



HAL
open science

Cartographie des topoclimats forestiers. Mise au point d'une methodologie d'analyse de l'effet du relief sur les thermographies: application aux donnees HCMM sur le nord est du Massif Central.

Jean-Pierre Lagouarde, P. Valery, Pierre Belluomo, Marie Helene Soulier

► To cite this version:

Jean-Pierre Lagouarde, P. Valery, Pierre Belluomo, Marie Helene Soulier. Cartographie des topoclimats forestiers. Mise au point d'une methodologie d'analyse de l'effet du relief sur les thermographies: application aux donnees HCMM sur le nord est du Massif Central.. *Agronomie*, 1983, 3 (10), pp.1011-1018. hal-02726291

HAL Id: hal-02726291

<https://hal.inrae.fr/hal-02726291>

Submitted on 2 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.

Cartographie des topoclimats forestiers. Mise au point d'une méthodologie d'analyse de l'effet du relief sur les thermographies : application aux données H.C.M.M. sur le nord-est du Massif Central

Jean-Pierre LAGOUARDE, Pierre VALÉRY *, Pierre BELLUOMO * & Marie-Annick SOULIER (**)

I.N.R.A., Laboratoire de Bioclimatologie. Centre de Recherches d'Avignon F 84140 Montfavet

** Laboratoire de Bioclimatologie-Téledétection - Route de Saint-Cyr*

*** Laboratoire de Biométrie, Route de Saint-Cyr F 78000 Versailles*

RÉSUMÉ

L'effet du relief sur les thermographies du satellite H.C.M.M. est étudié sur une sapinière du nord-est du Massif Central (Bois Noirs, Monts du Forez). Dans ce but, une procédure permettant de réaliser un modèle numérique de terrain est présentée. Une tentative en vue de trouver une relation statistique entre la température de surface non corrigée des effets atmosphériques, l'altitude et des index représentatifs de l'insolation directe reçue par le sol, met en évidence l'influence prépondérante de l'altitude sur les thermographies de jour. Par contre, aucune relation simple entre température nocturne et altitude n'a pu être établie.

La comparaison des températures de surface diurnes sur 3 types de peuplements résineux d'un massif voisin (Monts du Beaujolais), d'abord sans, puis avec correction de l'effet de l'altitude est ensuite présentée.

Mots clés additionnels : *Téledétection satellite, température de surface, forêt, topographie, production végétale, sapins Douglas.*

SUMMARY

Mapping of forest topoclimates. Methodology of analysis of the effect of topography on thermal images. Application to H.C.M.M. data on the North East of Massif Central.

The effect of relief on H.C.M.M. satellite thermal images was studied on a spruce forest in the North East of the Massif Central (Bois Noirs, Forez Mounts). To this end, a procedure for building a digital terrain map is described. An attempt to find a statistical relation between surface temperature without atmosphere correction, height and several indices representative of direct solar radiation received by the ground, showed the preponderant influence of height on daytime thermal images. On the other hand, no simple relation between night temperatures and height could be established.

A comparison has also been made between the daytime surface temperatures of three types of coniferous plantations in a neighbouring massif (Beaujolais Mounts) with and without a correction of the effect of height.

Additional key words : *Satellite remote sensing, surface temperature, forest, topography, vegetal production, Douglas fir.*

I. INTRODUCTION

Les images obtenues par satellite dans le domaine de l'infrarouge thermique apparaissent comme un outil prometteur dans l'étude des microclimats à l'échelle régionale : par rapport aux données météorologiques classiques dont la maille du réseau synoptique (50 à 100 km) se révèle souvent trop lâche, tout particulièrement en montagne dans les régions forestières, elles permettent en effet d'obtenir une information — la température de surface — à une échelle

d'espace beaucoup plus fine, de l'ordre de quelques centaines de mètres.

Température de surface et température de l'air sont deux paramètres de signification distincte et ont en général des valeurs très différentes. Celle de la température de surface est imposée par l'équilibre du bilan au niveau du sol des échanges d'énergie — échanges radiatifs, flux de chaleur dans le sol et dans l'air, évaporation. Elle dépend donc de la couverture végétale, des caractéristiques de la surface (émissivité, albédo), des caractéristiques thermiques et de

l'état hydrique du sol et de facteurs météorologiques tels que la température et l'humidité de l'air et la vitesse du vent. C'est un bon témoin de l'état de dessèchement du sol (RIOU *et al.*, 1979) et divers travaux soulignent son intérêt pour le calcul de l'évapotranspiration par télédétection (SEGUIN, 1982). Ainsi l'information qu'elle apporte est à la fois plus riche, car plus représentative du climat au voisinage du sol, et plus spécifique du point considéré ; la température de surface présente en effet une variabilité beaucoup plus grande que celle de l'air.

Notre objectif a été d'évaluer, à partir des images fournies par le satellite H.C.M.M. (Heat Capacity Mapping Mission), les possibilités de discrimination des microclimats de peuplements de résineux en région de topographie accidentée, dans le nord-est du Massif Central, en vue d'une corrélation ultérieure avec des mesures de productivité, suite aux travaux effectués au Centre de Recherches forestières de Nancy (BOUCHON, 1979).

En zone montagneuse, le relief conditionne la valeur de la température de surface par l'intermédiaire de plusieurs facteurs : l'altitude, dont on connaît l'effet sur les gradients thermiques dans l'air, mais aussi l'exposition des pentes et les phénomènes d'ombre qui régissent l'énergie radiative disponible (STORR, 1972 ; SWIFT & KNOERR, 1973 ; BUGLER, 1977 ; TEMPS & COULSON, 1977 ; DURAND & LEGROS, 1981) ; la turbulence induite par la topographie intervient aussi par son effet sur le flux de chaleur dans l'air. Enfin le relief affecte la mesure elle-même, les effets d'angle d'observation des surfaces se trouvant exacerbés (RAMANANTZEHENA *et al.*, 1981) et l'atténuation du signal reçu par le détecteur dépendant de l'épaisseur d'atmosphère traversée. L'effet de la topographie sur les données recueillies par satellite a été étudié dans le domaine du visible et du proche infrarouge (DOZIER & FREW, 1981 ; HOLBEN & JUSTICE, 1981 ; JUSTICE *et al.*, 1981) et des microondes (MEIER, 1981), mais n'a pas encore à notre connaissance l'objet de publications dans le cas de l'infrarouge thermique.

Dans le but de quantifier l'effet du relief, nous avons tenté, en associant un modèle numérique de terrain aux images thermiques, d'établir une relation statistique simple sur une sapinière entre la température de surface non corrigée des effets atmosphériques, l'altitude et un indice d'insolation directe.

Une comparaison des températures de surface au-dessus de 3 types de peuplements résineux a ensuite été faite ; elle a porté à la fois sur les températures brutes fournies par le satellite et sur les températures corrigées au moyen de la relation précédemment établie, dans l'espoir de mettre en évidence des différences liées à des facteurs autres que la topographie et propres aux peuplements.

II. ZONES D'ÉTUDE ET DONNÉES SATELLITE

La relation température-relief a été étudiée sur le massif forestier des Bois Noirs dans les Monts du Forez (45° 55' N, 3° 43' E). Ce massif a été choisi en raison de la continuité de sa couverture végétale (sapinière constituée par tous les peuplements naturels adultes de sapin en fûtaie régulière ou irrégulière, incluant quelques peuplements adultes d'épicéa, et comportant au maximum 50 p. 100 de feuillus), de sa surface (environ 800 ha) et enfin de dénivellés importants (547 m, entre 740 et 1 287 m). De plus, sa forme compacte,

avec cependant un axe NO-SE faiblement marqué, garantit une répartition uniforme des orientations.

La comparaison des températures sur 3 types de peuplements résineux a été menée sur les Monts du Beaujolais, massif situé à environ 60 km au NE du précédent, pour lequel on dispose d'un inventaire récent des zones boisées réalisé par l'Inventaire Forestier National (*).

Les données utilisées proviennent du satellite H.C.M.M. lancé par la NASA en avril 1978 et qui a fonctionné jusqu'en septembre 1980. Le satellite muni de 2 canaux — l'un dans le domaine visible et proche infrarouge entre 0,5 et 1,1 μm , l'autre dans l'infrarouge thermique entre 10,5 et 12,5 μm — pouvait fournir avec une fréquence de 16 j, les jeux de données suivantes :

— 2 images acquises en même temps dans les 2 canaux, lors du passage de jour aux environs de 13 h.

— 1 image thermique, acquise lors du passage de nuit à 12 h d'intervalle et rendue superposable à la scène de jour après correction géométrique.

La résolution au sol, aux dimensions du point élémentaire (pixel) vu par le détecteur est de 500 \times 500 m.

L'information contenue dans les données H.C.M.M. et leur intérêt par rapport aux techniques conventionnelles (mesures au sol, utilisation de vols avion) ont été analysés dans le cadre du projet européen TELLUS (rapport final, 1981) auquel a participé le Département de Bioclimatologie — Télédétection de l'I.N.R.A.

Dans le cadre du présent travail, nous avons étudié 2 dates : 17 juillet et 24 septembre 1978. L'émissivité étant un paramètre de mesure délicate et possible uniquement lors d'expériences ponctuelles avec mise en œuvre d'un appareillage important, nous ne disposons d'aucune information à son sujet. Aussi l'avons nous prise partout égale à 1. Pour les mêmes raisons, la température de surface n'est pas mesurée en réseau, ce qui interdit toute référence par rapport au sol. Enfin, en raison de l'absence de données de radiosondages sur la région étudiée, il est impossible d'utiliser les modèles de corrections atmosphériques testés sur les données H.C.M.M. lors du projet TELLUS. Nous avons donc utilisé les mesures brutes fournies par le détecteur du satellite et travaillé « en différentiel » : les « températures » observées ne sont pas significatives en valeur absolue, tandis que leurs différences le sont, ce qui autorise les comparaisons entre pixels.

La superposition sur la carte topographique s'est faite en choisissant des amers tels que des rivières et des forêts de résineux facilement identifiables sur le canal visible-proche IR en raison de leur faible réflectance. Le repérage ainsi défini est appliqué aux images thermiques. La précision de la superposition peut être estimée à moins de 1 pixel pour l'image de jour. Elle est limitée de nuit par la qualité du prétraitement de l'image (correction géométrique évoquée ci-dessus) et n'est pas inférieure à 3 pixels.

III. RÉALISATION DES MODÈLES NUMÉRIQUES DE TERRAIN

Les modèles numériques de terrain des 2 régions étudiées n'étant pas à l'heure actuelle disponibles auprès de l'Institut

(*) Inventaire Forestier National, 1^{er}, avenue de Lowendal, 75007 Paris.

Inventaire Forestier National (Echelon interrégional de Lyon), Ciemin des Chasseurs, Parc de Parilly, 69500 Bron.

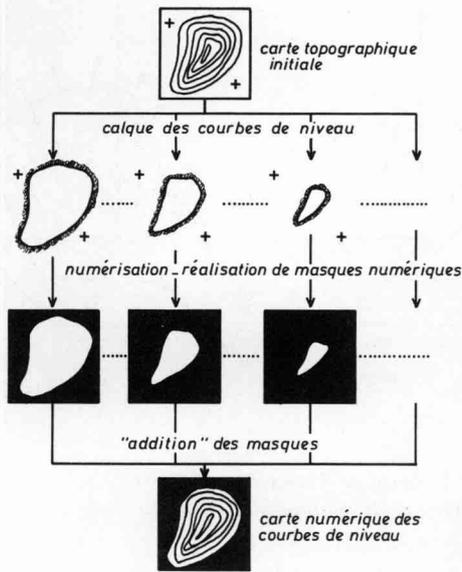


Figure 1
Réalisation de la carte numérique des courbes de niveau.
Scheme for numerical map of height contours.

Géographique National, nous avons dû les construire au moyen de la procédure suivante (fig. 1) :

— les courbes de niveau de la carte topographique sont décalquées avec une équidistance donnée les unes après les autres, à la main, en même temps que quelques points de repère ;

— ces tracés sont ensuite numérisés successivement en repérage au moyen d'une caméra vidéo associée à une chaîne de conversion analogique — digital 256 × 256 points et une unité de traitement d'images. L'orientation est choisie de telle sorte que l'axe de vol du satellite corresponde aux « colonnes » de l'image. Le rapport d'agrandissement est fixé par un compromis entre, d'une part, la taille des documents à numériser (c'est-à-dire la surface de la zone d'étude et l'échelle de la carte initiale) et, d'autre part, la résolution souhaitée. Du point de vue pratique, ce rapport est tel qu'un simple contour n'est en général plus visible après la numérisation ; il convient donc au préalable d'épaissir à la main le trait, à l'extérieur de chaque courbe de niveau. La numérisation remplace alors le tracé initial par un « chapelet » de pixels « mixtes », affectés après seuillage soit à l'intérieur, soit à l'extérieur de la courbe de niveau. La valeur du seuil est choisie pour restituer de façon satisfaisante les détails du contour. On réalise ensuite un « masque » de la courbe de niveau avec les valeurs 0 à l'extérieur et 1 à l'intérieur. L'utilisation d'une table à numériser allégerait considérablement cette étape.

— par somme des différents masques, on obtient une carte numérique d'allure discrète (« en escaliers »). Un « lissage » permet ensuite de passer à une représentation continue de la topographie (fig. 2). Celui-ci se fait par interpolation linéaire sur les différents paliers, d'abord selon les lignes puis selon les colonnes, pour compléter l'information. Dans le but de ne privilégier aucune direction, on procède à un second lissage, d'abord selon les colonnes puis selon les lignes. Le modèle numérique de terrain final est la moyenne de ces 2 lissages (fig. 3). Il est évident que cette procédure dégrade le relief d'autant moins que les courbes de niveau sont plus rapprochées.

On pourra trouver dans la littérature une procédure analogue (ROBERTS, 1981).

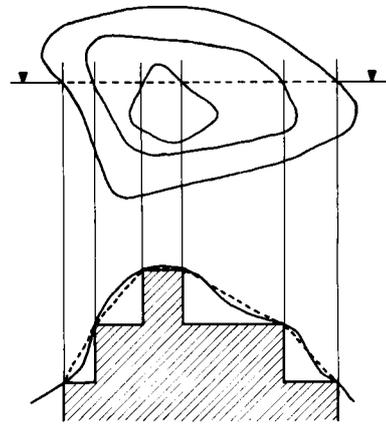


Figure 2
Interpolation de l'altitude entre courbes de niveau (— topographie réelle, --- interpolation).
Interpolation of height between height contours (— actual topography, --- interpolation).

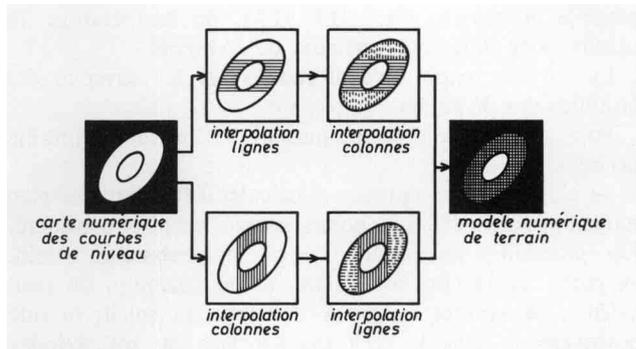


Figure 3
Procédure de lissage du relief (exemple de 2 courbes de niveau).
Procedure for smoothing relief (example of two height contours).

IV. EFFET DE LA TOPOGRAPHIE SUR LA TEMPÉRATURE DE SURFACE

A. Le modèle statistique

Une simple comparaison visuelle des images thermiques de jour et d'une carte topographique met en évidence une forte analogie entre isothermes et courbes de niveau, ce qui laisse supposer une étroite corrélation entre température T_s et altitude.

D'autre part, la pente et l'orientation interviennent conjointement sur le rayonnement solaire direct reçu par une surface et donc sur son échauffement (GEIGER, 1959). De plus, pour tenir compte d'un déphasage de T_s par rapport au rayonnement global et d'un éventuel stockage de chaleur par le couvert végétal — effets qui pourraient expliquer des différences de température entre versants ouest et est, ces derniers ayant reçu plus d'énergie au moment de passage du satellite — il est intéressant de comparer T_s aux insolation à plusieurs moments précédant l'acquisition de l'image thermique.

En définitive, nous avons tenté par une régression multiple progressive d'exprimer T_s sous la forme :

$$T_s = \alpha z + \beta I_0 + \gamma I_1 + \delta I_2 + \eta I_3 + \varepsilon$$

où T_s désigne la température de surface sans corrections

atmosphériques fournie par H.C.M.M. à 13 h 00, z l'altitude et I_0, I_1, I_2, I_3 des index d'insolation directe à l'heure de passage du satellite et à des temps antérieurs de $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t$; ces index seront définis ultérieurement.

De nuit, nous n'avons testé que la relation $T_s = \alpha z + \epsilon$.

L'approche statistique nous paraît être la seule envisageable ici pour 2 raisons :

— l'absence d'observations au sol (comme, à l'opposé, le nombre prohibitif de mesures nécessaires à la modélisation de T_s en zone montagneuse) interdit toute démarche analytique ;

— l'absence de calage par rapport à des données au sol et l'absence de corrections atmosphériques ne nous autorisent à considérer T_s que comme un index.

B. Calcul des variables explicatives

La carte numérique de terrain des Bois Noirs a été construite à partir d'une carte au 1/50000 avec une équidistance entre courbes de niveau de 40 m et une résolution de 6 pixels pour 500 m. L'information altitude et insolation associée à chaque pixel H.C.M.M. de température T_s résulte donc d'un regroupement de 36 points.

La variable explicative altitude z est la moyenne des altitudes des 36 points.

Pour le calcul de l'index d'insolation, 2 méthodes ont été utilisées (fig. 4) :

— une première consiste à calculer l'équation du plan moyen passant par les 36 points associés au pixel considéré. On en déduit le vecteur \vec{N} normé perpendiculaire au terrain. A partir de l'inclinaison solaire et de l'azimut on peut calculer le vecteur normé \vec{S} direction du soleil, orienté positivement dans le sens soleil-surface du sol. L'index d'insolation est alors la quantité $I = |\vec{S} \cdot \vec{N}|$. Les pixels ayant un produit scalaire $\vec{S} \cdot \vec{N}$ positif correspondent à des ombres directes et sont éliminés du calcul de la régression ; les phénomènes d'ombres portées ne sont, par contre, pas décelés et restent négligés. Cette méthode présente cependant le risque de trop dégrader l'information topographie : en assimilant la surface du sol à un plan, on peut masquer des reliefs d'ordre inférieur à 500 m (rupture de pente, petites falaises) dont l'effet sur l'insolation est quelquefois important ;

— une deuxième technique a donc été testée qui consiste à calculer l'index d'insolation associé au pixel H.C.M.M. comme étant la moyenne des insolutions élémentaires en chacun des 36 points du modèle de terrain :

On trouvera à titre d'exemple sur les figures 5a et 5b la variation de T_s en fonction de l'index d'insolation à l'heure de passage et 2 h auparavant.

La relation finale obtenue se réduit pour la tranche d'altitude étudiée à :

$$T_s = -0,70 z + 27,7 \quad (R = 0,850)$$

où z désigne l'altitude en centaines de mètres. La variation de T_s en fonction de l'altitude est présentée sur la figure 6.

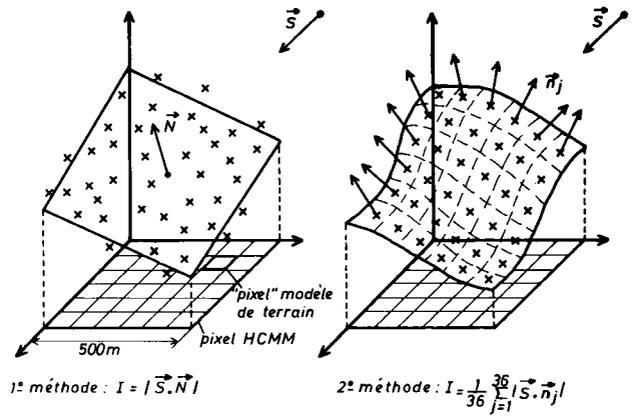


Figure 4
Méthodes de calcul de l'index d'insolation I.
Methods for calculating insolation index I.

$$I = \frac{1}{36} \sum_{j=1}^{36} |\vec{S} \cdot \vec{n}_j|$$

Les vecteurs \vec{n}_j perpendiculaires à la surface sont calculés par produit vectoriel à partir des pixels adjacents au pixel j. Une insolation élémentaire nulle est attribuée aux points à l'ombre pour lesquels $\vec{S} \cdot \vec{n}_j$ est positif.

Toutes ces opérations ainsi que le lissage du relief ont été programmés en PL 1.

C. Résultats

Dans le but de s'affranchir de l'incertitude sur le repérage entre l'image thermique et la carte topographique, la régression multiple $T_s = f(z, I_0, I_1, I_2, I_3)$ a été calculée par les 2 méthodes décrites ci-dessus pour diverses translations de l'image H.C.M.M. par rapport au repérage initial.

Pour la date du 17 juillet 1978 le coefficient de corrélation le plus fort, $R = 0,850$, a été obtenu pour une translation de l'ordre de 1/2 pixel H.C.M.M. ce qui confirme la qualité de la superposition initiale.

Il n'a été trouvé aucune influence de l'insolation, quelle que soit la méthode de calcul utilisée et quels que soient les index introduits ; en effet, les valeurs des coefficients de corrélation partielle r entre T_s et les index d'insolation à des moments antérieurs de Δh au passage du satellite (voir tableau suivant) ne dépassent jamais 0,1 :

Ces résultats — absence d'effet de l'insolation, relation linéaire avec l'altitude — sont confirmés à la date du 24 septembre 1978. On obtient alors :

$$T_s = -0,84 z + 22,4 \quad (R = 0,831)$$

On peut remarquer que les gradients 0,70 et 0,84 °C/100 m sont de l'ordre de grandeur des gradients habituellement rencontrés pour la température de l'air (PÉGUY, 1970 ; ESCOURROU, 1981). L'absence

Δh (heures)	0	.25	.5	.75	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0
r (1 ^{re} méthode)	.03	.03	.05	.06	.07	.08	.09	.09	.09	.07
r (2 ^e méthode)	.05	.06	.06	.07	.07	.08	.07	.05	.03	.01

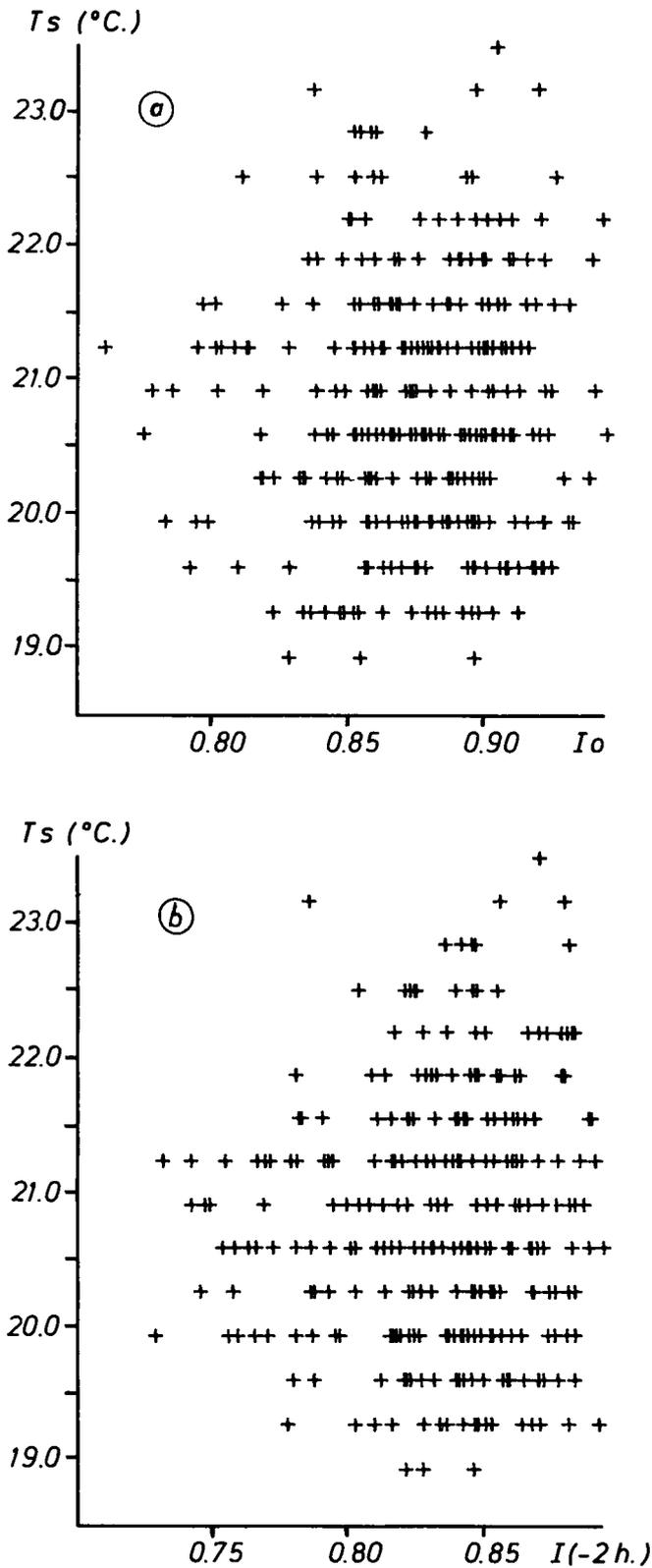


Figure 5
 Relations entre la température de surface de jour et l'index d'insolation (17.07.78) : a) à l'heure de passage du satellite, b) 2 heures avant le passage.
 Relations between day surface temperature and insolation index (17.07.78) : a) at the moment of the satellite flight, b) two hours before.

d'observations météorologiques sur le massif des Bois noirs interdit malheureusement toute comparaison précise. Les radiosondages atmosphériques pourraient fournir ici une

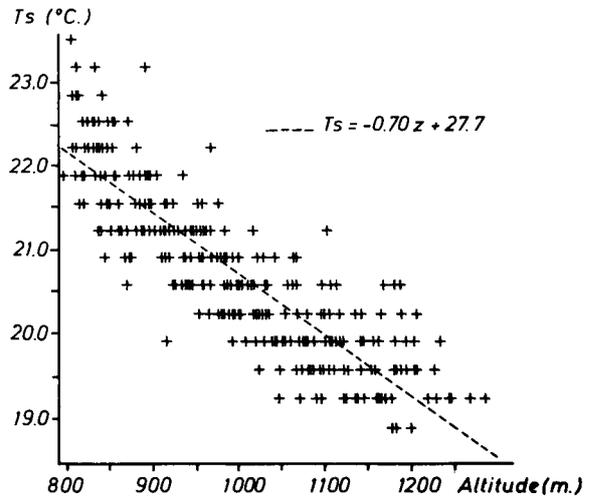


Figure 6
 Relation entre la température de surface de jour et l'altitude (17.07.78).
 Relation between day surface temperature and height (17.07.78).

information intéressante, mais l'extrapolation à notre zone d'étude des données de l'aéroport de Lyon-Satolas est impossible en raison de son éloignement (une centaine de km) et de sa situation en plaine. L'hypothèse d'une forte évaporation au-dessus de la forêt et de la turbulence due au relief, qui tendent toutes deux à réduire l'écart entre les températures de surface et de l'air, pourrait expliquer l'analogie des gradients.

De nuit, la recherche d'une relation statistique simple entre T_s et z est sans doute illusoire en raison de phénomènes complexes tels que des écoulements d'air froid le long des pentes et des accumulations en fond de vallée (inversion des gradients thermiques) qui dépendent autant de la forme du terrain que de l'altitude (GEIGER, 1959). De plus, l'heure de passage du satellite (aux environs de 1 h 30) est mal adaptée à notre étude, le minimum de température et un régime plus stable n'étant atteints qu'en fin de nuit. Ceci explique les coefficients de corrélation faibles trouvés entre T_s et z : 0,247 en juillet et 0,520 en septembre.

V. COMPARAISON DES TEMPÉRATURES DE SURFACE SUR LES PEUPELEMENTS DE RÉSINEUX DES MONTS DU BEAUJOLAIS

Notre objectif premier était de comparer les températures de surface de divers peuplements de sapin Douglas avec des taux de croissance définis à partir de l'augmentation de divers paramètres caractéristiques (hauteur des arbres, circonférence du tronc...) mesurés lors des relevés de terrain successifs. La taille du pixel H.C.M.M. (25 ha) se révèle immédiatement un facteur limitant pour une étude aussi fine, les parcelles étant très morcelées et de dimensions très inférieures. Nous nous sommes donc intéressés à 3 types de peuplements présentant des unités plus grandes et cartographiés par l'IFN à l'échelle 1/50 000 par photo-interprétation suivie de vérifications sur le terrain :

- la sapinière située au-dessus de 800 m d'altitude est constituée, comme dans les Bois Noirs décrits précédemment, par les peuplements naturels de sapins, parfois mêlés de feuillus et d'épicéas ;
- les reboisements massifs correspondent à des peuplements récents de résineux. Parcelles de grandes dimensions.

régularité des plantations et limites rectilignes caractérisent ce type ;

— les reboisements en « timbre-poste » sont constitués par une mosaïque de très petites parcelles. Entre 25 et 75 p. 100 de la surface de ce type est reboisée et les enrésinements divers alternent avec des peuplements feuillus et des landes.

Le sapin de Douglas est l'espèce la plus représentée dans les 2 derniers types qui occupent grossièrement la tranche d'altitude entre 400 et 800 m.

Remarquons que les surfaces des unités reconnues au sol varient entre 0,5 et 500 ha environ, d'où un grand nombre de pixels « mixtes ». Ainsi, même en adoptant une définition peu contraignante pour les classes qui a pour effet de réduire leur nombre, la température fournie par H.C.M.M. est plus souvent représentative de l'environnement d'un type de peuplement que de la surface du peuplement lui-même. Ces réserves faites, la comparaison des températures diurnes a été menée dans un but surtout qualitatif.

A. Méthode d'étude

Comme précédemment la superposition de l'image thermique sur la carte topographique se fait en s'aidant du canal visible-proche I.R. On construit ensuite, à partir de la carte des peuplements, un masque numérique par type, avec la valeur 1 sur les parcelles et 0 en dehors, en utilisant la technique déjà décrite pour les courbes de niveau : numérisation d'un calque établi à la main et seuillage. Une résolution de 7 pixels pour 500 m permet ici de conserver une précision suffisante sur la forme des parcelles les plus petites.

Au moyen de l'unité de traitement d'images, on multiplie ensuite point par point chacun des masques successivement avec la scène thermique de H.C.M.M. mise artificiellement à la même résolution par un « grossissement » 7 (en remplaçant chaque pixel représentatif de 500×500 m par 7×7 pixels identiques). On obtient ainsi, pour ces 3 types de peuplements, 3 cartes de répartition des températures dont on compare les histogrammes. On utilisera en fait les histogrammes des niveaux enregistrés par le détecteur du satellite sans faire de conversion en température.

Cette comparaison est reprise dans un second temps sur l'image thermique corrigée du relief. La correction consiste à ramener toutes les températures à une même altitude de référence, compte tenu du gradient trouvé sur la sapinière des Bois Noirs supposé inchangé sur les Monts du Beaujolais et indépendant du peuplement :

$$T_{sc} = T_s + \alpha (\bar{z} - z_r)$$

où T_{sc} désigne la température corrigée, T_s la température brute du pixel d'altitude moyenne \bar{z} , z_r l'altitude de référence et α le gradient thermique (positif).

Le modèle numérique de terrain nécessaire a été construit à partir de la carte topographique au 1/100 000 avec une résolution de 3 pixels pour 500 m. L'altitude moyenne \bar{z} introduite dans la correction est donc calculée sur 9 points du modèle de terrain.

B. Résultats

On trouvera, sur les figures 7a, b, c, d, les histogrammes comparés des températures de jour sur les 3 types de peuplements avec et sans correction d'altitude pour les 2 dates du 17 juillet et 24 septembre 1978.

Dans les 2 cas, (figures 7a, 7c), la sapinière se révèle, en données brutes, légèrement plus froide — environ $1,5^\circ\text{C}$ — que les reboisements en timbre poste. Les reboisements massifs ont une température de surface intermédiaire. Cette répartition semble correspondre à l'étagement des 3 types de peuplements, les sapins occupant les zones les plus élevées. L'importante répartition verticale de chaque classe et leurs nombreuses interférences à une altitude donnée peuvent expliquer la forte dispersion observée sur les histogrammes ainsi que le chevauchement de ces derniers. La taille critique des unités au sol vis-à-vis des dimensions du pixel et l'erreur de superposition entre image thermique et carte des peuplements tendent aussi à accentuer la confusion entre les histogrammes.

Comme on peut l'observer sur les figures 7b et 7d, l'élimination de l'effet de l'altitude entraîne une réduction de la dispersion sur tous les histogrammes. Le résultat le plus intéressant est la coïncidence des réponses des 2 types de reboisements, alors que la sapinière reste plus froide (environ 1°C de différence). A l'altitude semble se superposer un autre effet qui pourrait être celui de la nature du couvert : au contraire de la sapinière qui présente un taux de couverture important, les reboisements laissent voir une forte proportion de sol nu ou de végétation spontanée plus chauds, soit entre les arbres (cas des jeunes reboisements massifs), soit par suite du mélange boisé-non boisé (cas des reboisements en timbres-poste).

VI. CONCLUSION

La confrontation avec la topographie à 2 dates — juillet et septembre 1978 — des données acquises par le satellite H.C.M.M. au-dessus d'une sapinière a mis en évidence l'effet prépondérant de l'altitude sur les images thermiques de jour. Ainsi a-t-on obtenu une relation statistique linéaire entre la température de surface (sans correction atmosphérique) et l'altitude, avec des gradients, 0.7 et $0.84^\circ\text{C}/100$ m, proches de ceux que l'on rencontre généralement pour la température de l'air. Il serait intéressant de voir comment les effets de pente et d'orientation, gommés ici par la forêt, se traduisent sur des sols nus ou à faible taux de couverture pour lesquels températures de l'air et de surface diffèrent beaucoup.

De nuit, la modélisation de l'effet du relief est rendue difficile du fait d'inversions de profils liées à des accumulations d'air froid dans les dépressions. Mais la netteté même de ces phénomènes sur les images démontre l'intérêt des scènes nocturnes — malgré l'heure précoce d'acquisition — pour des études microclimatiques fines, telles que la discrimination de zones gélives en fond de vallée.

La comparaison des températures de surface de jour sur 3 types de peuplements résineux a montré qu'en dehors du relief, les différences observées pourraient être attribuées à l'hétérogénéité de la composition du pixel, la température augmentant avec la proportion de sol non boisé. Cela confirme encore une fois la difficulté d'associer la température moyenne mesurée à l'un des éléments constitutifs du pixel ou même à son environnement et la nécessité d'estimer correctement les limites des possibilités de l'imagerie H.C.M.M. (surtout la résolution) vis-à-vis des phénomènes que l'on veut caractériser.

De façon globale, cette étude, que l'on pourrait qualifier de préliminaire puisqu'il s'agit d'une des premières tentatives d'utilisation réelle des données de satellite pour la

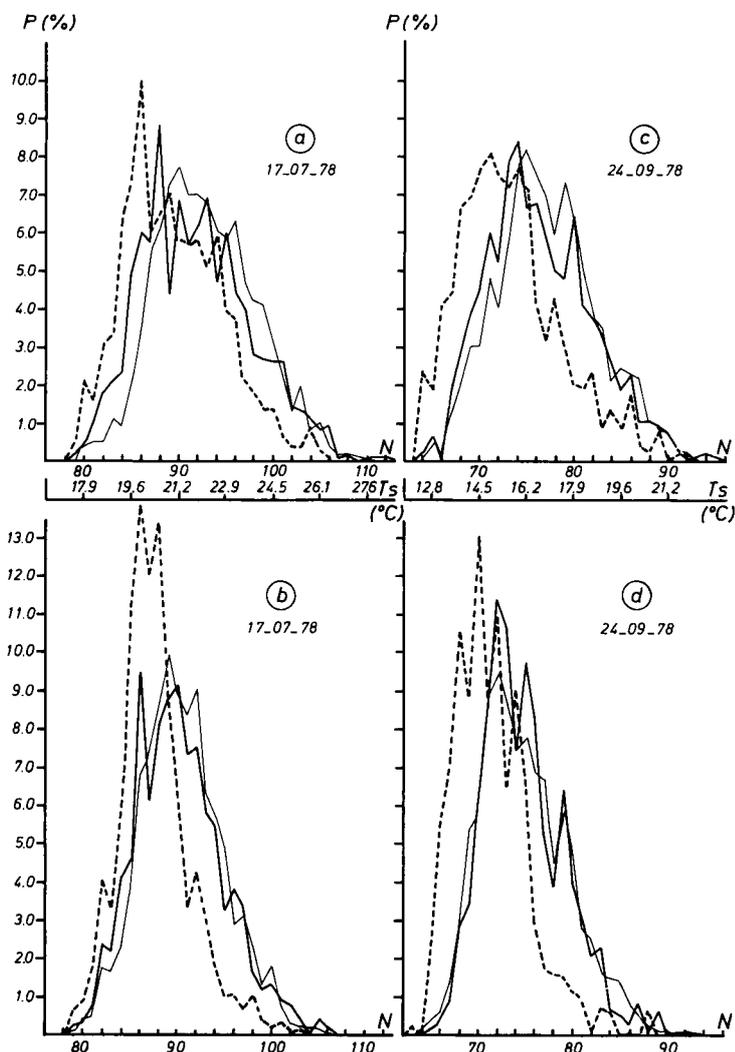


Figure 7
 Histogramme des températures T_s (ou des niveaux H.C.M.M., N) des 3 types de peuplements résineux du Beaujolais (--- sapinière, — reboisements massifs, — reboisements en timbre-poste). (P = nombre de pixels de niveau N rapporté à l'effectif total de la classe considérée).
 a) : 17.07.78, données brutes
 b) : 17.07.78, données corrigées de l'effet de l'altitude
 c) : 24.09.78, données brutes
 d) : 24.09.78, données corrigées de l'effet de l'altitude.

Histograms of temperature T_s (or of H.C.M.M. levels, N) of 3 types of coniferous plantations in Beaujolais (--- spruce forest, — massive plantations, — « stamp » plantations). (P = number of pixels of level N divided by the total number of pixels of the considered type).
 a) : 17.07.78, rough data
 b) : 17.07.78, data corrected for height effect
 c) : 24.09.78, rough data
 d) : 24.09.78, data corrected for height effect.

cartographie des microclimats montagneux, montre les possibilités d'une telle technique par rapport aux études classiques fondées sur des réseaux climatiques au sol (STEFCE, 1981) (*). La poursuite de ces travaux suppose l'extension de telles procédures à des massifs montagneux déjà équipés d'un fort réseau au sol, pour permettre l'étalonnage de la méthode par satellite (travail en cours à la station de Bioclimatologie d'Avignon sur le Mont Ventoux)

et, par ailleurs, l'analyse plus complète de la signification des données température de surface par rapport aux températures de l'air pour différents types de couverts.

Reçu le 15 décembre 1982.
 Accepté le 30 juin 1983.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient MM. DELORD et BOURGEAS de l'Inventaire Forestier National pour la qualité des informations qu'ils ont fournies.

(*) STEFCE : Service Technique d'Etude des Facteurs Climatiques de l'Environnement. I.N.R.A., Station de Bioclimatologie 84140 Montfavet.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bouchon J.**, 1979. Potentialités forestières en France ; le cas du Douglas. C.R. de fin d'étude d'une recherche DGRST « Gestion des ressources naturelles renouvelables ». Groupe « Méthodologie », Décision d'aide 78-7-2-540, Déc. 1979.
- Bugler J. W.**, 1977. The determination of hourly insolation on an inclined plane using a diffuse irradiance model based on hourly measured global horizontal insolation. *Solar Energy*, **19**, 477-491, Pergamon Press.
- Dozier J., Frew J.**, 1981. Atmospheric corrections to satellite radiometric data over rugged terrain. *Remote sensing environ.*, **11**, 191-205.
- Durand R., Legros J. P.**, 1981. Cartographie automatique de l'énergie solaire en fonction du relief. *Agronomie*, **I** (1), 31-39.
- Escourrou G.**, 1981. *Climat et Environnement. Les facteurs locaux du climat*. Masson, Paris, 172 p.
- Geiger R.**, 1959. *The climate near the ground*. Harward University Press, 600 p.
- Heat capacity mapping mission**, 1981. Investigation n° 25 (Tellus Project), Final Report, Centro Comune di Ricerca, ISPRA, Italie.
- Holben B., Justice C.**, 1981. An examination of spectral band ratioing to reduce the topographic effect on remotely sensed data. *Int. J. Remote Sensing*, **2**, (2), 115-133.
- Justice C. O., Wharton S. W., Holben B. N.**, 1981. Application of digital terrain data to quantify and reduce the topographic effect on LANDSAT data. *Int. J. Remote Sensing*, **2**, (3), 213-230.
- Meier R.**, 1981. Simulation of the topographic influence on SLAR data for soil moisture detection in a hilly area. *Remote Sensing Environ.*, **11**, 245-251.
- Peguy C. P.**, 1970. *Précis de climatologie*, Masson et Cie Editeurs, Paris 468 p.
- Ramanantsizehena P., Stoll M. P., Becker F.**, 1981. Réflectance bidirectionnelle et émissivité goniométrique dans l'infrarouge thermique. Méthode de mesure et résultats. « Signatures spectrales d'objets en Télédétection », *Coll. I.N.R.A. n° 5*, Avignon, 8-11 septembre 1981, 209-216.
- Riou C., Lagouarde J. P., Chartier P.**, 1979. Evaporation du sol nu en zone semi-aride et en conditions hivernales. relations avec l'albédo et la température de surface du sol. *Ann. agron.*, **30** (4), 347-361.
- Roberts P. A.**, 1981. The use of terrain height information with satellite imagery. Presented at a conference on « Matching remote sensing technologies and their applications », *Remote Sensing Soc.*, London, 16-18 décembre 1981.
- Seguin B.**, 1982. Applications of remote sensing to agrometeorology. Seminar « Large scale agricultural assessment », Beltsville, USDA Agricultural Research Center.
- S.T.E.F.C.E.**, 1981. Caractérisation climatique du mont Ventoux. I. Le climat thermique. *Note Interne 81/1*.
- Storr D.**, 1972. Estimating effective net radiation for a mountainous watershed. *Boundary Layer Meteorol.*, **3**, 3-14.
- Swift L. W., Knoerr K. R.**, 1973. Estimating solar radiation on mountain slopes. *Agric. Meteorol.*, **12**, 329-336.
- Temps R. C., Coulson K. L.**, 1977. Solar radiation incident upon slopes of different orientations. *Solar Energy*, Vol. 19, 179-184, Pergamon press.