

Etude des propriétés radiatives des aiguilles de Pin Alep

Zoubir ACEM^{1*}, Bernard MONOD¹, Anthony COLLIN²,

Aymeric LAMORLETTE² et Pascal BOULET¹

¹ Nancy Université, LEMTA, CNRS / Equipe Transfert radiatif
Faculté des Sciences et Techniques, BP 70239
54506 Vandoeuvre cedex

² Nancy Université, LEMTA, CNRS / Equipe Feux de Forêts
2 avenue de la Forêt de Haye, BP 160
54504 Vandoeuvre cedex

*(auteur correspondant : zoubir.acem@lemta.uhp-nancy.fr)

Résumé - Ce travail est effectué dans le cadre de l'ANR « P.I.F. : Protection contre les incendies de forêts » dans le but d'approfondir les connaissances dans l'infrarouge (entre 1000 et 6000 cm⁻¹) des propriétés radiatives des végétaux impliqués dans les feux de forêts du bassin méditerranéen. Dans cette communication, on s'intéresse plus précisément à l'étude expérimentale des propriétés radiatives (réflexion, transmission et absorption) des aiguilles de Pin Alep (*Pinus Halepensis*) avec la réalisation de mesures sur des échantillons frais ou secs à divers stades de vieillissement.

1. Introduction

Dans le domaine de la propagation des feux de forêts, la connaissance des propriétés radiatives de la végétation impliquée est primordiale. Et ce d'autant plus si le calcul précis du transfert radiatif est désiré, prenant en compte le caractère directionnel et spectral du rayonnement. Du fait du manque de connaissance sur les caractéristiques radiatives de la végétation, notamment dans l'infrarouge, des approximations simplifiées sont souvent utilisées, telles que l'hypothèse du milieu noir ou gris. La méthode la plus couramment employée fait intervenir la relation de de Mestre [1] pour la détermination du coefficient d'extinction β (m⁻¹) équivalent de la végétation. Ce coefficient constitue alors la seule donnée d'entrée, relative à la végétation, pour la résolution de l'Equation de Transfert Radiatif (ETR). La forme originale de la relation de de Mestre est donnée par :

$$\beta = n_l \frac{S_T}{4} \quad (1)$$

où n_l représente la densité de la végétation (nombre de feuilles.m⁻³) et S_T la surface totale d'une feuille de la végétation. Il apparaît qu'aucune donnée sur les propriétés de surface de la végétation n'est nécessaire pour le calcul de ce coefficient et que seules des considérations géométriques sur la surface d'obstruction sont nécessaires, ce qui est surprenant.

Un premier travail [2] réalisé sur six espèces de la région méditerranéenne a permis de remonter aux propriétés radiatives spectrales et de statuer entre autre sur un comportement similaire et gris de la végétation uniquement pour des nombres d'onde inférieurs à 3500 cm⁻¹. Il a également été démontré que la relation de de Mestre nécessitait d'être corrigée d'un facteur (1-T), T désignant la transmittivité de la matière végétale, une propriété qui varie si l'on veut tenir compte du caractère non gris de la végétation dans l'infrarouge. Plus récemment, ce travail a été élargi à l'étude numérique de l'extinction de ce type de végétation [3], prenant en compte l'orientation des feuilles et/ou l'angle d'incidence du rayonnement

notamment. Dans cette communication, on s'intéresse plus précisément à l'étude expérimentale des propriétés radiatives d'un élément de végétation particulier du fait de sa morphologie : les aiguilles de Pin Alep (*Pinus Halepensis*). L'extinction de ce type de végétation a déjà été étudiée dans le visible [4] ce qui nous incite à l'étendre à l'infrarouge. L'intérêt est de fournir les caractéristiques d'absorption (A) du rayonnement de cette espèce végétale comme données d'entrée pour les modèles de propagation des feux. Cela passe d'abord par une caractérisation complète des propriétés de réflexion (R) et de transmission directionnelle hémisphérique à l'aide de moyens spectroscopiques existants, associant un spectromètre FTIR et un détecteur MCT. Les données expérimentales recueillies permettent également d'estimer les propriétés d'absorption de ces aiguilles. L'originalité de ce travail est aussi liée à la réalisation de mesures sur des échantillons frais ou secs, à divers stades de vieillissement. Une moyenne des propriétés spectrales obtenues, basée sur une moyenne de Planck, a également été effectuée dans le but de fournir des données réalistes facilement utilisables dans les modèles de propagation.

Dans ce qui suit, nous verrons une description détaillée des échantillons étudiés ainsi que des moyens expérimentaux. Les résultats obtenus suite à la campagne de caractérisation des propriétés radiatives des aiguilles de Pin Alep seront ensuite présentés et discutés. Dans un premier temps, on effectue l'analyse des résultats liés à l'étude de reproductibilité sur la caractérisation des propriétés radiatives d'échantillons supposés identiques. Ensuite, notre attention se portera sur l'évolution de ces propriétés au cours d'un vieillissement « contrôlé » corrélé à la perte en masse, essentiellement due à la perte en eau, et à d'autres modifications liées au vieillissement des échantillons. Enfin un travail de caractérisation a également été mené sur des échantillons s'apparentant à des « lits d'aiguilles ».

2. Echantillons et moyen expérimentaux

Le spectromètre employé est de type Bruker IFS66vs doté d'une source Globar. Le rayonnement transmis ou réfléchi est renvoyé vers une sphère intégrante reliée à un détecteur MCT. La gamme spectrale étudiée se situe entre 1000 et 6000 cm^{-1} . La figure 1b) montre une photo du dispositif expérimental dans une configuration d'étude en réflexion. La résolution du spectromètre a été fixée à 4 cm^{-1} et les résultats présentés correspondent à une moyenne sur 10 000 scans fixant ainsi la durée d'une expérience à 6 minutes.

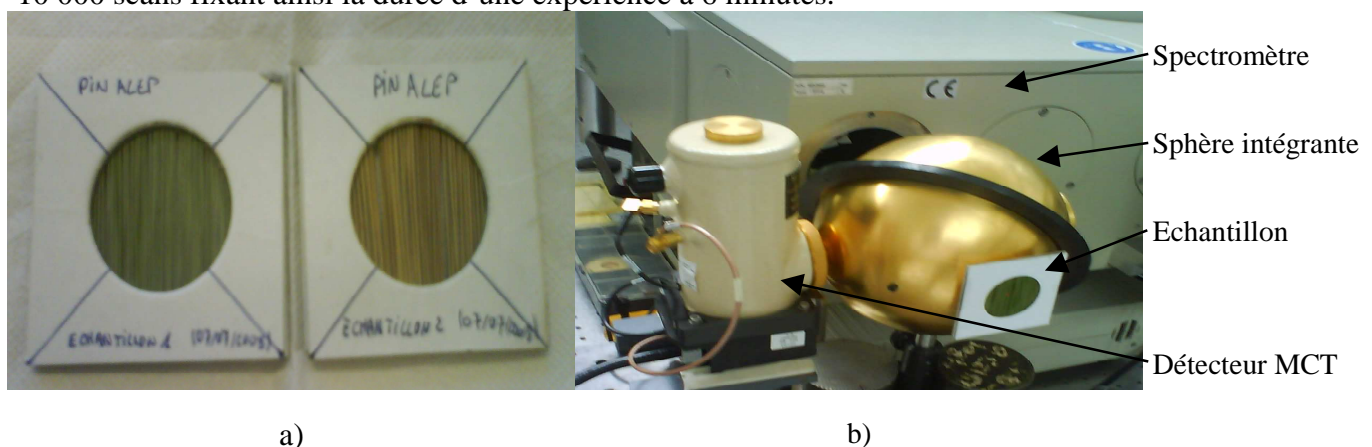


Figure 1 : Echantillon d'aiguilles de Pin Alep et dispositif expérimental

Les échantillons étudiés ont été préparés à partir de branches de Pin Alep fraîchement cueillies (J+5). Ces branches sont constituées d'aiguilles d'environ 6 cm de longueur en moyenne. Ces aiguilles ont été ensuite minutieusement sélectionnées et disposées côte à côte en une mono-couche dans un porte-échantillon pour former les échantillons (voir figure 1a)).

Quatre échantillons, considérés comme identiques, ont ainsi été élaborés. En dépit du soin apporté à cette préparation, l'échantillon n'est pas véritablement un milieu continu et s'apparente plus à une surface poreuse. Cela conduit à une sur-estimation de la transmittivité et à une sous-estimation de la réflectivité des aiguilles de Pin. Cela peut être facilement corrigé en identifiant des bandes de longueurs d'onde où la végétation est censée être opaque comme cela a déjà été fait [2].

3. Résultats et discussions

Etude des propriétés radiatives :

La figure 2a) donne l'évolution spectrale des propriétés de transmission des quatre échantillons d'aiguilles de Pin Alep.

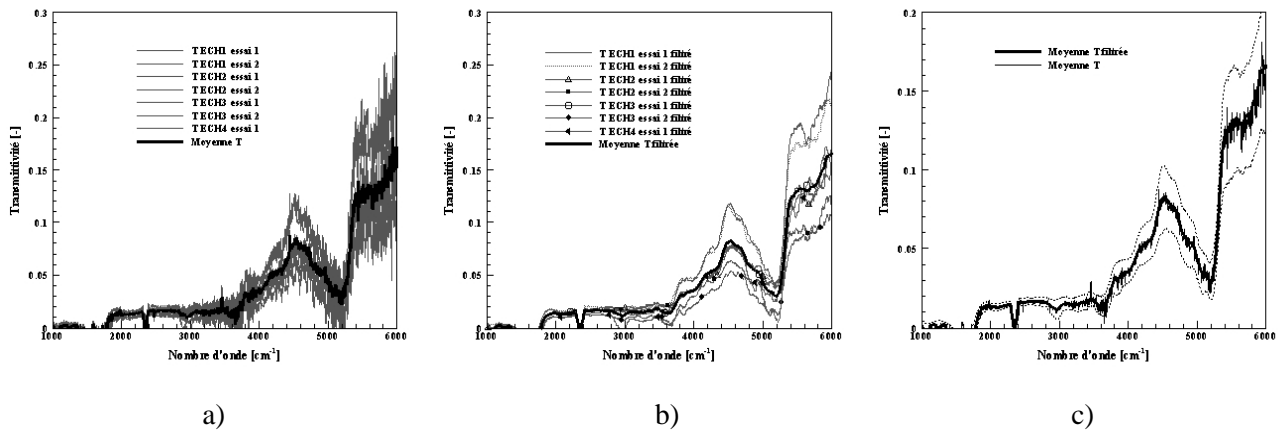


Figure 2 : Propriétés de transmission d'aiguilles de Pin Alep : a) avant filtrage, b) après filtrage, c) comparaison entre moyenne filtrée et non filtrée avec intervalle de confiance.

On constate que la reproductibilité des mesures de transmission n'est pas très évidente surtout au-delà de 4000 cm^{-1} où l'on observe une légère divergence des résultats associée surtout à l'augmentation du bruit de mesure. Même si il faut tenir compte d'un bon nombre d'autres paramètres liés par exemple à l'appareillage (déviation du faisceau incident, bruit de mesure, déviation du signal de référence, faible rapport signal/bruit). Pour palier à ces différentes difficultés et améliorer la précision des résultats obtenus (notamment pour la propriété d'absorption), on procède à un filtrage des mesures à l'aide d'un filtre de type moyenne mobile défini par :

$$\bar{T}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=i-n/2}^{i+n/2} T_k \quad \text{et } n = 2/\Delta t^2 \quad (2)$$

T_i est la valeur du signal enregistrée à l'instant $i\Delta t$ (Δt : pas de temps) et \bar{T}_i sa valeur après filtrage. Les conditions expérimentales choisies pour cette étude imposent $n = 40$.

Les spectres de transmission non filtrés sont donnés sur la figure 2a). On représente également en gras la moyenne de ces spectres. Les spectres obtenus après filtrage sont présentés sur la figure 2b) ainsi que leur spectre moyen en noir. On compare sur la figure 3c) le spectre moyen filtré et celui non filtré. La parfaite superposition de ces deux spectres justifie l'utilisation du filtrage pour améliorer la clarté des résultats sans perte de l'information principale. On présente également sur la figure 2c) l'intervalle de confiance à 95% défini par : $\left[\bar{T} - 2,228 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \bar{T} + 2,228 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right]$, où σ est l'écart type des mesures, n est le

nombre de mesures et la valeur de 2.228 correspond, d'après la loi de Student, au quantile d'ordre 0.95 et de degré $n=10$ (pour tenir compte de la faible valeur de n dans le cas étudié).

On effectue le même travail pour la réflexion et l'absorption. Les résultats sont regroupés sur la figure 3. Pour plus de clarté, on représentera par la suite uniquement les spectres moyens filtrés et non filtrés ainsi que l'intervalle de confiance à 95%.

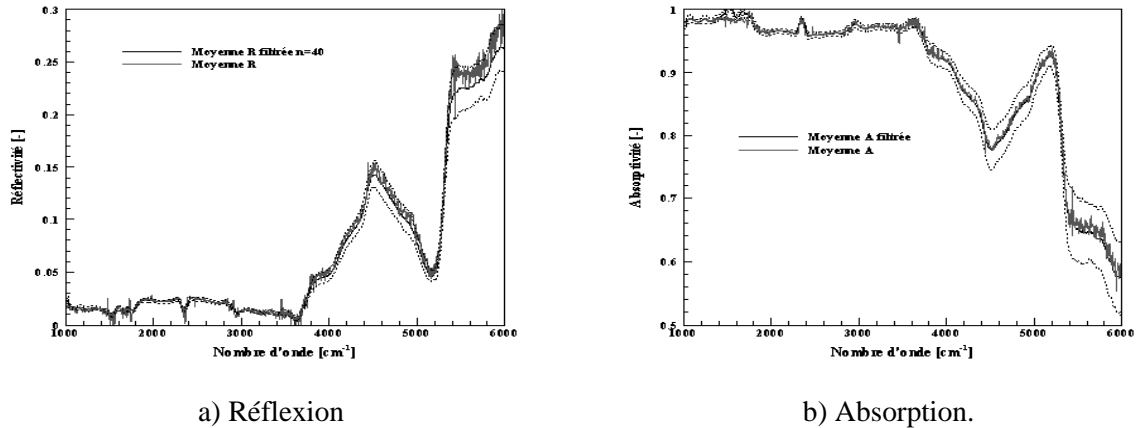


Figure 3 : Propriétés radiatives moyennes des aiguilles de Pin Alep.

On constate d'emblée une meilleure reproductibilité des résultats pour la réflexion. Cela se traduit notamment avec le faible écart entre courbes présentant l'intervalle de confiance à 95% (fig. 3a) entre 1000 et 4000 cm^{-1} . D'après les résultats obtenus sur les propriétés de transmission et de réflexion, on déduit les propriétés d'absorption des aiguilles de Pin Alep présentées en figure 3b). On trouve une absorption moyenne globalement constante entre 1000 et 4000 cm^{-1} et de l'ordre de 0.97 avec un intervalle de confiance à 95% très étroit.

Etude du vieillissement :

L'évolution au cours du temps des propriétés radiatives de chacun des échantillons a également été suivie. On présente sur la figure 4 l'évolution au cours du temps de la perte en masse ainsi que de l'absorption pour quatre nombres d'onde donnés. Ces zones spectrales (2000, 2300, 3500 et 4500 cm^{-1}) ont été choisies de manière à pouvoir comparer l'évolution des propriétés de la végétation au cours du vieillissement là où les gaz environnants (CO_2 , H_2O produits par la combustion) sont les plus émissifs, mais également là où le comportement non gris de la végétation est bien différencié. On présente également l'absorptivité moyenne $\bar{\alpha}$ des échantillons dans la gamme spectrale étudiée donnée par :

$$\bar{\alpha} = \frac{\int_{\Delta\nu} \alpha_\nu L_\nu^0(T) d\nu}{\int_{\Delta\nu} L_\nu^0(T) d\nu}$$

où L_ν^0 représente la luminance de Planck du corps noir à la température $T=1000$ K et $\Delta\nu$ la plage de nombres d'onde étudiées.

Que ce soit pour l'échantillon 1 ou 2, les écarts relatifs au niveau des absorptions estimées à 2000, 2300 et 3500 cm^{-1} sont très faibles. On peut alors statuer sur les propriétés constantes dans le temps des aiguilles de Pin jusque 4000 cm^{-1} . Par contre, on trouve des écarts nettement plus importants sur les absorptions estimées à 4500 cm^{-1} . Globalement l'absorptivité moyennée des échantillons 1 et 2 sur l'ensemble de la bande spectrale varie entre 0.9 et 0.95 au cours du temps.

On observe par ailleurs une stagnation au niveau de la perte en masse à partir du vingtième jours. Cette tendance se répercute de manière quasi-systématique sur les propriétés radiatives et ce quelle que soit la longueur d'onde considérée.

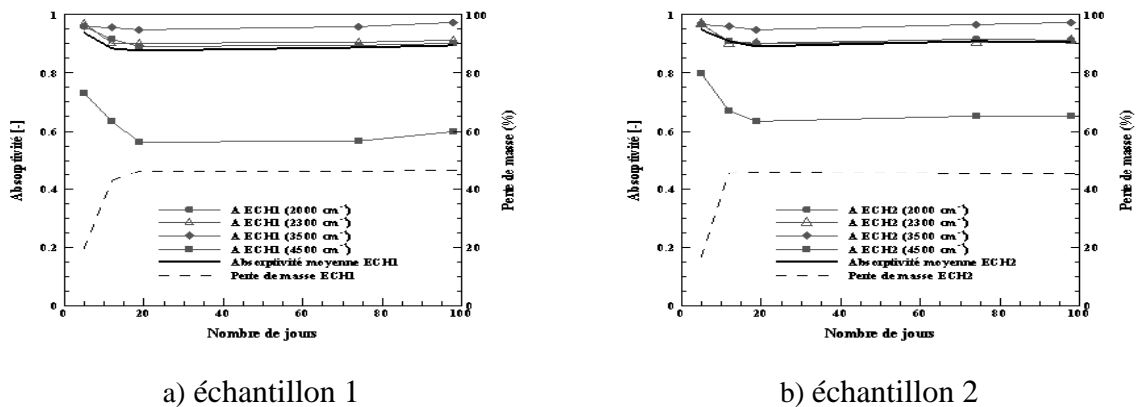


Figure 4 : Evolution de l'absorption pour différents nombres d'onde et perte en masse.

Lit d'aiguilles

Un travail de caractérisation a également été mené sur des échantillons s'apparentant à des « lits d'aiguilles », que l'on retrouve souvent au pied des arbres. De nouveaux échantillons ont été élaborés en disposant les aiguilles dans des porte-échantillons d'épaisseurs différentes comme le montre la figure 5a). L'idée est d'observer l'évolution des propriétés radiatives en faisant varier notamment la densité de végétation dans le porte échantillon. Il conviendra également de comparer les propriétés du lit avec celles des aiguilles uniquement. Avec les densités et les épaisseurs de porte échantillon choisies, la transmission des lits d'aiguilles est nulle. On dispose de deux porte-échantillons d'épaisseur 5 et 10 mm respectivement. Deux densités de végétation différentes ont été étudiées à l'aide du porte-échantillon de 5 mm d'épaisseur en y disposant un nombre d'aiguilles différent, 70 et 35 respectivement. Pour comparer l'influence de l'épaisseur d'échantillon traversée, on reconduit les mesures sur l'échantillon de 10 mm d'épaisseur en gardant la même densité (140 aiguilles). Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 5b) où l'on représente également les propriétés de l'échantillon 1 seul au même stade de vieillissement (supposées représenter les propriétés intrinsèques de l'aiguille de Pin Alep).

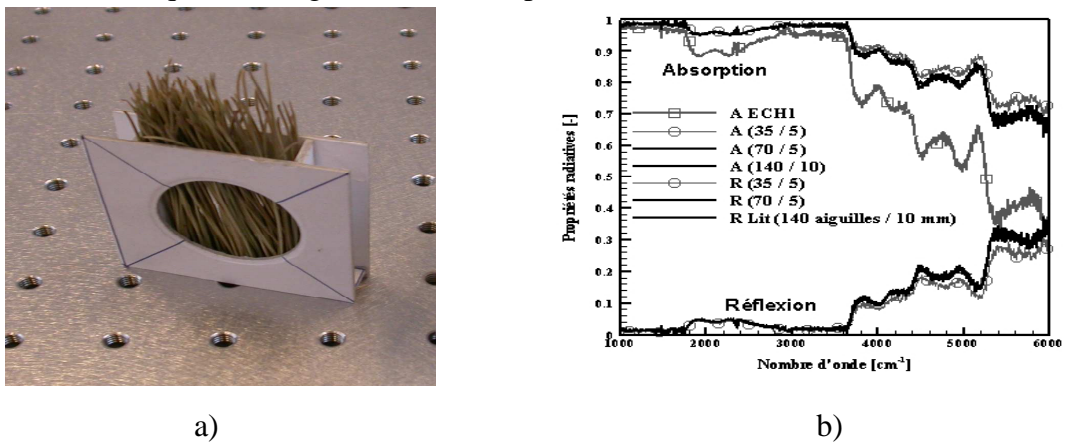


Figure 5 : a) Photo de l'échantillon de lits d'aiguilles ; b) Propriétés radiatives des lits d'aiguilles.

On constate qu'il n'y a pratiquement pas de différence dans les propriétés radiatives des lits de même densité et d'épaisseurs différentes. Par contre pour des échantillons de même

épaisseur, on observe une légère différence selon la densité de l'échantillon à partir de 4000 cm^{-1} , où la réflexion a tendance à augmenter lorsque la densité augmente. On évalue au final une absorptivité moyenne entre 1000 et 6000 cm^{-1} pour le lit d'aiguilles à 0.94 (densité 140/10mm et 70/5mm) et 0.95 (densité 35/5mm). L'absorptivité moyenne de l'échantillon 1 était estimée à 0.9 entre 1000 et 6000 cm^{-1} . Il en résulte une différence d'environ 5% avec l'absorptivité moyenne des lits d'aiguilles.

4. Conclusion

Une série de mesures des propriétés radiatives des aiguilles de *Pinus halepensis* dans l'infrarouge entre 1000 et 6000 cm^{-1} a été réalisée dans un premier temps. Ce travail a permis de révéler un comportement gris, ou quasiment noir, des aiguilles de Pin entre 1000 et 4000 cm^{-1} uniquement avec une absorption moyenne de l'ordre de 0.97. Au-delà de 4000 cm^{-1} les propriétés varient par contre fortement.

Notre attention s'est ensuite portée sur l'étude de l'évolution de l'absorption au cours du temps dans des zones spectrales bien définies. Ce travail a également été corrélé à une étude de la perte en masse des échantillons. L'absorption et plus généralement les propriétés radiatives des aiguilles se sont avérées très sensibles à la perte en masse des échantillons. En effet, la comparaison de leurs évolutions montre une diminution de l'absorption liée à une perte en masse. D'autre part, on assiste à une stagnation de la perte en masse des échantillons au bout de vingt jours qui correspond à une stabilisation de l'évolution des propriétés radiatives. Les résultats obtenus permettent également de statuer sur le comportement gris des aiguilles de Pin jusque 4000 cm^{-1} , mais pas au-delà avec une absorptivité moyenne ramenée à 0.9 au delà de 20 jours.

Finalement, un travail de caractérisation mené sur des échantillons s'apparentant à des « lits d'aiguilles » a permis de mettre en exergue une différence d'environ 5% entre l'absorptivité moyenne des lits d'aiguilles et celle des aiguilles seules disposées en monocouche.

Ce travail expérimental a permis d'approfondir notre connaissance sur les propriétés radiatives des aiguilles de Pin et de fournir des informations fines à destination des modèles de propagation du rayonnement dans les feux. On envisage par la suite une étude numérique permettant l'identification du coefficient d'extinction de ce type de végétation afin de compléter cette étude.

Références

- [1] N.J. de Mestre et al., Uniform propagation of a planar fire front without wind, *Combustion Science and Technology*, vol. 65, n°4-6 (1989), 231-244.
- [2] B. Monod, A. Collin, G. Parent and P. Boulet. Infrared radiative properties of vegetation involved in forest fires. *Fire Safety J.*, (2008) doi:10.1016/j.firesaf.2008.03.009.
- [3] Z. Acem, A. Lamorlette, A. Collin and P. Boulet. Analytical determination and numerical computation of extinction coefficients for vegetation with given leaf distribution. *International Journal of Thermal Sciences*. Renvoyée le 30 Septembre 2008 en version révisée.
- [4] G.C. Vaz, J.C.S. André and D.X. Viegas. Estimation of the radiation extinction coefficient of natural fuel beds. *Int. J. Wildland Fire*, Vol. 13, No 1, pp 65–71, 2004.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet P.I.F. (Protection contre les Incendies de Forêts) de l'ANR sous le contrat n° 0264-01.