

# Etude des propriétés radiatives de la végétation à destination des modèles de propagation des feux de forêts.

Anthony COLLIN<sup>1</sup>, Aymeric LAMORLETTE<sup>1</sup>, Zoubir ACEM<sup>2</sup>, Pascal. BOULET<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Nancy Université, LEMTA - UMR 7563 / Equipe Feux de Forêts  
2 avenue de la Forêt de Haye, BP 160  
54504 Vandoeuvre cedex

<sup>2</sup>LEMTA - UMR 7563 / Equipe Transfert radiatif  
Faculté des Sciences et Techniques, BP 239  
54506 Vandoeuvre cedex

\* (auteur correspondant : [pascal.boulet@lemta.uhp-nancy.fr](mailto:pascal.boulet@lemta.uhp-nancy.fr))

**Résumé** - Nous avons réalisé l'étude des propriétés radiatives de deux espèces végétales *arbutus unedo* (arbousier) et *quercus coccifera* (chêne kermès). Des mesures spectroscopiques ont permis de déduire l'absorptivité spectrale dans une large gamme de l'infrarouge. L'hypothèse courante « surface végétale grise » est discutable au dessus de 3500 cm<sup>-1</sup>. Une étude numérique destinée à l'identification d'un coefficient d'extinction équivalent a également permis d'évaluer les résultats obtenus avec la corrélation de De Mestre, fréquemment utilisée dans le domaine de la simulation des feux.

## Nomenclature

		<i>Symboles grecs</i>	
$l$	libre parcours moyen, $m$	$\alpha$	absorptivité
$N$	nombre de densité de feuilles, $m^{-3}$	$\beta$	coefficient d'extinction, $m^{-1}$
$S_t$	Surface totale d'obstruction, $m^2$	$\rho$	réflectivité directionnelle-hémisphérique
		$\tau$	transmittivité directionnelle-hémisphérique

## 1. Introduction

Si le rayonnement thermique est depuis longtemps identifié comme l'un des modes de transfert de chaleur prépondérants dans la propagation des feux, nous manquons encore d'information sur les caractéristiques radiatives de la végétation dans l'infrarouge. Nous avons donc entrepris une étude des propriétés radiatives de végétaux en utilisant des moyens spectroscopiques. Des feuilles de chêne kermès (*quercus coccifera*) et d'arbousier (*arbutus unedo*) ont été prélevées sur site (région de Marseille) et ont fait l'objet de mesures de réflexion et transmission directionnelle hémisphérique dans une gamme spectrale allant de 600 à 7000 cm<sup>-1</sup>. Ces données ont ensuite été exploitées pour caractériser ces espèces. La littérature sur les feux de forêts utilise de façon très généralisée la corrélation de De Mestre [1] pour établir la valeur du coefficient d'extinction équivalent de la végétation, coefficient utilisé ensuite dans un modèle de propagation. Cette corrélation est couramment appliquée, parfois en utilisant l'émissivité comme facteur correctif dans l'idée de prendre en compte des propriétés radiatives qui s'éloignent du cas « idéal » du corps noir. Nous verrons plus loin dans cet article un rappel de la corrélation et les moyens utilisés pour la corriger. Nous avons voulu profiter des données expérimentales recueillies sur la végétation pour prendre en compte des propriétés réalistes pour les deux espèces étudiées ici. En parallèle, nous avons mené une étude par technique de lancers de rayons pour identifier numériquement un coefficient d'extinction. En introduisant les valeurs de réflectivité et transmittivité mesurées,

il est possible de simuler la propagation du rayonnement à travers un milieu végétal reconstitué numériquement. La première phase, présentée ici, concerne pour le moment une distribution de feuilles réparties aléatoirement. Ensuite, nous prévoyons d'intégrer des données biologiques plus réalistes qui nous permettront de simuler le comportement de végétaux réels. Ce que nous proposons ici est une comparaison, sur cette reconstitution numérique, du coefficient d'extinction identifié avec ce que donne la corrélation de De Mestre, en utilisant l'hypothèse d'une surface radiative « noire » puis des propriétés réalistes issues de nos mesures.

Dans ce qui suit, nous verrons les points essentiels du montage spectroscopique utilisé expérimentalement et une analyse des données recueillies. Nous verrons ensuite comment nous avons procédé numériquement pour identifier des coefficients d'extinction et quels sont les résultats de nos comparaisons avec la corrélation de De Mestre. Nous discuterons enfin des perspectives ouvertes par ce travail.

## 2. Caractérisation par mesures spectroscopiques

Le travail que nous avons réalisé ici est analogue à l'étude systématique qui a été réalisée dans la zone UV-Visible dans les années 90 notamment. On trouve en particulier des données de ce type dans Jacquemoud et al. [2] et dans la base de données du projet LOPEX 93 [3]. En revanche, peu de données sont disponibles dans la littérature, à notre connaissance, dans la gamme de l'infrarouge qui nous intéresse pour la propagation des feux. Considérant une température de flamme indicative autour de 700°C (réaliste compte tenu d'essais de feux réalisés à échelle intermédiaire en tunnel à feu), le maximum d'émission est approximativement à 2,9  $\mu\text{m}$  (ce qui correspond au nombre d'onde 3450  $\text{cm}^{-1}$ ), l'essentiel de l'énergie étant rayonnée entre 1,5 et 15  $\mu\text{m}$  (entre 6600 et 660  $\text{cm}^{-1}$ ), ce qui correspond à la zone dans laquelle nous devons caractériser la végétation.

Le spectromètre à transformée de Fourier utilisé (Figure 1) est du type IFS66v/s de *Bruker*. Les mesures ont été réalisées à partir de 5000 scans moyennés pour limiter le bruit de mesure (on verra sur les résultats présentés plus loin que le bruit résultant est de l'ordre de 1%). Une étude plus approfondie sur la répétabilité pour différents échantillons du même type serait nécessaire pour évaluer plus précisément l'incertitude de mesure (au-delà de l'étude préliminaire présentée ici). La résolution utilisée dans les résultats présentés plus loin est de 2 ou 4  $\text{cm}^{-1}$  selon les cas. Le faisceau en sortie de spectromètre est focalisé sur l'échantillon puis collecté par une sphère intégrante après transmission ou réflexion par l'échantillon. La sphère est spécifiquement dédiée à cette gamme de l'infrarouge avec un revêtement de type *infragold* lui conférant une réflectivité de 0.95 (donnée constructeur, quasiment constante dans la gamme de longueur d'onde). Le diamètre de la sphère (15 cm) et la taille du faisceau sur l'échantillon (cercle de diamètre 1,8 cm) sont largement supérieurs aux inhomogénéités observées sur les échantillons (de l'ordre du mm). Le détecteur est du type MCT, refroidi à l'azote liquide, fabriqué par *Kolmar technologies*. Nous travaillons en mode photovoltaïque pour assurer une bonne linéarité. Sa bande passante maximale est 850 - 12000  $\text{cm}^{-1}$ . Compte tenu des bandes spectrales accessibles avec le spectromètre et le détecteur, les résultats présentés ici sont dans la gamme 1000 - 6500  $\text{cm}^{-1}$ , le signal au-delà étant trop faible pour permettre son exploitation.

Un soin particulier a été apporté à la préparation des échantillons et au traitement des données de transmission et de réflexion. Les feuilles ont été placées dans des porte-échantillons assurant leur tenue perpendiculaire à la fenêtre d'entrée de la sphère intégrante. Les échantillons sont en fait tenus dans des anneaux au niveau des bords et la mesure est faite directement sur le végétal sans nécessiter de maintien par une fenêtre transparente ce qui évite

tout problème de réflexion parasite sur les porte-échantillons. Les mesures de base comprennent une mesure sur sphère ouverte en entrée sans échantillon et fermée en sortie ( $\varphi_{réf}$ ), une mesure de « zéro » : sphère ouverte en entrée et sortie sans échantillon en réflexion ( $\varphi_{zéro}$ ) et les mesures avec échantillon en transmission et en réflexion ( $\varphi_{t\text{ mesuré}}$  et  $\varphi_{r\text{ mesuré}}$ ). Les transmittivités et réflectivités directionnelles hémisphériques  $\tau$  et  $\rho$  sont alors évaluées par :

$$\rho = 0,95 \cdot \frac{\varphi_{r\text{ mesuré}} - \varphi_{zéro}}{\varphi_{réf} - \varphi_{zéro}} \quad \text{et} \quad \tau = \frac{\varphi_{t\text{ mesuré}}}{\varphi_{réf}} \quad (1)$$

La valeur de réflectivité 0,95 est incluse dans l'évaluation de  $\rho$  pour obtenir une grandeur de réflectivité absolue. Elle correspond au coefficient de réflexion du matériau de référence utilisé pour obstruer la sphère en l'absence de l'échantillon (cette correction n'a pas lieu d'être en transmission parce que le rapport entre la mesure de référence et la mesure sur échantillon donne directement la transmittivité absolue).

L'absorptivité spectrale des échantillons est ensuite déduite et analysée en fonction de la longueur d'onde avec la conservation de l'énergie :

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2)$$

Les figures 2 et 3 synthétisent les résultats obtenus sur les deux espèces (*arbutus unedo* et *quercus coccifera*) en réflexion, transmission et absorption. Ils attestent du caractère non-gris des végétaux, même si les variations spectrales sont faibles en dessous de  $3500 \text{ cm}^{-1}$ . On observe des évolutions qui sont similaires pour les deux espèces. C'est le cas particulièrement pour l'absorption spectrale qui pour ces deux espèces pourtant différentes sont très proches l'une de l'autre. Pour la gamme spectrale évoquée plus haut, il reste que l'échantillon ne peut pas simplement être considéré gris, encore moins noir comme c'est parfois le cas, en dépit des complications que l'hypothèse non-gris introduit dans la modélisation. Nous avons réalisé une moyenne sur l'ensemble de la gamme spectrale, pondérée par la luminance de Planck pour un corps noir à  $700^\circ\text{C}$  (température indicative évoquée plus haut, même s'il n'est pas satisfaisant de considérer que la flamme rayonne comme un corps noir). Nous obtenons des valeurs moyennes d'absorptivité de 93% et 90 % pour l'arbousier et le chêne kermès respectivement. Il s'agit là d'une indication à prendre en compte dans une modélisation qui baserait son analyse sur l'hypothèse « surface végétale grise ». Il apparaît quand même qu'un modèle par bandes serait plus raisonnable pour une prise en compte plus fine de la propagation du rayonnement, l'absorptivité spectrale de *quercus coccifera* variant par exemple entre 0,3 et 0,97. Une étude de sensibilité à cet aspect non gris menée sur un modèle de propagation paraît en tout cas nécessaire.

Une étude complémentaire du même type a été réalisée sur les mêmes échantillons 40 jours après prélèvement afin de mettre en évidence le rôle éventuel de la teneur en eau. Les résultats sont présentés pour l'absorption seule (Figure 4) avec des lignes plus fines pour les échantillons « secs ». On met en évidence un effet associé à la perte en eau qui demanderait, pour ne pas rester qualitatif, à être combiné avec une pesée de la feuille qui permettrait de corréliser l'évolution de l'absorption de rayonnement avec l'évolution mesurée de la teneur en eau. Il s'agissait ici d'observer un effet éventuel, pour prévoir une procédure adaptée de prélèvement en vue d'essais complémentaires. Il apparaît que l'absorption diminue dans certaines gammes spectrales (infrarouge court essentiellement). Sur ces deux espèces l'absorptivité moyennée dans les mêmes conditions que précédemment a été évaluée à 88,5% (arbousier) et 86 % (chêne kermès). L'évolution est réelle, quoique restant modérée. Une prise en compte de la variation de ces propriétés dans un modèle complet de propagation des feux au cours de la phase de séchage puis pyrolyse de la végétation ne nous semble pas forcément nécessaire (compte tenu de la complexité que cela induirait).

### 3. Simulation numérique

En parallèle, nous avons développé un code de lanciers de rayons qui simule la propagation du rayonnement à travers un milieu végétal constitué de feuilles. Nous reconstituons un milieu numériquement en faisant évoluer l'orientation des feuilles, leur nombre et leur géométrie. Ce code peut fonctionner dans sa version de base sur des feuilles supposées « noires » en ce qui concerne les propriétés radiatives ou en utilisant comme données de base les résultats issus de nos mesures spectroscopiques (absorptivité, réflectivité et transmittivité). L'analyse statistique des résultats donne alors accès au coefficient d'extinction du milieu homogène équivalent au domaine végétal étudié, ainsi qu'aux paramètres qui l'influencent. Cet outil numérique est destiné à fournir des données d'entrée pour les codes de propagation qui incluent le rayonnement sous la forme de l'ETR (Equation du Transfert Radiatif). Le principe est une méthode statistique classique avec détermination du libre parcours moyen  $l$  caractéristique du milieu végétal en fonction des données morphologiques du milieu. L'inversion de ce libre parcours moyen donne ensuite le coefficient d'extinction  $\beta$ . Pour des raisons de concision, le détail de la méthode n'est pas donné ici mais pourra être trouvé dans la référence Monod *et al.* [4]. Rappelons la corrélation de De Mestre [1], qui sera utilisée pour comparer nos résultats avec ce qui est appliqué habituellement dans la littérature. Elle fait intervenir la densité volumique de feuilles et la surface totale d'obstruction :

$$\beta = \frac{NS_t}{4} \quad (3)$$

La figure 5 présente l'évolution du coefficient d'extinction pour des densités de végétation croissantes, en fonction de la surface spécifique de feuilles. Les symboles correspondent à des essais numériques réalisés pour une distribution aléatoire des feuilles dans l'espace en prenant pour forme de base une feuille typique des espèces arbousier et chêne kermès (forme réelle introduite après numérisation d'une feuille réelle). Il s'agit d'un cas où les feuilles sont supposées parfaitement absorbantes (surfaces noires). La ligne continue correspond au résultat donné par la corrélation de De Mestre. Ces comparaisons attestent de la validité de la corrélation dans la mesure où les résultats ne s'écartent que pour les grandes densités, et restent malgré tout presque confondus. L'incertitude statistique des résultats numériques est certes plus grande mais n'explique pas la déviation. Par contre, ces conditions de très grandes densités ne sont pas observées dans la nature au niveau de la végétation réelle et si la simulation peut être réalisée sur un plan numérique il est vrai qu'on arrive dans des situations où le nombre de feuilles devient vraiment grand. Notre répartition aléatoire produit alors des intersections de feuilles qui sont non physiques et peuvent peut-être expliquer ce léger biais.

Les limitations de la corrélation (3) apparaissent si on introduit des propriétés radiatives réalistes de la végétation telles que celles mesurées par voie spectroscopique. En particulier, nous avons regardé comment le coefficient d'extinction est affecté si on utilise les propriétés radiatives suivantes :  $\alpha = 0,97$ ,  $\rho = 0,03$ ,  $\tau = 0$  ou  $\alpha = 0,35$ ,  $\rho = 0,33$ ,  $\tau = 0,32$  (Figure 6). Il s'agit là de données observables pour *quercus coccifera* autour de  $3000 \text{ cm}^{-1}$  (référéncé « Nombre d'onde 1 » sur la figure) et  $6000 \text{ cm}^{-1}$  (« Nombre d'onde 2 ») respectivement. On voit que dans le premier cas, finalement peu éloigné de celui du corps noir, on n'a pas d'écart avec la corrélation (symboles noirs confondus avec la ligne continue et les résultats obtenus avec l'hypothèse « feuilles noires »). Au contraire, les symboles représentatifs de l'étude numérique s'éloignent de la ligne typique donnée par la corrélation dans le deuxième cas (cercles noirs). L'évolution reste toutefois linéaire et on s'aperçoit qu'on peut corriger sans difficulté les résultats obtenus en multipliant par le facteur correctif  $(\alpha + \rho)$  ou encore  $(1 - \tau)$ . La droite référencée « De Mestre corrigée » est alors parfaitement en accord avec le calcul. Ce résultat est intéressant dans la mesure où les essais de correction parfois vus dans la littérature

se basent sur l'émissivité seulement. On voit ici que c'est l'écart par rapport à un milieu opaque qui compte, pas seulement la capacité d'absorption. Pour information, ces facteurs  $(1 - \tau)$  moyennés sur la gamme spectrale complète dans les mêmes conditions que plus haut (moyenne pondérée par la luminance du corps noir à 700°C) sont respectivement 0,98 et 0,97 pour l'arbousier et le chêne kermès. On voit alors que la correction nécessaire en moyenne est en toute objectivité peu différente de 1. Il n'en reste pas moins que sur un plan spectral, la correction peut s'avérer plus forte : jusque 0,65 selon les données recueillies sur nos spectres de transmission.

Dans le même esprit d'évaluation des propriétés radiatives, les autres essais en cours dans notre équipe de recherche concernent la variation du coefficient d'extinction avec la direction du rayonnement, et l'introduction d'une distribution spatiale plus réaliste des feuilles simulant un arbre réel par exemple.

## 4. Conclusion

Nous avons étudié les propriétés radiatives de deux espèces végétales couramment impliquées dans les feux de forêt dans le bassin méditerranéen. L'enjeu est la possibilité de délivrer des informations fines à destination des modèles de propagation du rayonnement dans les feux. Un banc de mesures spectroscopiques en réflexion et transmission nous a permis de déduire et d'étudier l'absorptivité spectrale de ces espèces dans l'infrarouge. Les hypothèses « surface noire » ou « surface grise » sont clairement mises en défaut (sauf éventuellement au-delà de 3500  $\text{cm}^{-1}$ ). Si un traitement fin de la propagation du rayonnement est souhaité, un modèle par bande nous semble nécessaire. Si des propriétés moyennées sont jugées suffisantes (en particulier pour ne pas alourdir les temps de calculs dédiés au rayonnement dans un modèle de propagation complet) il apparaît que l'absorptivité des deux espèces dans l'infrarouge est assez peu différente (cela demande à être confirmé de façon plus générale sur d'autres espèces, un travail qui est en cours) : la valeur moyenne est de l'ordre de 90%.

Sur un plan numérique une méthode de lancés de rayons nous a permis d'évaluer le coefficient d'extinction d'un milieu végétal constitué numériquement de feuilles réparties aléatoirement dans l'espace. Les valeurs obtenues sont en accord avec la corrélation de De Mestre, là où les feuilles se comportent à peu près comme des surfaces noires. Par contre, si la transmittivité croît, une correction par un facteur  $(1 - \tau)$  est nécessaire.

## 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] S. Jacquemoud *et al.*, Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model, *Remote Sensing Environment*, 56-3 (1996), 194-202.
- [3] B. Hosgood *et al.*, *Leaf Optical Properties Experiment 93 (LOPEX 93)*, Rapport de l'European Commission Joint Research Centre Institute for Remote Sensing Applications, EUR-16095-EN (1995).
- [4] B. Monod *et al.*, Infrared radiative properties of vegetation involved in forest fires, *en cours d'expertise par Fire safety Journal* (2007)

**Remerciements.** Ce travail a été réalisé dans le cadre du contrat ANR n° NT05-2\_44411 Protection contre les Incendies de Forêts. Il a bénéficié de la collaboration avec O. Séro-Guillaume du LEMTA et l'équipe de B. Porterie de l'IUSTI.

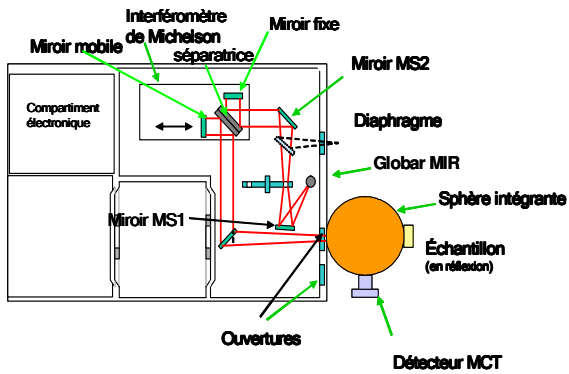


Figure 1. Description du banc de mesures spectroscopiques, montage en réflexion.

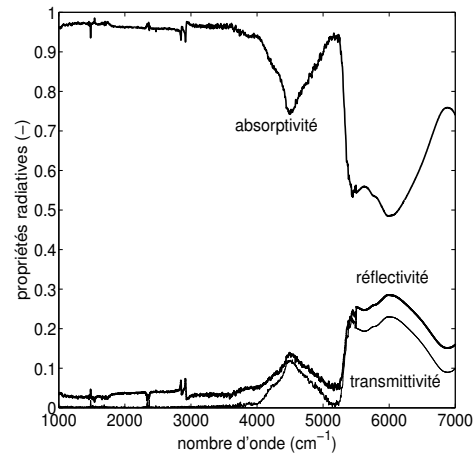


Figure 2. Résultats de réflectivité, transmittivité et absorptivité pour *arbutus unedo*, en fonction du nombre d'onde.

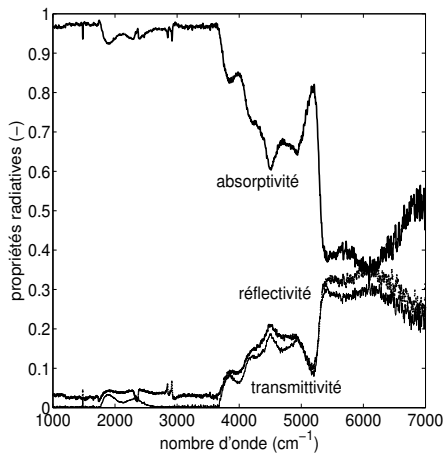


Figure 3. Résultats de réflectivité, transmittivité et absorptivité pour *quercus coccifera*, en fonction du nombre d'onde.

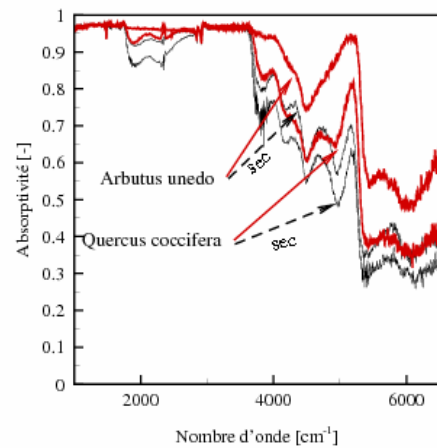


Figure 4. Comparaison des absorptivités obtenues sur échantillons, 2 et 40 jours après prélèvement.

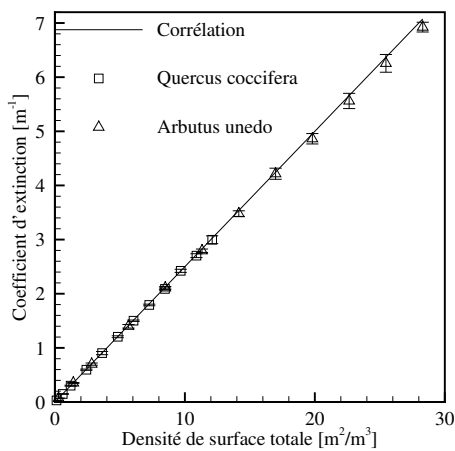


Figure 5. Simulation numérique du coefficient d'extinction et comparaison avec la corrélation de De Mestre avec l'hypothèse de feuilles rayonnantes comme des surfaces noires.

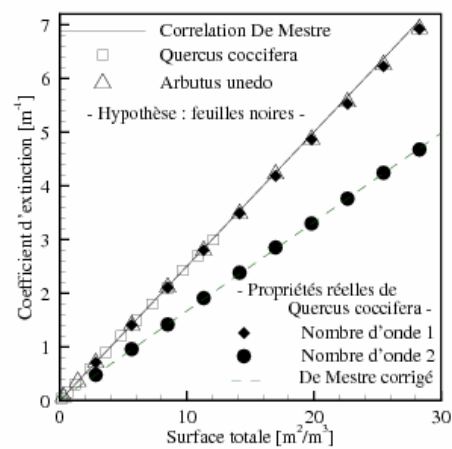


Figure 6. Simulation numérique du coefficient d'extinction – Introduction de propriétés radiatives réalistes.