecté d'une variabilité correspondant à celle observée dans la réalité. Un effet de compétition et d'hétérogénéité est sommairement simulé en adaptant la taille des arbres (par homothétie) en fonction de la distance à leurs voisins. Enfin les paramètres définissant la visée (observateur très éloigné et FOV 'field of view' très réduit) sont choisis de façon à simuler des observations uni-directionnelles sur l'ensemble du peuplement analogues à celles d'un capteur satellitaire (Fig. 1). La validation de la maquette 3D de peuplement est faite par comparaison avec des mesures de fréquence de trous réalisées au moyen d'un instrument Daemon (Fig. 2).

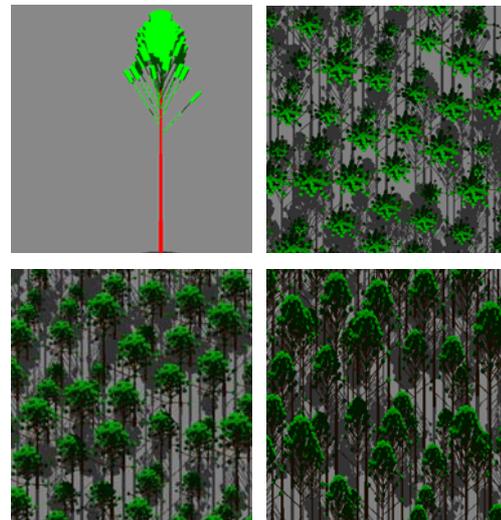


Figure 1. Simulation 3D POV-ray d'un pin maritime et du peuplement du Bray dans trois configurations différentes de visée (nadir, $\theta_v = 20$ et 40°) dans le plan principal.

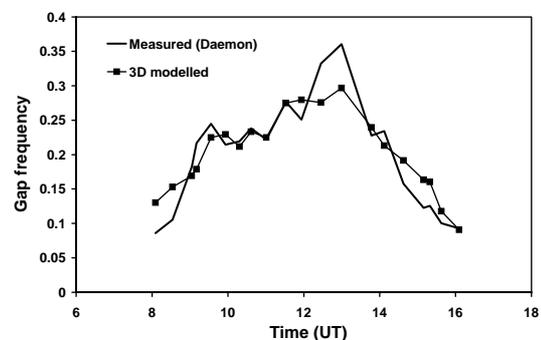


Figure 2. Comparaison entre les fréquences de trous mesurées (Daemon) au cours de 3 journées consécutives à des heures différentes et les simulations POV-ray effectuées pour les mêmes conditions (mêmes heures, visée en direction du soleil). La différence observée autour de 13 :00 est due à un effet de rang.

3.4 Le modèle MuSICA

Le modèle MuSICA est un modèle multicouche de transfert d'énergie, eau et CO₂ pour un couvert de pin maritime incluant un sous-bois (Ogéé et al. 2003). Le modèle distingue dans chaque couche de végétation plusieurs type d'aiguilles (selon leur âge, leur état hydrique, et leur exposition à l'ombre ou au soleil) et résout dans chaque cas une équation de bilan d'énergie permettant le calcul des températures de surface élémentaires. Le modèle fonctionne au pas de temps semi-horaire.

4. RESULTATS

Le test de simulation porte sur les données du 4 septembre 1996 acquises en début d'après-midi entre 12:55 et 13:37 TU. Une représentation synthétique de l'anisotropie observée est donnée Fig. 4a.

L'anisotropie a été simulée dans un premier temps en utilisant les données de températures élémentaires recueillies au sol en 1998. Nous considérerons que la non simultanété des mesures avion et sol n'est pas critique dans le cadre précis d'un exercice préliminaire de mise au point méthodologique, les deux dates présentant des conditions météorologiques et d'état hydrique similaires. L'analyse de plusieurs images de rameaux de pin, de troncs et d'échantillons de sous-bois (acquises sur le site du Bray les 5 et 6 août 1998) a permis d'estimer les températures moyennes et écarts type de chaque composant (Fig. 3). Les températures des troncs et du sol s'étant révélées très proches dans le cas considéré, ces deux éléments ont été confondus dans un premier temps. Le résultat de la simulation d'anisotropie est donné Fig. 5b.

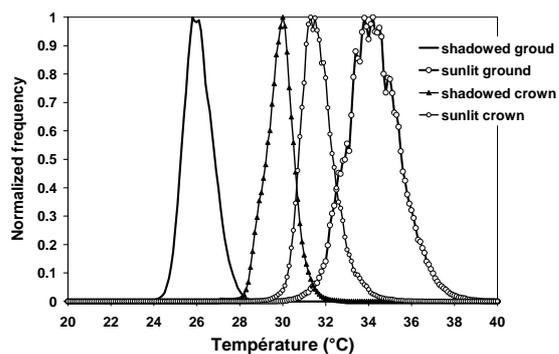


Figure 3. Exemple d'histogrammes normalisés des températures des houppiers et sous-bois à l'ombre et au soleil entre 12:26 et 13:58 UT (6 août 1998, Le Bray).

Une deuxième simulation a été effectuée à partir des températures élémentaires fournies par MuSICA (Table I). La température attribuée aux houppiers est la moyenne des valeurs calculées pour les aiguilles en confondant les différents niveaux (13.05m, 14.55m, 16.05m et 17.55m) et les 3 âges (1 à 3 ans).

Sol ombre	Sol soleil	Houppier ombre	Houppier soleil
Mesures: 5 et 6 août 1998, 13:32-14:04 UT 12:26-13:58 UT			
26.1	34.3	27.3	31.7
MuSICA (4 septembre 1996) :			
28.3	36.5	26.8	31.6

Table I: Températures de surface élémentaires introduites dans les 2 simulations de l'anisotropie directionnelle IRT.

L'accord entre l'anisotropie issue des mesures aéroportées et l'anisotropie issue de la modélisation (Fig. 4) est satisfaisant. Le hot spot est correctement restitué comme le montre la comparaison des variations angulaires dans le plan principal (Fig. 5), les écarts restant inférieurs à 1 K.

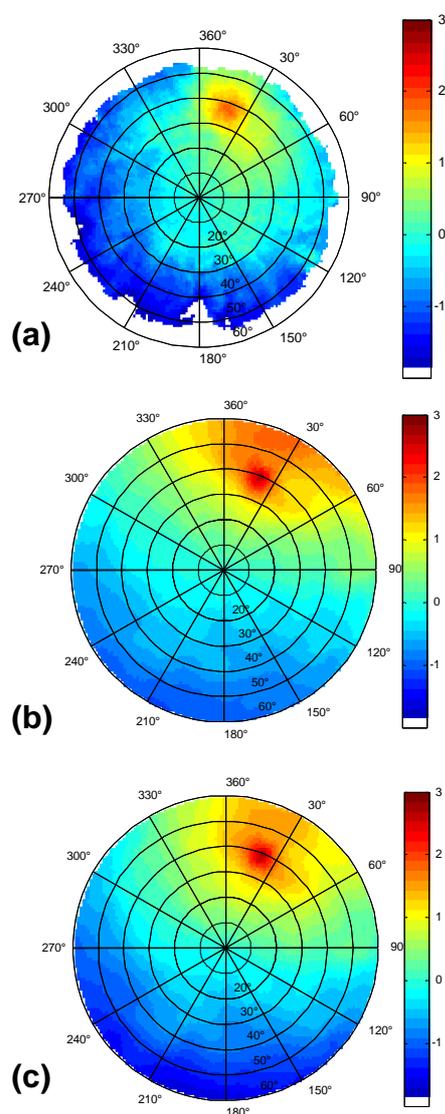


Figure 4. Diagrammes de l'anisotropie directionnelle IRT obtenus sur le site test du Bray (a) par des mesures aéroportées (4 septembre 1996), et simulés à partir des températures élémentaires mesurées au sol (b) et issues du modèle MuSICA (c). Les angles azimutaux et zénithaux de visée correspondent respectivement aux directions radiales (pas de 30°) et aux cercles concentriques (pas de 10°).

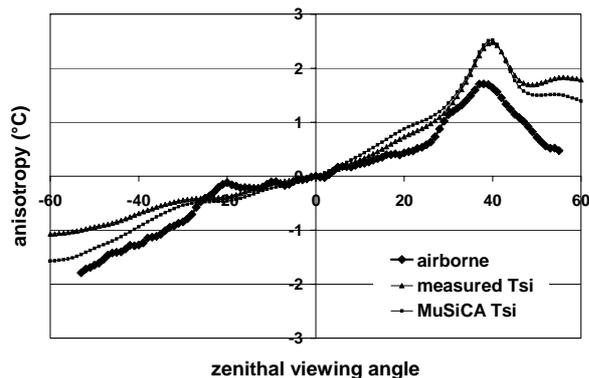


Figure 5. Comparaison entre les mesures aéroportées des effets directionnels dans l'IRT sur un peuplement de pin maritime dans le plan principal (4 septembre 1996) et les simulations basées sur l'utilisation d'un modèle 3D de canopée.

5. CONCLUSIONS

Ces résultats préliminaires démontrent l'intérêt des maquettes 3D dans la modélisation des effets directionnels dans l'infrarouge thermique, et ce en dépit du caractère et de la paramétrisation assez sommaires de la maquette d'arbre utilisée. Par la suite on introduira des modèles plus réalistes d'arbre et de peuplement dans le cadre d'une collaboration avec le groupe Plantes Virtuelles AMAP du CIRAD Montpellier. Ceci permettra (i) de valider la méthode sur des peuplements d'âge et de structure différents (pour lesquels des données sont disponibles, Lagouarde et al., 2000) et (ii) d'évaluer de façon objective le niveau de simplification de la représentation permettant de conserver une précision suffisante sur la simulation des variations angulaires de température de surface.

La question du couplage avec le modèle de transfert doit faire l'objet de travaux complémentaires. Quelle est en particulier la définition de la température de surface des houppiers ? Ceux-ci apparaissent en effet dans la réalité, quelles que soient les directions d'observation, comme un mélange d'aiguilles à l'ombre et au soleil. La température introduite dans les premiers tests présentés ici est celle des aiguilles mesurée ou simulée par MuSiCA. Cette simplification reste à valider de même que l'hypothèse d'une température uniforme pour chaque classe au sein de la canopée.

La méthode sera enfin appliquée au cas des milieux urbains, en s'appuyant sur les données recueillies sur le centre de Toulouse lors de l'expérience CAPITOU.

REFERENCES

- Caselles, V., Sobrino, J. A., and Coll, C., 1992, A physical model for interpreting the land surface temperature obtained by remote sensors over incomplete canopies. *Rem. Sens. Environ.*, **39**, 203-211.
- Champion, I., Porte, A., Bert, D., Loustau, D., Guedon, M., Jean-Courcier, F., Lagane, F., Lambrot, C., Lardit, A., Sartore, M., 2001, Tree architecture in remote sensing analytical models: The Bray experiment. *Int. Journal of Rem. Sens.*, **22** (9), 1827-1843.
- Gastellu-Etchegorry, J. P., Demarez, V., Pinel, V. and Zagolski, F., 1996, Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies. *Rem. Sens. Environ.*, **59**, 461-471.
- Guillevic, P., Gastellu-Etchegorry, J. P., Demarty, J., and Prévot, L., 2003, Thermal infrared radiative transfer within three-dimensional vegetation covers. *Journal of Geophysical Research*, 108(D8), 4248.
- Kimes, D. S., 1980, Effects of vegetation canopy structure on remotely sensed canopy temperatures. *Rem. Sens. Environ.*, **10**, 165-174.
- Kimes, D. S., 1983, Remote sensing of row crop structure and component temperatures using directional radiometric temperatures and inversion techniques. *Rem. Sens. Environ.*, **13**, 33-55.
- Lagouarde, J.-P., Ballans, H., Moreau, P., Guyon, D., and Coraboeuf, D., 2000, Experimental study of brightness surface temperature angular variations of Maritime Pine (*Pinus Pinaster*) stands. *Rem. Sens. Environ.*, **72**, 17-34.
- Lagouarde, J.-P., Moreau, P., Irvine, M., Bonnefond, J.-M., Voogt, J. A., and Sollic, F., 2004, Airborne experimental measurements of the angular variations in surface temperature over urban areas: case study of Marseille (France). *Rem. Sens. Environ.*, **93**, 443-462.
- Luquet, D., Dauzat, J., Vidal, A., Bégue, A., and Clouvel, P., 2003, 3D simulation of directional temperature variability within a row-cotton crop: toward an improvement of crop water status monitoring using thermal infrared. *Precision Agriculture (Special issue)*, **4**, 297-309.
- Ogée, J., Brunet, Y., Loustau, D., Bergbier, P., and Delzon, S., 2003, MuSiCA, a CO₂, water and energy multilayer, multileaf pine forest model: evaluation from hourly to yearly time scales and sensitivity analysis. *Global Change Biology*, **9**, 697 – 717.
- Paw U, K. T., 1992, Development of models for thermal infrared radiation above and within plant canopies. *ISPRS J. Photogramm. Rem. Sens.*, **47**, 189-203.
- Prévot, L., Brunet, Y., Paw U, K. T., and Seguin, B., 1994, Canopy modelling for estimating sensible heat flux from thermal infrared measurements. In *Proc. Thermal Rem. Sens. of the Energy and Water Balance over Vegetation Workshop*, La Londe-les-Maures, Sept. 1993, CEMA-GREF Ed., Montpellier, pp. 17-22.