

Suivi de la teneur en eau de la végétation méditerranéenne par télédétection. Application au risque de feu de forêt.

DAURIAC Fabien¹, DESHAYES Michel¹, GILLON Dominique², ROGER Jean-Michel³

¹Unité Mixte de Recherche Structures et Systèmes Spatiaux Cemagref-Engref (UMR 3S)
Maison de la Télédétection
500, Rue Jean-François Breton
34 093 MONTPELLIER CEDEX 5
Téléphone : +33 4 67 54 87 54 - Fax : +33 4 67 54 87 00
E-Mail : dauriac@teledetection.fr et deshayes@teledetection.fr

²Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE)
UPR 9056 - CNRS
1919, Route de Mende
34 293 MONTPELLIER CEDEX 5
Téléphone : +33 4 67 61 32 92 - Fax : +33 4 67 41 21 38
E-Mail : gillon@cefe.cnrs-mop.fr

³Unité Génie Instrumental pour la Qualité Agroalimentaire (GIQUAL)
CEMAGREF
361, Rue Jean-François Breton - BP 5095
34 033 MONTPELLIER CEDEX 1
Téléphone : +33 4 67 04 63 83 - Fax : +33 4 67 63 57 95
E-Mail : jean-michel.roger@cemagref.fr

Résumé

La forêt méditerranéenne est sujette chaque été à de nombreux incendies, difficiles à prévoir et à localiser. La finalité de notre étude est d'améliorer cette localisation du risque d'incendie en intégrant au système actuel de prévention des feux des informations tirées des images satellitaires.

Les satellites d'observation de la Terre scrutent les milieux naturels avec une précision spatiale, spectrale et temporelle de plus en plus grande. Plusieurs paramètres physiologiques des plantes sont étudiés au travers des domaines visible et infrarouge du spectre électromagnétique.

La phase expérimentale du projet a consisté à mesurer pendant l'été 2001 l'évolution spatio-temporelle de la teneur en eau des feuilles de deux chênes méditerranéens (chêne vert *Quercus Ilex* et chêne kermès *Quercus Coccifera*) sur plusieurs sites autour de Montpellier. Ces mesures de terrain sont ensuite mises en relation avec les images satellitaires. Plusieurs indices satellitaires sont testés pour évaluer l'humidité de la végétation. Conjointement, des études radiométriques de terrain et de laboratoire sont conduites sur le domaine spectral du Visible au Moyen InfraRouge (350-2500 nm) pour le suivi du paramètre teneur en eau. Les premiers résultats de l'étude sont présentés dans cet article.

Mots clés : télédétection, teneur en eau, risque de feu de forêt, MIR, zone méditerranéenne

Suivi de la teneur en eau de la végétation méditerranéenne par télédétection. Application au risque de feu de forêt.

DAURIAC Fabien, DESHAYES Michel, GILLON Dominique, ROGER Jean-Michel

1. Contexte

1.1. Le risque de feu de forêt

Les incendies de forêt sont des risques, pour la prévention desquels, de nos jours, les attentes sociales sont extrêmes. Pourtant, le phénomène de feu de forêt est à la fois naturel et essentiel pour l'écosystème forestier. La suppression de tous les feux n'est ni physiquement possible, ni écologiquement souhaitable (Conard et Latham, 2000).

Les zones sensibles aux incendies de forêts concernent en France 13% du territoire, soit 7 millions d'hectares (dont 4,2 dans le sud-est). Pour la décennie 1990-2000, en France, en moyenne chaque année 5.400 feux ont parcouru 31.500 hectares de forêts et d'espaces naturels (FAO, 2000). Ces surfaces tendent à diminuer grâce aux efforts continuels de prévention et de lutte. Toutefois, selon de récentes études (Hoff et Rambal, 1999), la période favorable au déclenchement des incendies s'allonge fortement chaque année. Cet accroissement du niveau de risque est dû principalement à la modification de l'occupation des sols et au changement climatique global. L'abandon de l'exploitation des terres en région méditerranéenne a provoqué l'extension des forêts (+0,7% par an depuis 30 ans) et influe négativement sur le bilan hydrique et les ressources en eau. Conjointement, le climat se réchauffe et s'accompagne de périodes de sécheresse de plus en plus longues (Hoff et Rambal, 1999). Une meilleure connaissance des états de stress hydrique de la végétation est nécessaire. Compte tenu de l'augmentation des surfaces à risque, la connaissance spatiale du stress hydrique est une gageure scientifique d'actualité.

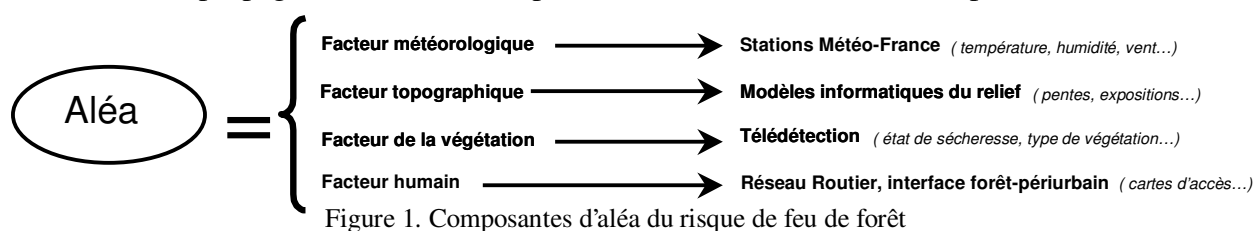
Comme pour les risques d'inondation ou d'avalanche, le bassin de risque est localisé de manière précise. On y distingue différents niveaux d'aléa, sans caractéristiques stables dans le temps (à l'échelle d'une génération) du fait des changements d'utilisation de l'espace. La particularité du niveau de risque pour les feux de forêt est qu'il est étroitement lié à la quantité de biomasse mobilisable et donc à la date du dernier sinistre !

Plusieurs programmes de recherche actuels concernent la modélisation du risque de feu et sa cartographie. Ils visent à déterminer des niveaux d'aléa sur une zone donnée. Ces approches touchent à des enjeux socio-économiques énormes, tant au niveau national qu'euro-péen. Par exemple, l'enjeu de protection des biens et des personnes est celui qui mobilise en priorité les services chargés de la sécurité. Cette mobilisation des moyens de lutte sur les lieux fréquentés ou habités est un succès. Si, malheureusement, quelques hommes chargés de la lutte ont été victimes d'incendies, aucune autre victime civile n'est à déplorer. Toutefois, l'enjeu prioritaire de sécurité des biens et des personnes ne donne lieu à aucune enquête statistique, à la différence de l'enjeu secondaire de protection du patrimoine naturel, suivi grâce à l'enquête « Prométhée ». Ce second enjeu est en effet d'une toute autre nature. La forêt est à la fois vecteur et victime du feu. En tant que vecteur, elle doit être aménagée et circonscrite pour protéger les biens et les personnes. En tant que victime, elle n'est défendue qu'en deuxième priorité.

La participation de l'État se fait au travers de deux ministères, du Ministère de l'Intérieur, chargé de la lutte et de celui de l'Agriculture, chargé de la prévention. En 1998 le coût de la lutte s'élevait à 436 MF et celui de la prévention à 206 MF (Kert, 1999). A cette dépense s'ajoutent les contributions de l'Union Européenne, des Régions et surtout des départements et des communes.

1.2. Les composantes du risque

L'évaluation et la cartographie du risque reposent sur une analyse séparée de l'aléa d'éclosion et de l'aléa de propagation du feu, d'une part, et des vulnérabilités, d'autre part.



Pour cartographier le risque d'incendie, il faut connaître les zones privilégiées de départs de feux, les secteurs favorables à une extension rapide du sinistre (aléa) ainsi que les sites où les enjeux de protection sont particulièrement importants (vulnérabilité). L'étude des phénomènes porte sur des conditions d'éclosion et de propagation du feu, en fonction des données physiques et biologiques du milieu naturel. Les départs de feux en France ont une origine essentiellement humaine (2/3 des causes élucidées) et la présence de certains équipements tels que les routes, les lignes électriques, les dépôts d'ordures, accroît significativement le danger de mise à feu. En revanche, la propagation d'un feu dépend d'un certain nombre de facteurs du milieu naturel : la pente, l'exposition au vent dominant, le type de végétation (structure, composition) et son état de dessèchement plus ou moins avancé. Cependant, certains de ces paramètres de base restent peu ou mal connus.

Un effort méthodologique est mené dans la cartographie des types de combustibles (inflammabilité et combustibilité), l'étude du vent (simulations numériques et en veine hydraulique) et l'estimation du stress hydrique de la végétation. Pour ce dernier point, la télédétection spatiale est utilisée depuis peu comme un outil de suivi quotidien, sur de très grandes surfaces, de l'état hydrique de la végétation.

Chaque facteur, du milieu naturel et humain, est affecté d'un facteur d'aléa qui contribue à un indice global d'aléa, élaboré en faisant l'hypothèse de l'additivité des facteurs. L'aléa déterminé est à la fois quantifié et spatialisé sur une zone donnée, afin de fournir des éléments d'aide à la décision concernant l'aménagement du territoire. Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) employés aident à l'analyse spatiale et permettent de gérer un grand nombre de données. Les recherches dans ce domaine se poursuivent sur la connaissance des facteurs et la façon dont ils contribuent au risque.

Depuis une vingtaine d'année, les travaux de recherche ont permis de définir les indices de risques météorologiques, comme l'Indice Forêt Météo qui intègre vent, réserve en eau du sol et humidité de l'air (Sol, 1990). Ils permettent une prévision temporelle et spatiale du risque. D'autres études ont permis de mieux connaître la sensibilité du feu de la végétation.

Néanmoins, dans son rapport de 1999 à l'Assemblée Nationale, le député Kert relève trois points faibles en matière de recherche sur le risque d'incendies de forêt :

- l'absence de présentation synthétique des résultats, notamment sur les facteurs du milieu où peu de « choses claires » sont explicitées ;
- un déficit certain de connaissances sur la simulation de la propagation des incendies et la modélisation des moyens de lutte ;
- l'évaluation des conséquences écologiques des feux.

Il préconise des axes d'effort de recherche sur :

- l'état hydrique de la végétation, l'utilisation de la télédétection et la description des formations végétales selon leur sensibilité au feu ;
- la modélisation physique en aérologie pour la propagation du feu ;
- une recherche de classification des événements.

L'étude de l'aléa, sur le plan statistique, dispose d'un bon outil avec l'inventaire « Prométhée », qui rassemble les données de feux depuis 1973 sur les 15 départements du sud-est de la France. Il en ressort par exemple que chaque année 20 à 30 jours sont à risque sur 50% des surfaces et peuvent générer de grands feux. Ce dispositif doit être pérennisé et mieux exploité, notamment d'un point de vue cartographique. Les possibilités techniques récentes (télédétection spatiale) et les enquêtes décennales de l'Inventaire Forestier National sont à intégrer au dispositif opératoire en place.

En matière de prévention du risque, l'EIPFEI (Entente Interdépartementale en vue de la Protection de la Forêt contre l'Incendie), créée en 1963, rassemble les 15 départements méditerranéens de la frontière espagnole à la frontière italienne. Elle est à vocation multiple : formation, recherche, intervention... Plusieurs procédures administratives aident à la prévention des feux :

- PZSIF : Plan de Zones Sensibles aux Incendies de Forêt,
- SDAFI : Schémas Départementaux d'Aménagement des Forêts contre l'Incendie,
- PIDAF : Plan Intercommunaux de Débroussaillage et d'Aménagement Forestier,
- DFCI : Défense des Forêts Contre l'Incendie,
- CCFF : Comités Communaux de Feux de Forêts.

Les crises importantes sont gérées par la Sécurité Civile ; les feux de forêts du sud-est sont du ressort du CIRCOSC (Centre InterRégional de Coordination des Opérations de Sécurité Civile) de Valabre. Le dispositif opérationnel est en vigueur chaque année du 15 juillet au 10 septembre. Sont mobilisés 27.000 sapeurs-pompiers, 3.500 véhicules, une cinquantaine d'aéronefs spécialisés. La règle d'intervention est l'anticipation. Une prévision météorologique journalière donne le niveau de risque, sur 91 zones météo, en fonction duquel est mise en place le guet aérien armé et le déploiement des patrouilles pour intervenir dès l'éclosion des feux. On peut compter jusqu'à 600 patrouilles par jour.

2. Problématique et objectifs

L'ensemble des recherches et études conduites sur le risque feux de forêts depuis une trentaine d'années tant en France qu'à l'étranger, a permis de préciser le rôle de la composante hydrique du combustible, sans toutefois déboucher sur sa prise en compte satisfaisante dans la détermination opérationnelle et officielle du niveau de risque. L'état hydrique des formations végétales, conditionné par les réserves en eau du sol, est un facteur de risque essentiel dans le démarrage et la propagation des feux.

L'évolution temporelle du risque de feu de forêt est actuellement suivie de manière opérationnelle par deux méthodes différentes :

- l'utilisation d'indices purement météorologiques spatialisés par sous-régions d'environ 1.000 km²,
- la mesure de l'humidité de certains végétaux sur des placettes de l'ordre de la dizaine de m².

Aux méthodes de mesures directes de teneur en eau, on se propose d'associer des mesures indirectes par télédétection. La télédétection paraît en effet un outil de choix pour traduire les importantes variations spatiales et temporelles de cet état hydrique. Elle semble permettre de suivre en temps réel l'évolution du risque de grands massifs forestiers.

Les satellites d'observation de la Terre scrutent les milieux naturels avec une précision spatiale, spectrale et temporelle de plus en plus grande. Plusieurs paramètres physiologiques des plantes sont étudiés au travers des domaines visible et infrarouge du spectre électromagnétique. La partie Proche InfraRouge (PIR) et les indices de végétation étudient l'activité photosynthétique des plantes. L'Infrarouge Thermique (IRT) décrit quant-à-lui les variations de température des couverts et les échanges plantes-atmosphère. PIR et IRT

apportent des éléments d'information sur le niveau de stress hydrique des plantes, sans toutefois mesurer directement l'humidité intrinsèque du végétal.

Or la plupart des systèmes de prévention des risques d'incendies s'intéressent à la teneur en eau des plantes, paramètre pris en compte pour l'estimation de l'inflammabilité des essences méditerranéennes. Une nouvelle méthode est donc nécessaire et doit directement évaluer l'humidité des plantes. C'est a priori la partie Moyen InfraRouge (MIR) du spectre, peu utilisée jusqu'à présent, qui répond le mieux à ces attentes.

Depuis le début des années 90, des études ont montré l'intérêt potentiel d'indices dérivés des données satellitales NOAA-AVHRR pour la cartographie du risque d'incendie (Chuvieco et Martin, 1994 ; Deshayes *et al.*, 1998 ; Lopez *et al.*, 1991). Après des démonstrations de la variabilité spatio-temporelle de ces indices, un premier type de validation a été fait à partir des incendies passés. Rapidement, les utilisateurs ont fait part de leur souhait de baser la validation sur des mesures d'humidité des végétaux. Cependant, ce type de validation se heurte à la différence d'échelle entre des indices calculés sur des pixels de 1 km² et des mesures de terrain prises sur une dizaine de m².

Afin de tenter d'améliorer la validation par comparaison avec des mesures d'humidité de végétaux, l'objectif de cette étude est triple :

- étudier les variabilités spatiales et temporelles de la teneur en eau des plantes ;
- analyser les réponses spectrales des plantes selon leur niveau de stress hydrique ;
- tester l'intérêt d'indices satellitaires dérivés de différents capteurs basse résolution et haute répétitivité (AVHRR, VEGETATION, MODIS...) pour l'estimation du stress hydrique en les corrélant avec les humidités relevées sur le terrain.

3. Travail expérimental

La phase expérimentale du projet a consisté à mesurer pendant l'été 2001 et sur plusieurs sites l'évolution spatio-temporelle de la teneur en eau des feuilles de deux espèces de chênes méditerranéens (chêne vert *Quercus Ilex* et chêne kermès *Quercus Coccifera*). Conjointement, des études radiométriques de terrain et de laboratoire sont conduites sur ces feuilles dans le domaine spectral du Visible au MIR (350-2500 nm) pour le suivi du paramètre teneur en eau. Les mesures de terrain sont ensuite mises en relation avec les images de plusieurs satellites (NOAA, SPOT, TERRA) et divers indices satellitaires sont testés pour évaluer l'humidité de la végétation.

3.1. Protocole 1 : Suivi de la variabilité spatio-temporelle de la teneur en eau des feuilles de chêne kermès et de chêne vert

La zone d'étude se situe à 30 km à l'ouest de Montpellier, dans la petite région du Causse d'Aumelas. Elle s'étend sur 3x3 km. Le protocole d'analyse consiste à prélever des feuilles de chêne, au plus proche du midi solaire, à les peser et les sécher en étuve pour déterminer leur teneur en eau (précision : $\pm 0,1\%$). Les prélèvements s'effectuent 2 fois par semaine et en 32 lieux localisés par GPS différentiel, positionnés selon une croix orientée N-S-O-E (cf. figure 2). Depuis le centre de la croix, les points sont espacés de 10 mètres. Ce dispositif doit permettre de replacer plus tard un pixel de 20 mètres de côté du satellite SPOT.

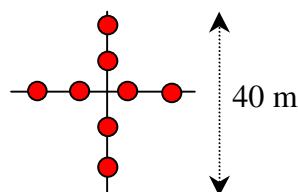


Figure 2. Localisation des prélèvements en croix

Plus de 1.000 prélèvements couvrent la période 14 juin-17 octobre 2001.

3.2. Protocole 2 : Analyse des réponses spectrales des feuilles de chêne kermès et de chêne vert selon leur niveau de stress

L'objectif de cette étude est de caractériser la réponse spectrale des feuilles des deux espèces étudiées pour des teneurs en eau (niveau de stress) différentes. Les feuilles sont passées une à une dans un dispositif composé d'un spectroradiomètre (spectre 350-2500 nm, pas de 1 nm) couplé à une sphère d'intégration. Le mécanisme permet la mesure des différentes composantes du rayonnement (réflectance, absorptance et transmittance) pour chaque face des feuilles. On mesure également pour chaque feuille sa teneur en eau, notée FMC (*Foliage Moisture Content*) qui correspond à la proportion d'eau par rapport au poids sec.

3.3. Protocole 3 : Etude des variations de la composition chimique des feuilles de chêne kermès et de chêne vert lors d'un stress hydrique

Nous tâchons de répondre à la question suivante : existe-t-il une relation entre la composition chimique des feuilles (au travers de leur réponse spectrale après séchage) et leur niveau de stress hydrique ? Le protocole d'analyse consiste à conserver une partie des feuilles de chêne prélevées sur chaque site d'étude, à les sécher et à mesurer leur réflectance par spectroradiométrie infrarouge en laboratoire (400-2500 nm, pas de 2 nm). Les feuilles sont broyées au Cyclotec (maille de 1 mm) pour obtenir une poudre constituée de particules de taille homogène. Le spectromètre NIRS mesure la réflectance de l'échantillon pour des stress hydriques de plus en plus marqués.

4. Premiers résultats

4.1. Variabilité spatio-temporelle de la teneur en eau

L'été 2001 s'est avéré exceptionnellement sec et le risque d'incendie fut maximal pendant plusieurs semaines. On a pu observer la mort de plusieurs végétaux sur les sites d'étude, fait tout à fait inhabituel.

Les deux espèces de chêne étudiées sont très bien adaptées aux conditions de sécheresse du milieu et leur cycle végétatif est directement relié aux régimes des pluies. La teneur en eau moyenne des feuilles, mesurée selon le protocole 1, varie dans le temps de 49 à 41% pour le chêne kermès et de 43 à 38% pour le chêne vert. La figure 3 illustre cette variabilité temporelle de la teneur en eau.

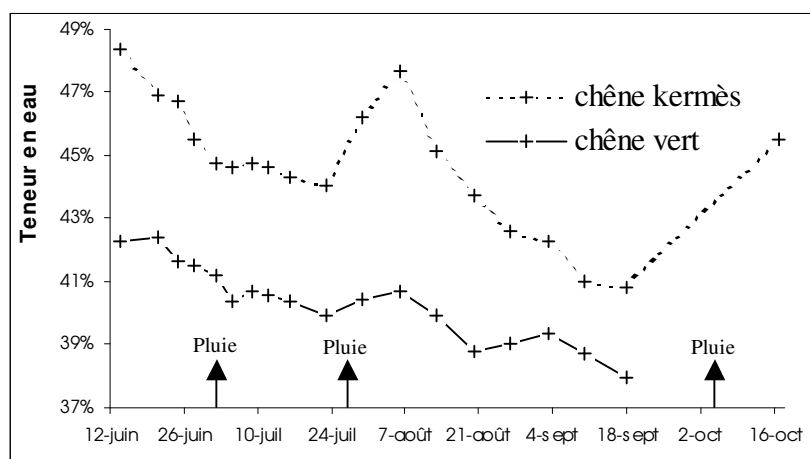


Figure 3. Evolution moyenne de la teneur en eau des feuilles de chêne kermès et de chêne vert sur le Causse d'Aumelas pendant l'été 2001

Conjointement à ce suivi temporel, un suivi spatial de la teneur en eau du chêne kermès a permis de mettre en évidence la grande variabilité de ce paramètre. La figure 4 montre une amplitude de 9% de teneur en eau sur une surface restreinte de 40 hectares à une date donnée.

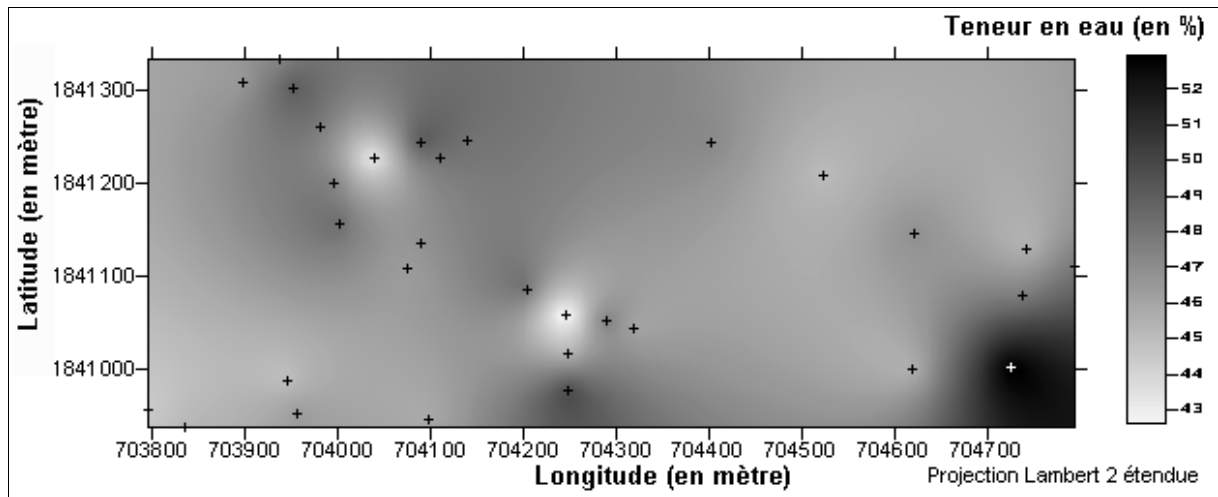


Figure 4. Carte de la teneur en eau des feuilles de chêne kermès – méthode géostatistique de krigeage sur 30 relevés du 18/07/2001 sur le Causse d’Aumelas

4.2. Etude spectrale des feuilles selon le niveau de stress hydrique

La mesure des propriétés optiques des feuilles de chêne par spectroradiométrie de laboratoire (protocole 2, figure 5) nous permet d’observer les différences de comportement des deux faces des feuilles sur un large spectre (400 à 2400 nm). La face inférieure, claire, est plus réfléchissante dans le visible et le moyen infrarouge que la face supérieure.

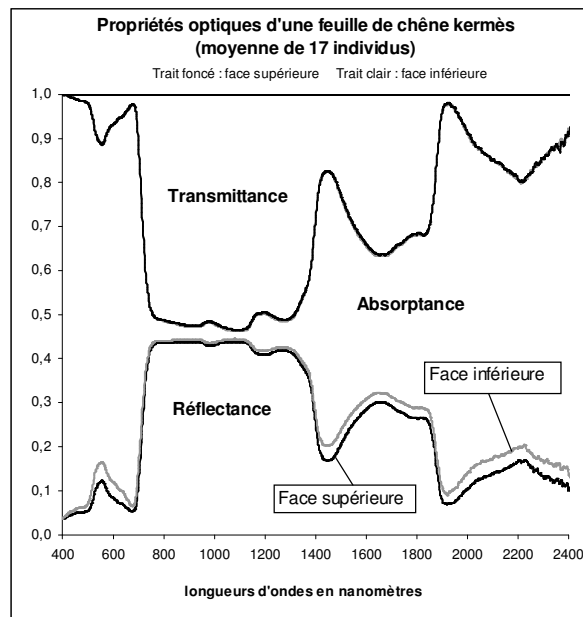


Figure 5. Propriétés optiques des deux faces d’une feuille de chêne kermès

L’étude des spectres met en évidence une différence significative des réflectances des feuilles selon leur teneur en eau. La zone 1300-1800 nm du spectre apparaît la plus intéressante pour caractériser la teneur en eau (cf. figure 6). Cette zone fin PIR-début MIR est rarement exploitée par les satellites d’observation de la Terre.

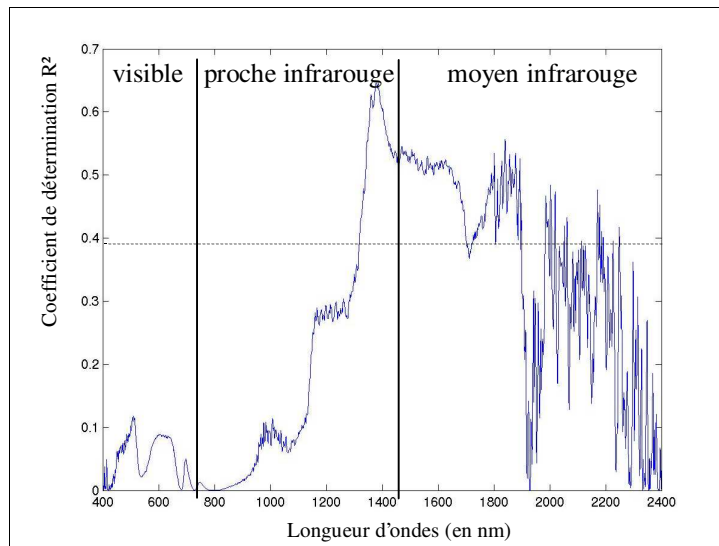


Figure 6. Relation entre la teneur en eau des feuilles (FMC) et leur réflectance (spectre de 400 à 2400 nm)

L'analyse statistique des spectres permet de fournir un modèle correct sur la zone 1500-1800 nm indépendamment des 2 espèces (cf. figure 7). La méthode multi-variée utilisée est la régression aux moindres carrés partiels, appelée PLS (*Partial Least Squares*) (Wold *et al.*, 1984).

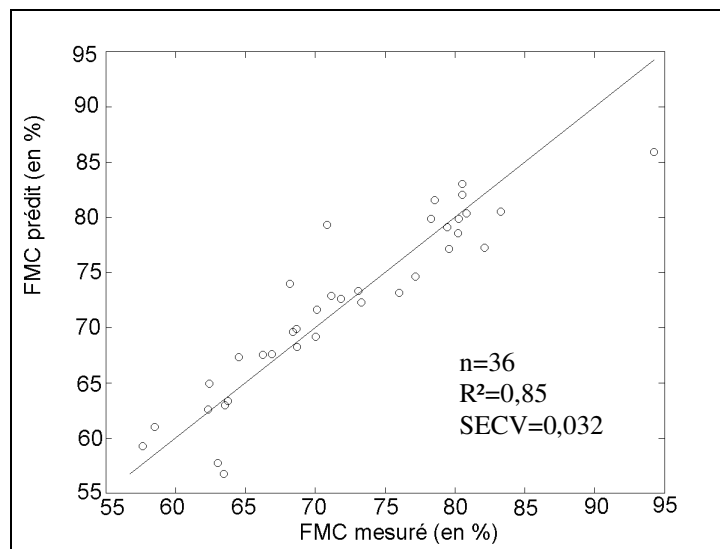


Figure 7. Validation croisée de la teneur en eau des feuilles (FMC) et de leur réflectance (spectre de 1500 à 1800 nm) par régression PLS à 4 facteurs ($n=36$, $R^2=0,85$ et $SECV^1=0,032$)

Conjointement, dans le cadre des mesures spectroradiométriques des feuilles sèches (protocole 3), l'analyse statistique des spectres permet de créer un modèle (ajustement spectres/teneur en eau) très correct utilisant l'ensemble du spectre mesuré et indépendamment des 2 espèces de chêne (cf. figure 8).

¹ SECV : *Standard Error of Cross Validation* = Erreur standard de validation croisée

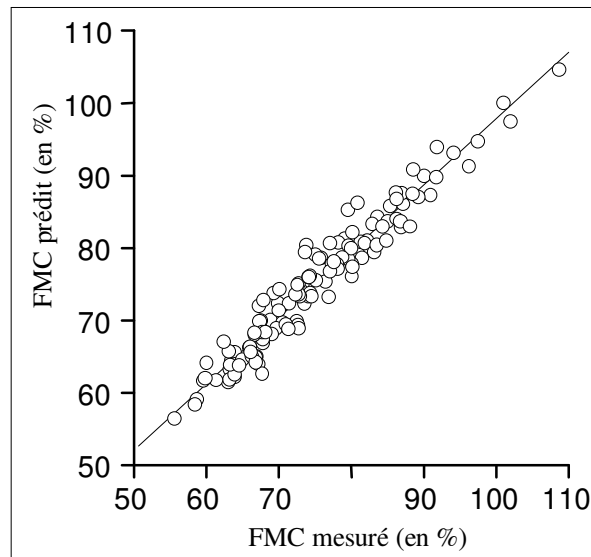


Figure 8. Validation croisée de la teneur en eau des feuilles (FMC) et de leur réflectance (spectre de 400 à 2500 nm) par régression PLS (n=129, $R^2=0,94$ et $SECV=0,039$)

Ce modèle permet de retrouver à partir du spectre de feuilles sèches la teneur en eau (FMC) mesurée sur le terrain (cf. figure 9).

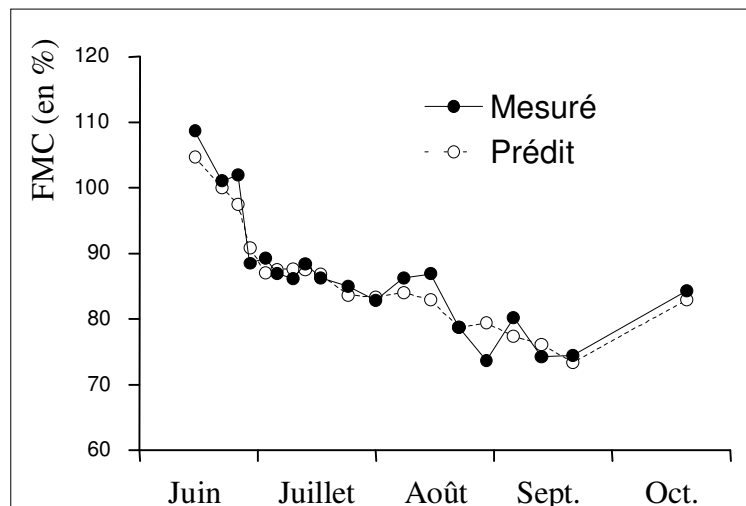


Figure 9. Adéquation du modèle à la réalité pour la teneur en eau (FMC) des feuilles de chêne kermès

5. Conclusion

Les mesures radiométriques de laboratoire, sur matériel vivant (protocole 2) et sec (protocole 3), confirment la zone d'intérêt du moyen infrarouge du spectre pour prédire la teneur en eau des feuilles.

Actuellement, un travail complémentaire étudie la réflectance des feuilles séchées de plusieurs espèces méditerranéennes (chênes vert et kermès, arbousier, bruyère arborescente, ciste cotonneux, genévrier oxycèdre, genêt à balais...). Le but est de rechercher un modèle commun (indépendant des espèces) pouvant prédire le niveau de stress hydrique des plantes. Les modifications des réflectances semblent liées aux changements très rapides des éléments chimiques constitutifs des feuilles, par exemple les sucres solubles à forte mobilité.

La teneur en eau des feuilles des deux espèces de chênes méditerranéens a également été étudiée à travers ses variabilités spatiale et temporelle. Il apparaît que l'hétérogénéité naturelle de la garrigue dépasse l'amplitude moyenne annuelle, d'où l'intérêt de calculer une humidité moyenne à partir de plusieurs individus. Cette humidité moyenne présente alors un profil

temporel lissé, avec une décroissance naturelle au cours de l'été interrompue par les épisodes pluvieux. Cette mesure de paramètre sur plusieurs individus correspond à ce qui est fait naturellement par les données de télédétection, avec la couverture d'une grande surface sous forme d'une matrice de pixels. Ceci confirme l'intérêt potentiel de la télédétection pour spatialiser le paramètre teneur en eau.

Le travail suivant consistera à passer en revue les différents satellites existants et à classer par ordre de pertinence leurs capteurs à partir des spectres mesurés en laboratoire.

Un second travail consistera à traiter 8 images du satellite SPOT de l'été 2001 sur la région de Montpellier et de comparer les valeurs de réflectance, dans les 4 bandes du capteur HRVIR, aux mesures de teneur en eau (FMC) des dispositifs en croix des sites.

A terme, l'étude doit permettre de préciser dans quelles mesures les informations tirées des images satellitaires peuvent améliorer la localisation du risque d'incendie.

6. Remerciements

Nous tenons à remercier Frédéric Baret de l'Unité Climat, Sol et Environnement (CSE) de l'INRA d'Avignon pour nous avoir gracieusement mis à disposition le matériel de spectroradiométrie infrarouge.

7. Bibliographie

- Chuvieco E. et Martin M.P. 1994. Global Fire Mapping and Fire Danger Estimation Using AVHRR Images. In *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. : American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, pages 563-570.
- Conard S.G., Latham D.J. 2000. Forest Fire Research in the United States: History and Current and Future Needs. In *Euromediterranean Wildfire Meetings. Research Special Session*. Hyères-les-Palmiers : CEREN.
- Deshayes M., Chuvieco E., Cocero D. *et al.* 1998. Evaluation of Different NOAA-AVHRR Derived Indices for Fuel Moisture Content Estimation: Interest for Short Term Fire Risk Assessment. In *III International Conference on Forest Fire Research and 14th Conference on Fire and Forest Meteorology*. Coimbra (Portugal) : ADAI, pages 1149-1167. ISBN 972-97973-0-7
- FAO. 2000. On line, <http://www.fao.org/forestry/fo/fra/index.jsp>
- Hoff C., Rambal S. 1999. Les écosystèmes forestiers méditerranéens face aux changements climatiques. On line, <http://www.agora21.org/mies/chan-clim13.html>
- Kert C. 1999. Rapport sur les techniques de prévision et de prévention des risques naturels en France. On line, <http://www.assemblee-nationale.fr/2/oecst/risque/R1540-01.htm>
- López S., González F., Llop R. *et al.* 1991. An Evaluation of the Utility of NOAA AVHRR Images for Monitoring Forest Fire Risk in Spain. In *International Journal of Remote Sensing*. Londres (GB) : Taylor & Francis, pages 1841-1851.
- Sol B. 1990. Estimation du risque météorologique d' incendies de forêts dans le sud-est de la France. In *Revue Forestière Française*. pages 263-271.
- Wold. S., Ruhe A., Wold H., Dunn III W.J. 1984. The collinearity problem in linear regression. The partial least squares (PLS) approach to generalized inverses. In *SIAM Journal of Science and Statistical Computations*, 5, pages 735-743.