



Suivi multi-échelle par télédétection et spectroscopie de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne pour la prévention du risque de feu de forêt

Fabien Dauriac

► To cite this version:

Fabien Dauriac. Suivi multi-échelle par télédétection et spectroscopie de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne pour la prévention du risque de feu de forêt. Hydrologie. ENGREF (AgroParis-Tech), 2004. Français. NNT : 2004ENGR0009 . pastel-00000803

HAL Id: pastel-00000803

<https://pastel.hal.science/pastel-00000803>

Submitted on 11 Jan 2005

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

THÈSE

pour obtenir le grade de

**Docteur de l'ENGREF
Spécialité : Sciences de l'eau**

présentée et soutenue publiquement le 28 mai 2004 par

Fabien DAURIAC

***à l'École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
Centre de Montpellier***

SUIVI MULTI-ÉCHELLE PAR TÉLÉDÉTECTION ET SPECTROSCOPIE DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION MÉDITERRANÉENNE POUR LA PRÉVENTION DU RISQUE DE FEU DE FORÊT

Devant le jury suivant :

M. C. MILLIER	ENGREF	Directeur de thèse
Mme A. BÉGUÉ	CIRAD	Rapporteur
M. S. JACQUEMOUD	Université Paris 7	Rapporteur
M. P. CECCATO	FAO	Examineur
M. M. DESHAYES	ENGREF	Examineur
M. H. JEANJEAN	CNES	Examineur
Mme D. GILLON	CNRS	Membre invité
M. Y. DUCHÉ	ONF	Membre invité

Thèse préparée à :

l'Unité Mixte de Recherche Cemagref - ENGREF « Structures et Systèmes Spatiaux », Montpellier

N° attribué par la bibliothèque

/ / / / / / / / / / / / / /

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur de l'ENGREF

Spécialité : Sciences de l'eau

présentée et soutenue publiquement le 28 mai 2004 par

Fabien DAURIAC

à l'École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts

Centre de Montpellier

SUIVI MULTI-ÉCHELLE PAR TÉLÉDÉTECTION ET SPECTROSCOPIE DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION MÉDITERRANÉENNE POUR LA PRÉVENTION DU RISQUE DE FEU DE FORÊT

Thèse préparée à :

Unité Mixte de Recherche « Structures et Systèmes Spatiaux » Cemagref-Engref

Maison de la Télédétection en Languedoc-Roussillon

500, Rue Jean-François Breton

34 093 MONTPELLIER Cedex 5

RÉSUMÉ

Dans le Sud-Est de la France, l'évolution du risque de feu de forêt est suivie de manière opérationnelle par deux méthodes : l'estimation d'indices de risque météorologique, spatialisés par Météo-France en sous-régions d'environ 700 km² et la mesure de l'humidité de certains végétaux par l'Office National des Forêts sur des placettes de moins de 500 m². Cette dernière se justifie parce que la teneur en eau des plantes joue un rôle majeur dans l'aléa d'éclosion (inflammabilité) et de propagation (combustibilité) du feu. Jusqu'ici l'utilisation des images satellitaires pressenties pour spatialiser cet état hydrique s'est heurtée à un problème d'échelle entre les données de télédétection kilométriques et les mesures de terrain ponctuelles.

Notre travail de recherche propose de valider les mesures satellitaires par des mesures multi-échelles de la teneur en eau des plantes. Nous testons l'adéquation de dispositifs à différentes échelles, du décamètre au kilomètre, pour connaître les variabilités spatiales et temporelles de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne. Nous proposons alors des protocoles d'échantillonnage adéquats pour mesurer la teneur en eau des plantes, laquelle est comparée au signal radiométrique réfléchi par le couvert végétal. Dans un premier temps, nous travaillons à l'échelle de la feuille par spectroscopie proche infrarouge et nous montrons la pertinence de la partie moyen infrarouge du spectre électromagnétique pour prédire l'état hydrique des feuilles. Dans un second temps, nous changeons d'échelle d'observation en évaluant l'état hydrique de peuplements au moyen de données de télédétection. Les résultats obtenus à haute (capteur SPOT-HRVIR) comme à basse résolution spatiale (capteurs AVHRR, VEGETATION et MODIS) sont hétérogènes car les perturbations radiométriques et atmosphériques des images ne sont qu'en partie corrigées. Dans un futur proche, des progrès sont attendus dans le traitement de ces perturbations. La télédétection sera alors un outil de choix pour spatialiser l'état hydrique de la végétation, permettant à terme une meilleure cartographie du risque de feu de forêt.

Mots clés : risque de feu de forêt, état hydrique, végétation méditerranéenne, télédétection, spectroscopie proche infrarouge

ABSTRACT

In south-eastern France, forest fire hazard is assessed using two methods: through meteorological fire indices, spatialized by Meteo-France on sub-regions of an average size of 700 km² and through the measurement of fuel moisture content (FMC) carried out by ONF, the French forestry board, on plots below 500 m². The latter protocol derives from the fact that FMC plays a major role in the fire ignition (inflammability) and fire spread (combustibility) hazards. Up to now the use of satellite images for the spatialization of fuel moisture content is difficult because of a lack of validation due the difference in scale between the square kilometer of satellite data and the small size of FMC plots.

Our work aims at validating satellite data using multi-scale FMC measurements. We use different field schemes with varying scales, from decameter to kilometer, to assess the spatial and temporal variabilities of the Mediterranean vegetation moisture content. This leads to the proposition of sampling schemes adapted to FMC assessment, FMC to be compared to the radiometric signal reflected by vegetation. A first work is carried out at leaf level using NIRS spectrometry and demonstrates the interest of using the short wave infrared part of the electromagnetic spectrum for leaf FMC assessment. In a second phase, we change the observation scale and use remote sensing data to assess forest stand FMC. The results obtained at high resolution (using SPOT-HRVIR data) and low resolution (using AVHRR, VEGETATION et MODIS data) are heterogeneous because atmospheric and radiometric effects are only partially corrected. In a near future, progress are expected in the processing of these disturbing effects. Remote sensing will then become an efficient means for the spatialization of FMC content allowing a better mapping of forest fire hazard.

Key words: forest fire risk, fuel moisture content, Mediterranean vegetation, remote sensing, near infrared spectroscopy

SOMMAIRE

Remerciements

Avant-propos

Introduction générale

Chapitre 1. Le risque de feu de forêt et le rôle de l'état hydrique de la végétation

1. Contexte des incendies de forêt en Europe et en France
2. La gestion du risque de feu de forêt en France
3. Les écosystèmes forestiers
4. La télédétection spatiale
5. Conclusion

Chapitre 2. Suivi de terrain de l'état hydrique de la végétation

1. Protocoles spécifiques de mesure de l'état hydrique des plantes
2. Indices de risque météorologique et teneur en eau de la végétation
3. Comportement spatial de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne
4. Comportement temporel de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne
5. Synthèse

Chapitre 3. Spectroscopie proche infrarouge de la teneur en eau des feuilles

1. La spectroscopie proche infrarouge
2. Chimiométrie
3. Spectroscopie proche infrarouge des feuilles fraîches de végétation méditerranéenne et simulation des capteurs satellitaires
4. Spectroscopie proche infrarouge des feuilles sèches de végétation méditerranéenne
5. Synthèse

Chapitre 4. Télédétection à haute résolution de l'état hydrique de la végétation

1. État de l'art
2. Cartographie et estimation de l'état hydrique de la végétation par SPOT-HRVIR
3. Résolution spatiale réelle d'un pixel SPOT-HRVIR à partir d'images du drone Pixy®

Chapitre 5. Télédétection à basse résolution de l'état hydrique de la végétation

1. Contexte de l'étude
2. Teneur en eau de référence
3. Données et Méthodes
4. Résultats
5. Synthèse

Chapitre 6. Discussion générale : contributions pratiques et théoriques

1. Discussion des résultats
2. Discussion des méthodes
3. Perspectives
4. Conclusion

Bibliographie

Annexes

Tables des sigles et abréviations

Table des matières

à mon épouse Lætitia,

REMERCIEMENTS

C'est avec émotion que j'écris ces quelques lignes pour remercier toutes les personnes qui de près comme de loin ont contribué à ce travail. L'écriture de cette page, quelques jours après ma soutenance, est finalement le sceau qui cache cette thèse. Il me reste à affronter deux épreuves : n'oublier personne dans la liste (eh oui, on en rencontre des gens pendant trois ans) et trouver vingt façons différentes de dire merci sans être redondant !

Pour commencer, je remercie la région Languedoc-Roussillon et le Centre National d'Études Spatiales pour avoir cofinancé ma thèse pendant ces trois années. J'associe également Sylvain Labbé, directeur de l'UMR 3S, pour m'avoir accueilli dans ses locaux avec mon volumineux matériel de terrain. Désormais, cela sent bon la garrigue dans le bureau 19 après trois ans de prélèvements de feuilles ! J'en profite pour envoyer un message d'amitié à mes « compagnons de chambrée » de ces trois années, Emmanuel Mushinzimana, Sylvain Payraudeau, Indarto Kastiran et Cécile Adell, éparpillés aux quatre coins du monde aujourd'hui.

Je tiens en premier lieu à remercier mon encadrant de thèse, Michel Deshayes, voyageur fou, capable de jongler avec dix projets à la fois. Un grand merci pour m'avoir fait confiance pendant ces trois années de labeur, pour le foisonnement de ses idées, pour son exigence et pour son grand carnet d'adresses bien utile.

Je remercie chaleureusement les autres membres de mon jury de thèse, par ordre alphabétique, Agnès Bégué, Pietro Ceccato, Stéphane Jacquemoud, Hervé Jeanjean et Claude Millier, pour avoir généreusement accepté de critiquer mon travail avec partialité et d'alimenter la discussion. Vous avez été prolixes en ce 28 mai 2004 et ma soutenance restera un des meilleurs moments de ma thèse.

Un clin d'œil également à Flavie Cernesson et Sylvie Durrieux pour la relecture du document.

Je tiens ensuite à remercier toutes les petites mains sous mes ordres pendant leurs stages, par ordre chronologique :

- Patrice Vidal (maîtrise en sciences de l'environnement), d'une grande aide pour les premiers essais de terrain et toujours prêt pour de nouveaux défis techniques ;
- Matthieu Phulpin (BTSA en Gestion forestière) dit « le sanglier du Causse d'Aumelas », capable de tracer un layon dans la végétation épineuse en moins de deux, et sûrement aujourd'hui le seul agent de la SNCF maîtrisant le prélèvement de feuilles en garrigue ;
- Angela Iglesias Rodrigo (ingénieur de Montes) et son acolyte de toutes les folies Asunción Roldán Zamarrón (ingénieur de Montes), mes deux charmantes espagnoles d'1m50 (et oui, c'est haut à prélever un chêne blanc !), pour leur travail colossal, leur bonne humeur, leur français très correct et leur prise de risque sur le terrain (attention aux chasseurs en garrigue les filles) ;
- Philippe Coing (mastère spécialisé en Sciences forestières) le seul auteur-compositeur-interprète-télédétecteur (ses CD musicaux sont aujourd'hui introuvables mais j'ai gardé ses CD d'images satellitaires), pour son précieux travail sur la base de données ainsi que ses explorations des données Modis (qualité, mon œil !) et surtout sa gentillesse et son amitié ;
- Hector Nieto Solana (ingénieur de Montes) (oui d'accord j'ai exploité la filière espagnole mais ils ont tous eu les félicitations du jury), pour ses précieux traitements satellitaires malgré sa gêne avec la langue de Molière ;
- Marie Terrier (CDD) pour son aide ponctuelle de terrain pendant l'été 2003 (oui, il fait 40°C à l'ombre, mais en garrigue, il n'y a pas d'ombre) ;
- Dante Corti (formation continue), Chilien, pour sa bonne humeur et l'exploitation commerciale de nos travaux pour la prévention des risques d'incendies au Chili (je plaisante Dante, j'ai trop envie de passer des vacances dans ton beau pays !).

Toutes ces personnes ont pu gratuitement parfaire leur bronzage et affiner leur silhouette par une méthode simple et efficace : le prélèvement de feuilles au midi solaire en plein mois d'août !

Un grand merci aussi à ceux qui ont participé aux différents protocoles :

- Dominique Gillon (CNRS-CEFE de Montpellier) pour son aide en spectroscopie et physiologie végétale, sa grande disponibilité et son extrême gentillesse ;
- Jean-Michel Roger (CEMAGREF-ITAP de Montpellier) pour son aide en chimiométrie et sa capacité à rendre les choses simples dans toutes les situations ;
- Claude Moro (INRA-PIF de Bormes-les-Mimosas), perdu dans le massif des Maures, qui m'a beaucoup appris du travail de terrain et qui fait un travail exemplaire pour la prévention des feux de forêt.

Le travail de thèse a fait appel à de multiples mesures de terrain et de laboratoire. Je souhaite remercier les personnes ayant prêté leurs matériels : Frédéric Baret (spectroradiomètre), Richard Escadafal (spectralon), Pierre Ruelle (étuve et balances), Denis Fabre (planimètre laser) ainsi que Jean Asseline et Christian Simon (drone Pixy).

Je complète cette longue liste par un grand merci à mes proches, gersois et parisiens, pour leur relecture assidue du document, leurs encouragements de tous les instants et leur appui jusqu'à la soutenance.

Enfin, je termine en remerciant spécialement mon épouse, d'un soutien sans faille pendant ces années et pour son indéfectible amour malgré les tourments d'une thèse.

AVANT-PROPOS

Ce travail de thèse a débuté en novembre 2000 au sein du laboratoire UMR 3S (*Unité Mixte de Recherche Structures et Systèmes Spatiaux*) Cemagref-Engref de la Maison de la Télédétection à Montpellier. L'UMR 3S (*ex Laboratoire Commun de Télédétection*) a été créée en 1988. Elle regroupe des enseignants-chercheurs dont le principal objectif est de développer l'utilisation de la télédétection, comme source d'information géographique privilégiée et comme méthode opérationnelle dans les projets d'aménagement et de développement de l'espace.

Cette thèse est le fruit d'un travail d'équipe associant plusieurs champs disciplinaires à travers divers laboratoires (*Tableau 1*).

Tableau 1. Principales collaborations à la thèse

Instituts	Laboratoires	Interlocuteurs	Lieux	Apports
CNRS	CEFE	D. Gillon	Montpellier, France	Matériel et traitements
CEMAGREF	TEMO	J.-M. Roger	Montpellier, France	Traitements
INRA	CSE	F. Baret	Avignon, France	Matériel
ONF	DR PACA	Y. Duché	Aix-en-Provence, France	Données de terrain
INRA	RFM-PIF	C. Moro	Bormes-les-mimosas, France	Données de terrain
Université de Salford	TIES	M. Danson	Salford, Grande-Bretagne	Traitements
CNES	DPAI-DEOT	H. Jeanjean	Toulouse, France	Données satellitaires
Université d'Alcala-de-Henares	Département de géographie	E. Chuvieco	Alcalà de Henares, Espagne	Données satellitaires

Depuis quelques années les équipes européennes de recherche sur les feux de forêt (environ 50 laboratoires) tendent à **fédérer leurs efforts** au moyen de projets de recherche cofinancés par la Commission Européenne. Sur la thématique des feux de forêt, plus de 25 projets ont été opérés depuis 1996 (*Annexe 1*) couvrant largement les trois phases d'un incendie (avant, pendant et après le feu).

Pour financer les données, le matériel et les missions de terrain, le cadre de notre travail s'inscrit dans deux projets :

- au niveau national, un **projet du GIS Incendies de Forêt** de deux ans (nov. 2001 à nov. 2003), financé par le Ministère de l'Agriculture (convention DERF n°61.45.11/01) à hauteur de 51 mille euros (GIS incendies de forêt, 2003) ;
- au niveau européen, le **projet SPREAD** (*forest fire spread prevention and mitigation*) rassemblant 26 laboratoires pendant trois ans (janv. 2002 à déc. 2004), cofinancé par la Commission Européenne (convention EVG1-CT-2001-00043) à hauteur de 3,7 millions d'euros).

Enfin, ma bourse de thèse a été cofinancée par le Centre National d'Études Spatiales (CNES) et la Région Languedoc-Roussillon pour une durée de trois ans.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La végétation couvre les deux tiers de la surface des continents avec 24% de forêts, 15% de prairies et de toundra, 15% de savanes et 11% de cultures. Ces biomes sont essentiels au bien-être de l'humanité ; ils fournissent les bases de la vie sur Terre à travers leurs fonctions écologiques, en régulant le climat et les ressources en eau, en servant d'habitats à la biodiversité animale et végétale ainsi qu'en fournissant des denrées essentielles à l'Homme. Il est primordial de les préserver.

Or toutes ces formations végétales sont exposées aux incendies. Même les forêts tropicales humides, normalement vierges de grands feux, furent dévastées par les flammes au cours des dernières décennies (île de Bornéo : 5 millions d'hectares brûlés en 1982, Amazonie brésilienne : 12 millions d'hectares brûlés en 1987, 4 en 1998). De nos jours, les incendies de forêt causent des dégâts majeurs sur les écosystèmes en ravageant de vastes étendues. Les répercussions sur la santé publique et la qualité de l'air sont également importantes. En Europe, la forêt méditerranéenne est régulièrement ravagée par le feu. L'été 2003 en fut une triste illustration avec des records de surfaces incendiées. Parmi les 62.000 hectares brûlés en France cette année là, les tragiques sinistres de la Corse et du Var ont ému l'opinion publique : des pompiers ont péri au combat ; en quelques jours un cinquième du massif varois des Maures est parti en fumée. Les attentes de la population et des pouvoirs publics pour prévenir le risque d'incendie sont donc plus que jamais importantes.

L'incendie de forêt est un phénomène naturel complexe, difficile à modéliser car fonction d'un grand nombre de paramètres, variables à la fois dans le temps et dans l'espace. Il est donc nécessaire de mener des actions de recherche et de prévention pour améliorer la gestion de ce risque.

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

- l'absence de présentation synthétique des résultats, notamment sur le rôle des 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 ;
- un manque d'évaluation des conséquences écologiques et physiques des incendies.

Il préconise alors trois axes d'effort de recherche sur :

- une recherche de classification des sinistres ;
- la modélisation physique en aérologie de la propagation du feu ;
- la prévention du risque d'incendie, par l'étude de l'état hydrique de la végétation et par la description par télédétection de la sensibilité au feu des peuplements.

L'ensemble des recherches conduites depuis une trentaine d'années sur le risque de feux de forêt, tant en France qu'à l'étranger, a permis de préciser le rôle de la teneur en eau (état hydrique) du végétal sans toutefois déboucher sur sa prise en compte satisfaisante dans la détermination officielle du niveau de risque.

Dans le Sud-Est de la France, l'évolution du risque de feu de forêt est suivie de manière opérationnelle par deux méthodes : l'estimation d'indices de risque météorologique, spatialisés par Météo-France en sous-régions d'environ 700 km² et la mesure de l'humidité de certains végétaux par l'Office National des Forêts sur des placettes de moins de 500 m². (Maillet 1996, INRA 1997).

Depuis le début des années 1990, des études ont montré l'intérêt potentiel d'indices dérivés des données satellitaires NOAA-AVHRR. 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 de teneur en eau des plantes. En effet, l'état hydrique de la végétation joue un rôle majeur dans l'aléa d'éclosion (inflammabilité) et de propagation (combustibilité) du feu. Jusqu'ici l'utilisation des images satellitaires pour cartographier cet état hydrique s'est heurtée à un problème d'échelle en comparant des données de télédétection kilométriques à des mesures de terrain ponctuelles.

En conséquence, notre travail de recherche propose de valider les mesures satellitaires par des mesures multi-échelles de la teneur en eau des plantes.

La thèse s'organise autour de six chapitres (Figure 1).

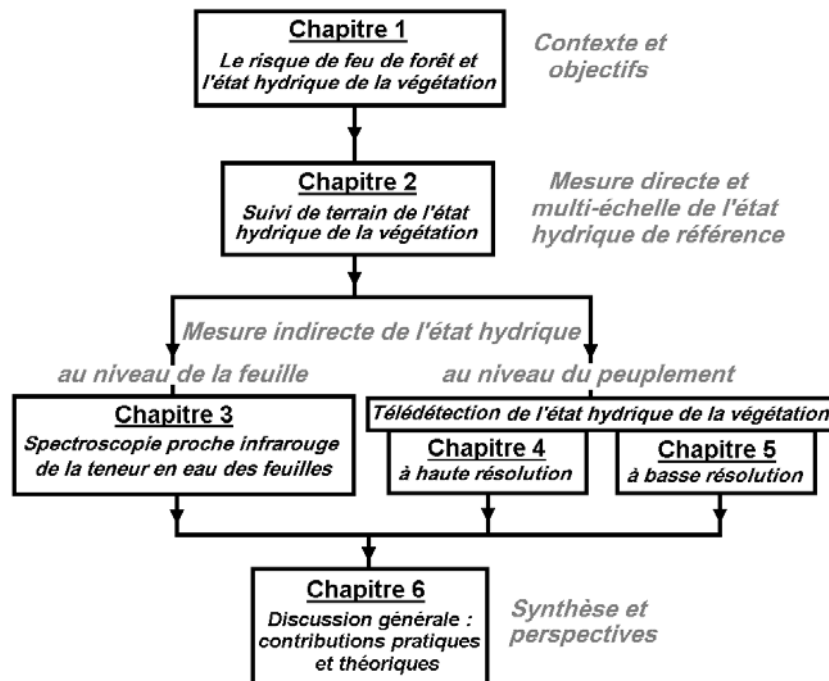


Figure 1. Organisation des chapitres de la thèse

Dans un premier chapitre, nous présentons le contexte et les objectifs de la thèse, à savoir le risque de feu de forêt et le rôle de l'état hydrique de la végétation. Nous précisons dans ce chapitre la situation des feux de forêt en Europe, la gestion opérationnelle du risque en France ainsi que le comportement des écosystèmes forestiers face au manque d'eau (stress hydrique).

Dans un second chapitre, nous testons l'adéquation de dispositifs de terrain multi-échelles, du décamètre au kilomètre, pour mesurer la teneur en eau des plantes. Ces divers protocoles permettent de décrire les variabilités spatiales et temporelles de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne. Nous précisons alors les protocoles d'échantillonnage adéquats pour calculer la teneur en eau de terrain servant de référence. Cette valeur de référence est ensuite comparée au signal radiométrique réfléchi par le couvert végétal.

Dans le troisième chapitre, nous travaillons en laboratoire à l'échelle de la feuille en comparant son humidité à son spectre proche infrarouge. Le but premier est d'identifier les zones du spectre électromagnétique liées à l'état hydrique des feuilles. Nous proposons alors des modèles pour prédire l'état hydrique d'une feuille à partir de la mesure de son spectre de réflectance.

Dans le quatrième chapitre, nous changeons d'échelle d'observation en évaluant l'état hydrique d'une garrigue près de Montpellier au moyen de données de télédétection à haute résolution. Un important travail porte sur la description du site d'étude et sur le calcul de la teneur en eau des plantes de référence (protocole d'échantillonnage amélioré, cartographie précise du site à l'aide d'images aériennes, mesures radiométriques de terrain). Nous étudions l'intérêt du capteur HRVIR pour cartographier l'état hydrique de la végétation, en précisant la résolution spatiale d'un pixel au sol.

Dans un cinquième chapitre, nous élargissons encore notre champ d'observation en suivant des massifs forestiers entiers à l'aide de capteurs satellitaires à basse résolution spatiale (AVHRR, VEGETATION et MODIS). Pour chaque capteur, nous testons différentes qualités de produits (images journalières, synthèses sur plusieurs jours). Nous étudions leur intérêt pour cartographier l'état hydrique de la végétation méditerranéenne.

Dans un sixième chapitre, les contributions pratiques et théoriques de ce travail sont discutées, en proposant des perspectives quant à l'utilisation de la télédétection pour spatialiser l'état hydrique de la végétation, dans le but d'améliorer la spatialisation du risque de feu de forêt.

CHAPITRE 1

LE RISQUE DE FEU DE FORÊT ET LE RÔLE DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION

« Les forêts précèdent les hommes, les déserts les suivent. »
François René de Chateaubriand, écrivain (1768-1848)

1. CONTEXTE DES INCENDIES DE FORÊT EN EUROPE ET EN FRANCE

1.1. LA VULNÉRABILITÉ DES ZONES MÉDITERRANÉENNES

1.1.1. IMPORTANCE ET CONSÉQUENCES DES FEUX DE FORÊT

Dans l'Union Européenne les incendies de forêt sont localisés essentiellement dans les pays du **pourtour méditerranéen**. Les plus touchés sont le Portugal, la Grèce, l'Espagne, l'Italie et la France (FAO, 1999 et 2000). En France, les zones sensibles aux incendies de forêts concernent 13% du territoire, soit 7 millions d'hectares (dont 4,2 dans le sud-est). Pour la période 1973-2003, **4.100 feux** couvrent en moyenne chaque année **26.400 hectares** de forêts et d'espaces naturels (source : base de données Prométhée¹).

Dans les pays méditerranéens de l'Union Européenne, les préoccupations des autorités en matière d'incendies de forêt sont légitimes. Les feux représentent une menace de plus en plus affirmée pour les biens et les personnes et ont un fort impact écologique, économique et social.

Les incendies causent des pertes nettes de ressources en carbone. L'énergie potentielle du bois est perdue. De plus, la combustion génère l'émission de gaz à effet de serre (vapeur d'eau, CO₂, O₃...) qui entretiennent dans une certaine mesure le dérèglement du bilan radiatif global. Les **pertes en biodiversité animale et végétale** peuvent également être non négligeables. Certaines espèces ont déjà été menacées d'extinction locale, comme la tortue d'Hermann (*Testudo hermanni hermanni*) dans le massif des Maures, suite aux incendies à répétition sur ce massif. Certains sanctuaires² sont affectés, comme en Espagne où un quart de la réserve naturelle du Cap Creus a été ravagé par les flammes en 2000.

Les grands incendies peuvent également conduire à des destructions massives de biens mobiliers et immobiliers. En 1997, l'incendie était aux portes de Marseille. En 1998, 18.000 ha ont brûlé aux marges de Solsona (Espagne). Les grands incendies de forêts peuvent aussi avoir des conséquences sur la santé publique en chargeant l'air ambiant de particules microscopiques (OMS, 1997).

¹ Prométhée est une base de données sur les incendies de forêt de la région méditerranéenne. Conçue et lancée en 1973, cette opération couvre 15 départements du sud-est de la France et est gérée par la préfecture des Bouches-du-Rhône.

² Zones mises de côté pour la protection totale de toutes les formes de la faune et de la flore sauvage, sans faire intervenir l'homme

Après le passage du feu, des bouleversements de drainage des bassins versants s'installent et une phase rhexistatique³ s'en suit (Viné, 1997). Les risques naturels liés à la dynamique de la surface sont exacerbés, provoquant parfois la pollution des nappes phréatiques et des eaux de surfaces. La résilience⁴ des peuplements d'origine est fortement contrainte et les pertes en paysages sont notables.

L'incendie de forêt par sa récurrence annuelle représente un péril majeur pour le développement durable du bassin méditerranéen.

1.1.2. UN NIVEAU DE RISQUE EN AUGMENTATION

Depuis une quarantaine d'années, le développement économique et social régional a généré, en particulier sur l'espace européen méridional, une multiplication des facteurs d'aléas. Les trois principales causes de hausse du risque résident dans la triple augmentation de l'inflammabilité des peuplements, des réserves de combustibles et du nombre de vecteurs de départ de feu. 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 du climat.

1.1.2.1. LA MODIFICATION DE L'OCCUPATION DES SOLS

Sur le plan régional comme sur le plan local, la mutation économique et sociale du milieu rural a, de manière générale, bouleversé une gestion séculaire de l'espace. L'abandon de l'exploitation des terres a provoqué l'**extension des forêts** (+0,7% par an depuis 30 ans en France, doublement de la surface forestière en 30 ans en Languedoc-Roussillon) et influé négativement sur le bilan hydrique et les ressources en eau (INSEE, 2003).

La forêt méditerranéenne n'est pas un espace naturel productif, mais un patrimoine, un paysage, un lieu d'habitat et de loisir, un cadre de vie. Elle a une autre particularité : elle pousse majoritairement seule (régénération naturelle, sans éclaircies) ; elle est la seule forêt « naturelle » en France. Très morcelée, un quart des parcelles reste sans identification. De plus, l'abandon de la vigne, de 450.000 à 300.000 ha en 30 ans en Languedoc-Roussillon (DIREN, 2002) et la déprise agricole voient le développement des broussailles et l'extension de la forêt. Il est donc nécessaire de **maintenir un espace ouvert**.

D'un point de vue sylvicole, le patrimoine forestier méditerranéen est **peu ou pas rémunérateur**, comparé à des coûts d'entretien élevés. Propriétaires privés et communes renoncent souvent à valoriser leur capital. On assiste alors à une « surcapitalisation sur pied » de la ressource. L'inflammabilité gagne la structure entière du peuplement⁵ et la masse de matériel combustible s'accroît de manière inconsidérée. Ainsi, l'abandon du ramassage de la nécromasse⁶ au sol disponible accroît l'inflammabilité de la litière.

³ phase climatique de forte érosion (rhexistase)

⁴ aptitude des peuplements à continuer de fonctionner correctement en dépit d'un feu

⁵ Ensemble d'individus (arbres le plus souvent) constituant un tout jugé assez homogène, notamment quant à sa composition floristique, sa structure, son âge et sa répartition dans l'espace, pour se distinguer des peuplements voisins

⁶ Masse morte (antonyme de biomasse), bois mort dans notre cas

L'interruption de l'affouage⁷, des dépressages⁸ et des coupes régulières favorisent la fermeture verticale et horizontale du couvert, amplifiant le risque d'éclosion et de propagation du feu dans les boisements. Comme illustration, nous présentons en *annexe 2* un travail de recherche montrant la fermeture progressive d'une garrigue basse près de Montpellier.

D'un point de vue agricole, les pratiques ancestrales disparaissent : l'interdiction du pâturage sous forêt laisse la voie libre à un développement anarchique d'un sous-étage forestier résistant au feu. La disparition de l'écobuage⁹ et l'abandon des terroirs peu rentables, souvent connexes aux espaces forestiers, mènent à l'extension des friches et prédisposent à l'incendie.

L'usage de l'émondage¹⁰ se perd, permettant une continuité de matériau inflammable entre la strate arbustive et la strate arborescente¹¹. L'apport soutenu d'intrants et en particulier de substances azotées, durant des décennies sur des espaces autrefois cultivés et dorénavant abandonnés, favorise la **fermeture des paysages** et entretient dans les peuplements une dynamique de croissance forte.

1.1.2.2. LES CONTRAINTES ANTHROPIQUES

Le bilan démographique fortement excédentaire des régions méditerranéennes est largement responsable de l'augmentation des départs de feu. L'héliotropisme et les phénomènes de péri-urbanisation et de rurbanisation conduisent à une dilution du tissu urbain en milieu rural, à un mitage des zones boisées par le bâti. La région Languedoc-Roussillon voit croître sa population de 23.000 habitants par an, soit 1% de sa population actuelle, le double de l'évolution démographique des autres régions (DIREN Languedoc-Roussillon, 2002). Ce développement de secteurs d'habitation au contact des massifs forestiers a pour effet **l'élévation des facteurs déclencheurs d'incendies**.

Enfin, la fréquentation touristique phénoménale, doublée de l'hyper concentration de ces populations en été, et l'accroissement des surfaces forestières des pays méditerranéens renforcent encore cet état de fait. On pourra ainsi souligner l'ambivalence des politiques de reboisement de grande envergure, comme au Portugal, en France ou en Espagne (respectivement 57.000, 62.000 et 86.000 ha plantés par an depuis 20 ans (UN-ECE/FAO, 2000)).

L'occupation sélective de l'espace par l'Homme est souvent basée sur des critères de rentabilité. La forêt se replace ainsi dans un contexte de régénération naturelle qui accroît le risque d'incendies.

⁷ Droit de prélever du bois de chauffage ou de participer au produit de l'exploitation du bois dans les forêts communales

⁸ Coupe pratiquée dans un très jeune peuplement pour en desserrer les tiges surabondantes

⁹ Technique agricole traditionnelle qui consiste à brûler la couche superficielle du sol d'une friche ou d'un champ et à répandre uniformément les cendres sur le terrain pour le fertiliser avant une mise en culture

¹⁰ Technique sylvicole qui consiste à supprimer les nouvelles pousses d'un arbre, qui proviennent de bourgeons dormants

¹¹ Dans une forêt, on distingue, depuis le haut jusqu'au sol : la strate arborescente, la strate arbustive, la strate herbacée et la strate muscinale (des mousses).

1.1.2.3. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Au niveau planétaire, l'élévation constante du taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, effectif depuis quelques décennies et qui devrait continuer pour ce siècle, semble avoir deux conséquences.

- D'une part, cette concentration de CO₂ est pour partie responsable du **réchauffement climatique global**. Elle doit donc indirectement entraîner une exagération du stress hydrique estival et ainsi accroître l'inflammabilité des peuplements (Hoff et Rambal, 1999). Ce réchauffement s'accompagne d'une amplification locale des contrastes, traduite en région méditerranéenne par des étés plus chauds et plus secs. L'étude des séries de températures et de pluies du XX^{ème} siècle (Moisselin, 2003) met en évidence une hausse des températures et des cumuls de pluies avec surtout une modification des répartitions des pluies dans l'année. Ainsi, au printemps et en été la sécheresse s'accroît sur le Sud de la France, alors qu'en automne et en hiver les pluies deviennent plus conséquentes.
- D'autre part, cette évolution de la composition chimique de la troposphère augmente les capacités photosynthétiques des plantes. Ceci engendre une croissance accélérée des arbres et par conséquent un **accroissement de la réserve de biomasse combustible** (Vennetier, 2000).

De manière globale, le climat se réchauffe. D'après le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), en anglais l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), on a pu observer une hausse moyenne de 0,4°C de la température mondiale entre 1980 et 2000 (IPCC, 2001). **Pour le XXI^{ème} siècle, le réchauffement prévu selon les modèles et les scénarii d'émissions de gaz s'étale entre 1,5 et 6°C.**

En parallèle au réchauffement global, le climat s'accompagne de périodes de sécheresse de plus en plus longues dans le Sud de la France. L'année 2003 en fut une triste illustration avec huit mois de sécheresse, des températures extrêmes et des surfaces brûlées records (62.000 ha en France). Une meilleure connaissance des états hydriques de la végétation est indispensable.

Face à la vulnérabilité des zones méditerranéennes et à l'augmentation du niveau de risque, il est nécessaire de prévenir et de lutter contre les feux.

1.2. LES MOYENS MIS EN ŒUVRE POUR LUTTER CONTRE LE RISQUE DE FEU

1.2.1. LA SPÉCIFICITÉ DU RISQUE DE FEU DE FORÊT

Pour les risques liés aux inondations et aux avalanches, le bassin de risques est localisé de manière précise. En revanche, pour les feux de forêt, on distingue au sein du bassin de risques **différents niveaux d'aléa**, sans caractéristiques stables dans le temps (à l'échelle d'une génération) du fait des changements rapides d'utilisation de l'espace. Le niveau de risque est étroitement lié à la quantité de biomasse mobilisable et donc à la date du dernier sinistre !

Pourtant, le phénomène de feu de forêt est à la fois naturel et essentiel pour l'écosystème forestier¹². La suppression de tous les feux n'est ni physiquement possible, ni écologiquement souhaitable (Conard et Latham, 2000).

Dans la majorité des cas l'incendie est d'**origine humaine**, volontaire ou non. Le risque de feu de forêt est donc en théorie le risque naturel le plus facile à anticiper ; en théorie seulement !

Même si l'on peut toujours modéliser les variables environnementales et climatiques et les prédire avec plus ou moins d'exactitude, il est en revanche difficile de devancer les déplacements de chaque promeneur négligent. Pour s'en prémunir, l'orientation des politiques est nettement axée sur la prévention (MAAPAR, 2000). Elle s'organise autour de plusieurs points : l'information et l'éducation des populations, l'aménagement et l'entretien de l'espace rural et forestier, la surveillance des massifs boisés, le perfectionnement des moyens de lutte, l'amélioration des connaissances en matière de sciences forestières et d'incendies.

1.2.2. L'INFORMATION ET L'ÉDUCATION DES POPULATIONS

Des rencontres entre scolaires et pompiers sensibilisent les jeunes populations aux risques d'incendies de forêt. Les patrouilles de forestiers-sapeurs, outre leur mission de détection et d'étouffement des départs de feu, conseillent les promeneurs en forêt. En été, les médias relayent fréquemment des messages éducatifs de prudence ou d'interdiction de circulation dans certains massifs forestiers.

1.2.3. L'AMÉNAGEMENT ET L'ENTRETIEN DE L'ESPACE

En matière d'aménagement, les prédispositions légales sont de plus en plus coercitives. En France par exemple, la récente **Loi d'Orientation sur la Forêt** du 11 juillet 2001 oblige le débroussaillage aux alentours des bâtiments connexes à la forêt (à moins de 200 mètres).

Plusieurs procédures administratives aident à la prévention des feux :

- les Plans Intercommunaux de Débroussaillage et d'Aménagement Forestier (PIDAF) ;
- les Plans Départementaux de Protection de la Forêt contre l'Incendie (PDPFI) ;
- les Schémas Départementaux d'Aménagement des Forêts contre l'Incendie (SDAFI), qui remplacent les anciens Schémas de Prévention des Forêts Contre l'Incendie (SPFCI).

L'ensemble de ces schémas directeurs oriente la politique de prévention des incendies de forêt du département concerné. Depuis le 2 février 1995, les Plans de Zones Sensibles aux Incendies de Forêt (PZSIF) sont remplacés par les **Plans de Prévention des Risques relatifs aux Incendies de Forêt (PPRIF)**. Ces derniers fonctionnent par bassin de risque et leurs préconisations en matière d'aménagement s'imposent aux Plans Locaux d'Urbanisation (PLU)¹³ des communes qu'ils couvrent.

¹² Ensemble composé d'un milieu physique (biotope), délimité dans l'espace et de composition strictement définie, et des animaux et végétaux qui y vivent (biocénose)

¹³ ex Plans d'Occupation des Sols POS, depuis le 13 décembre 2000

Également, d'autres lois participent indirectement à ces dispositions, comme la Loi de Concentration Urbaine et la Loi d'Orientation Agricole (Journal Officiel n°158 du 10 juillet 1999) qui tendent à limiter la dissémination aléatoire du bâti en milieu rural.

Les services de **Défense des Forêts Contre l'Incendie (DFCI)**, composés de forestiers-sapeurs, des personnels de l'Office National des Forêts (ONF), des Comités Communaux de Feux de Forêts (CCFF) et des Associations Syndicales Communales de Défense contre les Incendies (ASDFCI), mettent en place et entretiennent des coupures de combustible. Le rabattage du sous-étage forestier, réalisé par brûlage dirigé ou sylvopastoralisme contrôlé à l'occasion de Contrats Territoriaux d'Exploitation (CTE), pallie ponctuellement le défaut d'entretien des peuplements. Toutefois, l'action sylvicole de fond reste encore relativement limitée. Une sylviculture adaptée pourrait pourtant enrayer le risque d'incendie (Delabrazé 1990, Moreira da Silva 1990, Velez 1990). Cette solution reste souvent peu accessible comparée aux faibles recettes que génèrent les boisements méditerranéens français.

La **prise de conscience du risque par les collectivités locales** paraît pourtant réelle et le recours à une délégation concertée de gestion de ces espaces avec l'ONF, basée sur la multifonctionnalité, tend à se généraliser.

1.2.4. LA SURVEILLANCE DES MASSIFS

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

Plusieurs programmes de recherche en cours 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 importants, tant au niveau national qu'europpéen. Par exemple, l'enjeu de protection des biens et des personnes est celui qui mobilise en priorité les services chargés de la sécurité. La 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, très peu de victimes civiles sont à déplorer.

L'enjeu de la protection du patrimoine naturel est d'une toute autre nature. La forêt est en effet **vecteur et victime du feu**. En tant que vecteur, elle doit être équipée et délimitée pour protéger les biens et les personnes. En tant que victime, elle n'est défendue qu'en deuxième priorité. Or, l'enjeu prioritaire de la lutte contre les incendies de forêts, la sécurité des biens et des personnes, ne donne lieu à aucune enquête statistique, à la différence de l'enjeu secondaire, la sécurité du patrimoine qui est très bien suivie, grâce à la base de données Prométhée notamment.

1.2.5. NOUVELLES CONNAISSANCES EN SCIENCES FORESTIÈRES ET MOYENS DE LUTTE

Les équipes de Sécurité Civile bénéficient de plus en plus des dernières innovations technologiques afin d'améliorer l'efficacité des moyens de lutte et d'offrir aux personnes une plus grande sécurité. Les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) intègrent peu à peu les « PC feux » des différents Services Départementaux d'Incendie et de Secours (SDIS).

Le suivi des équipes de lutte s'effectue de plus en plus par *Global Positioning System* (GPS) et permet de mieux gérer le positionnement des patrouilles sur le terrain.

Dans le domaine de la recherche, les études sont multiples et variées. Certains œuvrent pour la valorisation des produits de la forêt méditerranéenne et plusieurs auteurs (Marchal 1989, Gérard *et al.* 2003, Roda *et al.* 2003) ont ainsi rappelé aux forestiers le potentiel du bois de chêne vert en tant que bois d'œuvre. D'autres études portent sur la compréhension des phénomènes qui régissent la dynamique d'un incendie de forêt et modélisent le déplacement du feu. Certaines équipes examinent les moyens d'améliorer la résilience des peuplements après le passage de l'incendie (Arianoutsou et Ne'eman 2000, Broncano 2000, Román Cuesta 2002). Enfin certains travaux portent sur l'utilisation des satellites d'observation de la Terre pour suivre l'évolution de la végétation et spatialiser le risque d'incendie (Deshayes *et al.* 1998, Chuvieco *et al.* 1999).

1.2.6. PARTICIPATION DE L'ÉTAT

En France, la participation de l'État se fait principalement au travers de deux Ministères :

- le Ministère de l'Intérieur (direction de la défense et de la sécurité civile) mobilise en prévention les moyens d'intervention et de lutte contre les feux déclarés ;
- le Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires Rurales (MAAPAR) (direction de l'espace rural et de la forêt) est chargé des actions de prévention.

D'autres Ministères interviennent ponctuellement :

- le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable est chargé d'actions d'information et de coordination des Plans de Prévention Régionaux ;
- le Ministère de la Défense, selon les années, fournit un contingent de personnels et de moyens de lutte ;
- le Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, grâce à la météorologie nationale, fournit plusieurs fois par jour les éléments d'appréciation des risques en fonction des éléments climatiques.

Il est difficile de connaître avec précision les dépenses engendrées par les incendies de forêt. En 1998 le coût de la lutte s'élevait à 67 millions d'euros et celui de la protection à 31 millions d'euros (Kert, 1999). A ces dépenses s'ajoutent les contributions de l'Union Européenne, des régions et surtout des départements et des communes.

De manière imagée, on dit que le débroussaillage d'un hectare de forêt coûte 500 € alors que le même hectare brûlé a engagé des dépenses à hauteur de 10 000 €. Pour l'année 2003 record, cela correspondrait à plus de 600 M€ !

1.2.7. EFFETS DE LA POLITIQUE DE PRÉVENTION

Depuis les années 1990, alors qu'on assiste à une augmentation générale des surfaces forestières (FAO, 2001), les surfaces brûlées tendent à diminuer. La Figure 2 représente les surfaces brûlées cumulées dans le Sud-Est de la France en fonction des années.

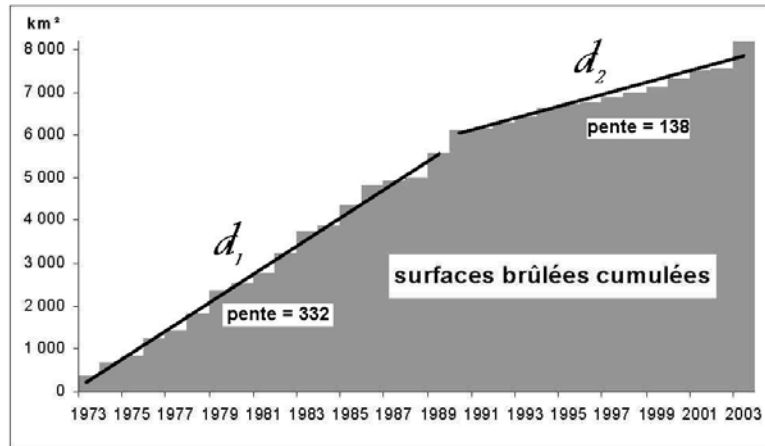


Figure 2. Surfaces brûlées cumulées dans le Sud-Est de la France de 1973 à 2003

Ainsi, on peut observer que la pente de la droite d_2 (régression linéaire sur la période 1990-2003) est largement inférieure à la pente de la droite d_1 (régression linéaire sur la période 1973-1989). Cette rupture de pente est due aux efforts continuels de prévention et de lutte, consécutifs à une prise de conscience des pouvoirs publics lors des grands feux de 1989 et 1990.

1.3. CONCLUSION

Depuis 30 ans, le pourtour français méditerranéen a vu disparaître près de 800.000 hectares de forêt par incendies !

D'un côté, nous assistons depuis les années 1990 à une diminution des surfaces brûlées grâce à l'efficacité croissante des moyens de prévention et de lutte.

De l'autre, nous observons un accroissement du niveau de risque, en raison de la modification de l'occupation des sols (+ 60.000 ha de forêt par an, fermeture des paysages...), du changement du climat (sécheresse plus marquée l'été) et de l'augmentation des densités de population (recrudescence du nombre de départs de feu). Compte tenu de l'augmentation des surfaces à risque, la **connaissance spatiale du niveau de risque** est une gageure scientifique d'actualité.

Nous allons donc préciser comment le risque de feu de forêt est évalué en France.

2. LA GESTION DU RISQUE DE FEU DE FORÊT EN FRANCE

La gestion opérationnelle du risque de feu de forêt en France est basée essentiellement sur la prévention. Pendant l'été, Météo-France établit des cartes de risque d'incendie pour la zone méditerranéenne à partir d'indices météorologiques. En même temps, les agents d'intervention (sapeurs-pompiers et forestiers-sapeurs) se positionnent sur les zones à risque pour pouvoir intervenir sur chaque sinistre en moins d'une demi-heure afin de limiter les préjudices.

Dans cette seconde partie du premier chapitre, nous présentons tout d'abord les composants du risque d'incendie puis les caractéristiques du risque météorologique.

2.1. LE RISQUE ET LA CARTOGRAPHIE DES ALÉAS

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 (aléas) ainsi que les sites où les enjeux de protection sont particulièrement importants (vulnérabilités). L'évaluation et la cartographie du risque reposent sur une analyse séparée de ces deux composants (Figure 3).

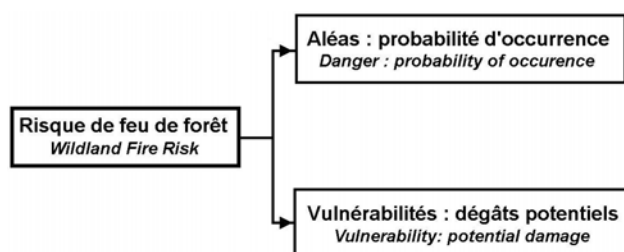


Figure 3. Composants du risque de feu de forêt

Les vulnérabilités représentent les dégâts potentiels, c'est-à-dire les sites à protéger en priorité comme les zones habitées. La localisation de ces zones s'appuie en général sur des cartes précisant les voies de communication et les lieux de résidence (mise à jour régulière des cartes par photographies aériennes, enquêtes de terrain, plans cadastraux...).

Les aléas correspondent aux probabilités d'occurrence d'un incendie et donc aux zones propices au déclenchement et à l'expansion d'un feu.

Bachmann et Allgöwer (1999) et Blanchi *et al.* (2002) distinguent l'aléa d'éclosion de l'aléa de propagation du feu (Figure 4).

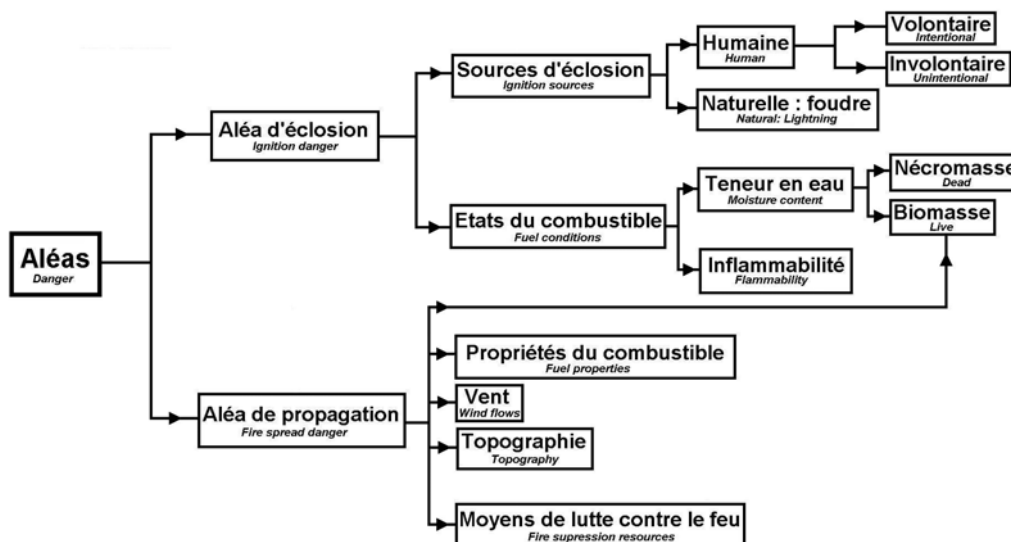


Figure 4. Structure et composants des aléas de feu de forêt

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 (deux tiers 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 d'état 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 contenu en eau de la végétation**. Pour ce dernier point, la télédétection spatiale pourrait devenir un outil de suivi quotidien, sur de très grandes surfaces, de l'état hydrique de la végétation.

La contribution au risque de chaque facteur du milieu naturel et du milieu humain est traduite par l'intermédiaire d'un indice de risque, 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 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.

L'étude de l'aléa, sur le plan statistique, dispose d'un bon outil avec l'inventaire Prométhée, qui rassemble les données des 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 (milliers d'hectares). Ce dispositif doit être pérennisé et mieux exploité, notamment d'un point de vue cartographique. Les possibilités techniques récentes (télédétection spatiale, GPS) et les enquêtes décennales de l'Institut Forestier National (IFN) sont à intégrer au dispositif opérationnel en place.

En reprenant la *Figure 4* précédente, nous remarquons que chaque composant du risque peut être décrit à l'aide d'une carte, comme le relief, la végétation, les vents... Plusieurs éléments font intervenir des paramètres météorologiques dans la détermination des aléas de risque d'incendie, représentés en gras sur la *Figure 5*.

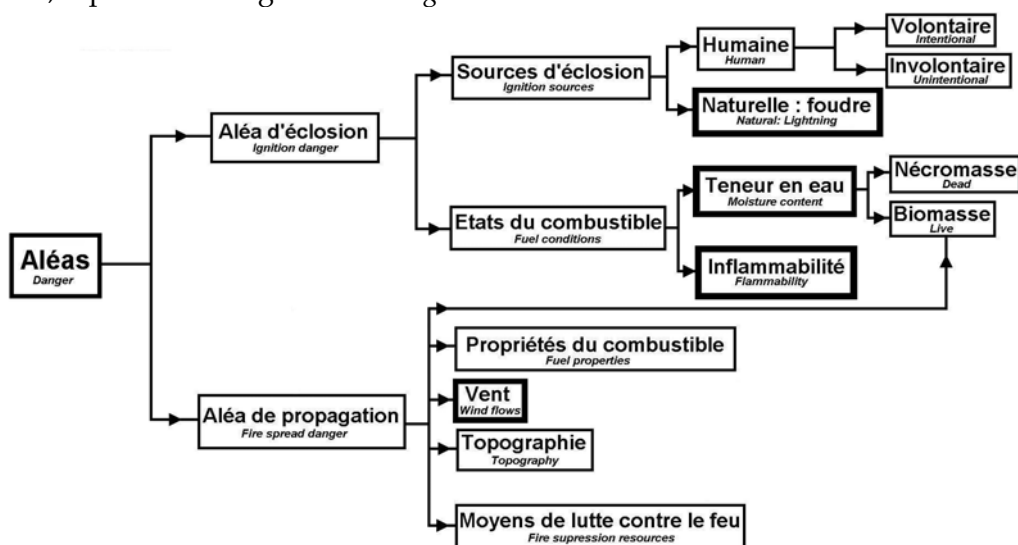


Figure 5. Paramètres météorologiques et aléas de feu de forêt

Les données météorologiques interviennent à la fois lors de l'éclosion et de la propagation d'un incendie. Même si la source initiale du feu est souvent d'origine humaine (la foudre pour de rares cas), l'aléa d'éclosion est gouverné par l'état hydrique du combustible, lui-même fonction des conditions climatiques locales (température, humidité de l'air, réserve en eau du sol fonction des pluies). Le vent va quant à lui jouer un rôle dans la propagation du front de flammes.

C'est pourquoi le système français de prévention des feux de forêt est basé essentiellement sur une évaluation spatiale du risque à partir du réseau de stations météorologiques de Météo-France.

2.2. LE SYSTÈME OPÉRATIONNEL DE RISQUE MÉTÉOROLOGIQUE

Pour prévenir les feux de forêt de la zone méditerranéenne, on cherche surtout à connaître les caractéristiques de la strate arbustive, principal vecteur du feu. Son état hydrique peut être appréhendé de plusieurs manières :

- par la mesure directe de la teneur en eau, à l'aide d'un réseau de stations de prélèvements ;
- par la simulation numérique du comportement moyen des végétaux, à partir des conditions climatiques observées (pour un réseau de stations météorologiques) ;
- par l'estimation du stress hydrique des plantes, dérivé de la mesure du rayonnement par télédétection.

En France, le choix opérationnel s'est porté sur la simulation numérique de l'état de sécheresse de la végétation à travers des indices de risque météorologique. Météo-France est le maître d'œuvre.

Le risque final de danger d'incendie prend en compte le risque météorologique et différentes expertises (prévisions météo, observations des tours de guets, connaissance des conditions locales par les pompiers et les forestiers). Dans tous les cas, les feux de forêts du sud-est sont du ressort du **Centre Opérationnel de Zone (COZ)** de la sécurité civile de Valabre (Baudino 2000, Bernard 2000). Le dispositif opérationnel en vigueur chaque été mobilise en moyenne 27.000 sapeurs-pompiers, 3.500 véhicules et 25 bombardiers d'eau (Ministère de l'Intérieur, 2002). On peut compter sur 600 patrouilles par jour. La règle d'intervention est **l'anticipation**. L'ordre d'opération du Ministère de l'Intérieur pour le risque de feu couvre généralement les trois mois d'été (pour l'année 2003 du 19 juin au 26 septembre) et est centralisé à l'antenne météorologique du COZ. La période peut-être étendue dans le cas de sécheresse prolongée en fin d'été.

Le risque météorologique d'incendie résulte de l'expertise d'un « prévisionniste feux de forêt », sous la forme d'une **prévision du risque biquotidienne sur une échelle de six niveaux** : F faible, H habituel, I intensifié, S sévère, T très sévère, E exceptionnel. La prévision est faite sur 112 zones (Figure 6) d'une surface moyenne de 700 km² chacune.

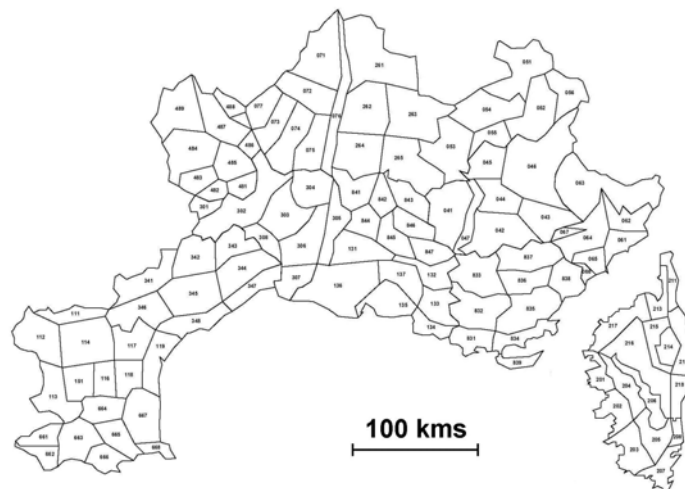


Figure 6. Découpage des 112 zones de risque météorologique pour la France (Bidet, 2000)

2.2.1. LES INDICES DE RISQUE MÉTÉOROLOGIQUE

Depuis une vingtaine d'années, les travaux de recherche ont permis de définir des indices de risque météorologique qui permettent une prévision temporelle et spatiale du risque. Dans le cadre du projet européen MEGAFiReS, MM. Camia et Gottero ont développé en 1998 l'application *Meteorological Fire Danger Index Processor* (MFDIP) qui permet de recenser la plupart des indices de risque météo. Ces indices sont calculés pour une station donnée (latitude, longitude, altitude, précipitations moyennes annuelles) et à partir des relevés quotidiens de plusieurs variables (températures extrêmes, pression atmosphérique, vitesse du vent, précipitations, évapotranspiration potentielle, rayonnement global) (Camia *et al.*, 1999). Le Tableau 2 présente les indices les plus utilisés dans le monde selon leur rôle.

Tableau 2. Quelques indices de risque météorologique

Rôle	Indices	Libellé	Pays	Références
Propagation du feu	IMPI	Indice Meteorologico di Prevenzione per Incendi	Italie	Palmieri et Cozzi 1983 Palmieri <i>et al.</i> 1992, 1993
	ISI	Initial Spread Index	Canada	Van Wagner, 1987
	GFDM	Global Fire Danger Meters	Australie	Noble <i>et al.</i> , 1980
Inflammabilité de la litière fine	FMM	Fuel Moisture Model	Australie	McArthur, 1967
	EMC	Equilibrium Moisture Content	Canada	Simard, 1968
	FFMC	Fine Fuel Moisture Code	Canada	Van Wagner, 1987
	NFDRS 1h	National Fire Danger Rating System Humidité au pas de temps horaire	États-Unis	Deeming <i>et al.</i> , 1977
	BEHAVE	BEHAVE fine fuel moisture model	États-Unis	Rothermel <i>et al.</i> , 1986 Andrews et Chase, 1990
Inflammabilité de la biomasse et de la litière grossière	NFDRS 10-100h	National Fire Danger Rating System Humidité au pas de temps de 10 et 100 heures	États-Unis	Bradshaw <i>et al.</i> , 1983
	NFDRS 1000h	National Fire Danger Rating System Humidité au pas de temps de 1000h	États-Unis	Fosberg <i>et al.</i> , 1981
	KBDC et KBDI	Keetch-Byram Drought Code et Keetch-Byram Dryness Index	États-Unis	Keetch et Byram, 1968 révisé en 1988
	DMC	Drought Moisture Code	Canada	Van Wagner, 1987
	DC	Duff Code	Canada	Van Wagner, 1987
Détermination des jours à risque extrême	FWI	Fire Weather Index	Canada	Van Wagner, 1987
	BUI	Build Up Index	Canada	Van Wagner, 1987
	Orieux Index	Orieux Index	France	Orieux, 1979
	Risque numérique	Risque numérique	France	Drouet et Sol 1993, Sol 1990
	I87	Carrega Index	France	Carrega, 1990
	ICONA	Probabilité d'ignition par la méthode ICONA	Espagne	Icona, 1988 et 1993
	Irepi Index	Irepi Index	Italie	Bovio <i>et al.</i> , 1984
	Index Portugais	Index Portugais	Portugal	INMG 1988, Gonçalves et Lourenço 1990
	FFFI	Finnish Forest Fire Index	Finlande	Heikinheimo <i>et al.</i> , 1998

La multitude d'indices de risque s'explique par la spécificité des besoins de chaque pays et par une gestion du risque différente selon l'utilisateur final (pompier, forestier...).

En Europe, il n'existe pas de méthode uniforme pour estimer le risque de feu. Quelques études, dans le cadre des projets européens Minerve (I et II), ont tenté de trouver un modèle commun, applicable à la zone méditerranéenne européenne. Les résultats ne sont pas concluants.

Au Portugal, un indice dérivé de l'indice de Nesterov est utilisé. Il est composé de trois indices intermédiaires : un indice donnant les conditions atmosphériques de la journée (température de l'air et point de rosée), un indice de cumul intégrant les pluies sur la période et un indice combinant les deux indices précédents avec la vitesse du vent (Viegas *et al.*, 1998).

En Espagne, la méthode utilisée s'appuie sur un modèle de contenu en eau des petites particules combustibles, en estimant la probabilité d'ignition, combinée avec la vitesse du vent (méthode proche du modèle BEHAVE).

En Italie, pour la partie méditerranéenne, l'indice utilisé est une légère calibration des coefficients de mesure du risque de feu de forêt de l'australien McArthur.

En Australie, deux indices de risque météo sont utilisés pour les prairies (GFDM) et les forêts d'eucalyptus (FFDM). Ils utilisent des relations empiriques pour estimer le contenu en eau des végétaux.

Pour la plupart des systèmes d'évaluation du risque de feu, la tendance actuelle est d'essayer d'incorporer de plus en plus les modèles de prédiction du comportement du feu (spatial et temporel) aux seules estimations du potentiel météorologique de feu.

Les méthodes les plus complexes d'évaluation du risque de feu sont le CFFDRS **canadien** et le NFDRS **américain**. Ces deux systèmes prennent en compte non seulement des variables climatiques mais aussi des modèles de comportement du feu. La partie spécifique climatique du CFFDRS est le système FWI (*Forest fire Weather Index*), calculé à partir de trois indices de bases (FFMC, DMC, DC) et deux intermédiaires (ISI et BUI) (Van Wagner, 1987). Le FWI est proche du concept d'intensité de la ligne de feu de Byram. Le NFDRS est quant à lui un modèle mathématique divisé en plusieurs sous-modèles, pour l'ignition et le comportement du feu et pour un combustible et des conditions topographiques et climatiques données. Leur modèle inclut notamment l'indice KBDI qui rend compte des sécheresses saisonnières, en représentant l'estimation de déficit hydrique (cumulée à long terme) pour les particules organiques dans le sol.

En France, la plupart des méthodes se réfèrent à un **modèle d'équilibre hydrique du sol**. La teneur en eau du sol est simplement fonction des pluies et de l'évaporation. L'index proposé par Orioux (1979) est une combinaison de la réserve en eau du sol estimée et de la vitesse du vent. L'indice I87 (Carrega, 1990) utilise la température et l'humidité relative de l'air ainsi que le stade phénologique de la plante et l'estimation des réserves en eau du sol en surface. La méthode de Sol (1990), appelée **Risque Numérique**, est basée sur la production de trois coefficients (réserve en eau du sol, vent et fausse humidité relative) additionnés à un facteur de correction, fonction de la dispersion des flammes sur le front du feu.

De nos jours, Météo-France met à la disposition des services de prévision des feux de forêt un site Internet « Feux De Forêts Sud-Est » (FDFSE). Pour chacune des 112 zones de risque, plusieurs indices météorologiques sont accessibles en ligne ainsi que des informations de prévision du risque pour les jours à venir. Météo-France fournit ainsi une **prévision météorologique biquotidienne du niveau de risque sur chaque zone** en fonction duquel sont mis en place le guet aérien armé et le déploiement des patrouilles pour intervenir dès l'éclosion des feux.

L'assistance opérationnelle de Météo-France aux incendies de forêt a pour but d'estimer le « danger météo-végétation » par le biais de la simulation numérique. Celle-ci tient compte **uniquement de paramètres météorologiques** (vent, humidité de l'air, température, ensoleillement, pluie en cours éventuelle, présence de rosée), sur la base d'un **comportement moyen de la végétation** sur chaque zone de 700 km². Les variables relatives à la végétation (espèce, strate, stade phénologique...) ne sont nullement prises en compte dans le calcul des indices de risque.

Pour chaque zone, Météo-France calcule :

- des indices de sécheresse : Indice d'Humus (*IH*), Indice de Sécheresse (*IS*), réserve en eau du sol ;
- des indices de danger : Indice Forêt Météo (*IFM*), vitesse de propagation du feu, seuil d'éclosion, calculés à partir des précédents.

Il faut toutefois prendre avec précaution ces indices dans la mesure où ils ne sont calculés que pour quelques stations de référence et ne référencent pas forcément bien l'ensemble de la zone à risque de feu.

2.2.2. L'INDICE FORÊT MÉTÉO *IFM*

L'Indice Forêt Météo (*IFM*) est un **indice de danger d'ambiance** intégré en 1995 dans le dispositif opérationnel de Météo-France. Il dérive de la méthode de risque météorologique mise en œuvre au Canada. Dans le cadre du projet de recherche MINERVE, Météo-France a montré les bonnes performances de l'*IFM* canadien pour la zone méditerranéenne (Bidet, 1996). Cet indice a la particularité de disposer de son propre calcul de sécheresse. Selon Météo-France il donne de très bons résultats, même en cas de pluies récentes, de dessèchement très superficiel (début de saison en particulier) ainsi qu'en montagne ou dans l'arrière-pays. Il a aussi l'avantage de pouvoir, en théorie, s'appliquer à l'ensemble de l'année. Toutefois, il n'a été validé en zone méditerranéenne que sur la période estivale. Son calcul est fidèle à la méthode canadienne (Figure 7).

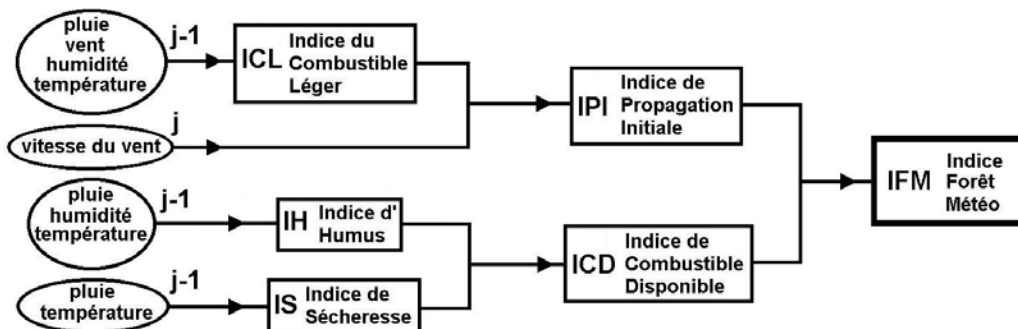


Figure 7. Schéma simplifié de calcul de l'*IFM* du jour j

Chaque jour, l'*IFM* calculé dépend de deux indices intermédiaires (*IPI* et *ICD*), eux-mêmes dérivés de trois indices (*ICL*, *IH* et *IS*). *ICD*, *ICL*, *IH* et *IS* sont calculés à partir de paramètres météorologiques issus du jour précédent. Seul l'indice *IPI* fait intervenir dans son calcul la vitesse du vent du jour même.

L'*IFM* est positif et non borné. De tous les paramètres utilisés pour son calcul (vent, température, humidité, pluie), le vent est prépondérant par rapport aux autres. Météo-France utilise l'*IFM* depuis 1995 et a pu identifier des seuils intéressants, modulables en fonction des caractères de la zone étudiée (Tableau 3).

Tableau 3. Classes de risque météorologique et valeurs d'*IFM*

Risque météorologique	Zones à caractère non méditerranéen et zones d'altitude	Zones méditerranéennes de faible altitude
Faible	$IFM < 10$	
Habituel	$10 < IFM < 30$	
Intensifié	$30 < IFM < 50$	$30 < IFM < 60$
Sévère	$50 < IFM < 80$	$60 < IFM < 100$
Très sévère	$IFM > 80$	$IFM > 100$
Exceptionnel	$IFM > 80$	$IFM > 100$

D'après Météo-France, l'*IFM* présente d'une façon générale un excellent comportement. Néanmoins, dans quelques situations particulières il semble inadapté :

- surestimation de l'*IFM* : vent fort après de fortes pluies, températures anormalement basses ;
- sous-estimation de l'*IFM* : vent faible et air sec, températures anormalement hautes.

Selon Météo-France, l'étude des séquences historiques montre que l'*IFM* ne permet pas, à lui seul, de différencier les situations dites très sévères des situations dites à caractère exceptionnel. Lors de celles-ci, l'*IFM* présente des valeurs autour de 90-120. Le caractère exceptionnel est plutôt détecté par l'existence d'indices de sécheresse très forts ($IH > 150$ et $IS > 700$) et de vitesses de propagation du feu très fortes ($> 1,5 \text{ km.h}^{-1}$).

En complément, Météo-France propose l'Indice Journalier de Sévérité (*IJS*) calculé à partir de l'indice *IFM* par l'Équation 1.

Équation 1. $IJS = 0,0272 IFM^{1,77}$

2.2.3. LES INDICES MÉTÉOROLOGIQUES ET L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION

Il nous semble important de préciser les limites des indices donnés par Météo-France et d'en étudier leur représentativité en regard de l'état de sécheresse de la végétation, état mesuré *in situ*.

Selon Météo-France, le découpage géographique des 112 zones de l'*IFM* (Figure 6) tient compte :

- des limites administratives de gestion du risque (département),
- du zonage climatique (vents dominants),
- de l'occupation du sol (plaines céréalières, massifs forestiers...),
- du relief (vallées, plaines...),
- de la localisation des stations météorologiques.

Il semblerait que ce dernier point soit le facteur décisif pour l'établissement du découpage des zones de risque. Il est en effet indispensable de disposer d'une station météorologique automatique de référence mesurant les quatre paramètres nécessaires au calcul des indices.

Comme l'exposent Van der Voet *et al.* (1994), la représentation spatiale de données météorologiques ponctuelles est très sensible à la densité du réseau initial et à la variabilité des paramètres mesurés. Dans certains cas par manque de stations de mesure, on trouvera alors un site de mesure à l'intersection de plusieurs zones IFM. La statistique semble donc gouverner le découpage.

Pour justifier notre propos, nous prenons l'exemple du département de l'Hérault. Il est découpé en 8 zones de risque IFM. En comparant ce découpage aux cartes d'occupation du sol de l'Inventaire Forestier National (Figure 8), on observe peu de concordances.

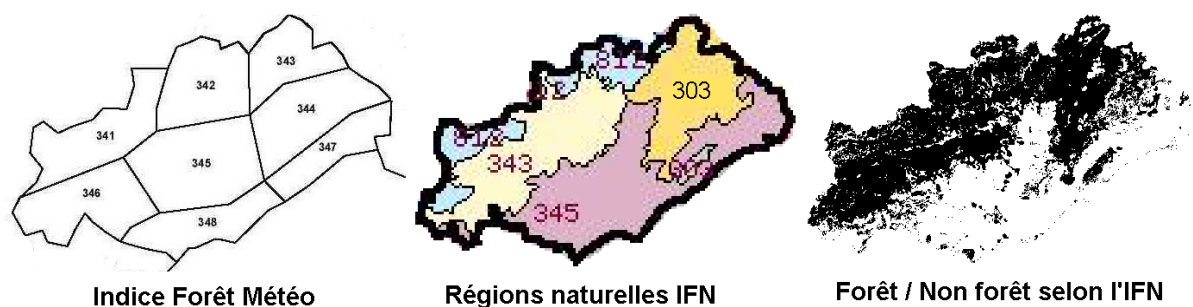


Figure 8. Comparaison de différents découpages pour le département de l'Hérault

Dans le département de l'Hérault, chacune des huit zones est composée à la fois de massifs forestiers, de zones urbaines et de surfaces agricoles (vigne, maraîchage, céréales). Les zones littorales 347 et 348 de l'IFM sont composées essentiellement de surfaces urbaines (villes côtières, aéroport) et de surfaces lacustres (bassin de Thau, étangs Palavasiens, étang de l'Or). Pour ces deux zones même si leur vulnérabilité au feu n'est pas négligeable (forte concentration de population), en l'absence de massifs forestiers, il semble illusoire de calculer un indice de risque météorologique représentatif des aléas d'éclosion et de propagation d'un probable incendie.

Ainsi, il est préjudiciable que le découpage IFM ne suive pas l'occupation du sol, même de façon grossière comme le fait l'IFN avec ses cartes de régions naturelles. Les cartes de risque météorologique sont indépendantes de la végétation en place. Il est donc difficile de juger de la pertinence spatiale des indices calculés par Météo-France sur quelques stations ponctuelles (178 stations complètes + 89 stations température-pluie en 2003) .

La question soulevée est donc la suivante : dans la mesure où les stations météorologiques sont le plus souvent situées hors des massifs forestiers et préférentiellement dans les agglomérations et aéroports, **comment la mesure locale d'un paramètre physique**, comme la hauteur des pluies, la vitesse du vent, la température et l'humidité de l'air, **peut-elle être représentative d'une zone de 700 km²**, et surtout du **niveau de risque d'incendies de la végétation** ?

Dans la prochaine partie, nous allons décrire le lieu privilégié des incendies, à savoir les écosystèmes forestiers. Il est important de préciser leur rôle lors d'un feu de forêt ainsi que les mécanismes de régulation du stress hydrique par les plantes.

3. LES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

Avant d'aborder précisément l'objet de la thèse et le suivi de l'état hydrique des végétaux par télédétection, il est important de préciser les paramètres régissant le comportement d'un feu de forêt.

3.1. LE COMPORTEMENT DU FEU

Dans le jargon « feu de forêt » les anglo-saxons distinguent trois phases dans un incendie de forêt et utilisent quatre adjectifs pour décrire le combustible (*fuel* en anglais) :

- *ignitability* : la sensibilité à l'allumage, à l'**ignition**. C'est la propriété d'une matière (un végétal dans notre cas) à s'enflammer au contact d'une source de chaleur ;
- *sustainability* : la « durabilité », la propriété d'une matière à continuer à brûler ;
- *flammability* = *ignitability* + *sustainability* : les francophones regroupent les deux premiers termes dans la notion d'**inflammabilité**, c'est-à-dire l'aptitude d'un corps solide, liquide ou gazeux à s'enflammer facilement ;
- *combustibility* : la **combustibilité** est la propriété des corps combustibles, c'est-à-dire capables de brûler au contact de l'air en produisant une quantité de chaleur utilisable. Lors d'un incendie, on étudie la quantité de chaleur émise, la vitesse et la hauteur du front de flammes (Plucinski et Catchpole, 2002).

L'incendie de forêt correspond physiquement au développement spatio-temporel d'une combustion, pour l'essentiel en phase gazeuse, entre les produits de décomposition pyrolytique de la biomasse et l'oxygène de l'air. Dans un premier temps, sous l'effet d'une source de chaleur externe, la totalité de l'eau contenue dans le végétal se vaporise. L'inflammabilité initiale se déclenche alors lorsque la température de la biomasse atteint un seuil d'environ 300°C. De manière formelle, pour augmenter progressivement la température de 1 kg d'eau liquide de 0 à 100°C on a besoin d'apporter 419 kJ (chaleur sensible). A 100°C, pour vaporiser la totalité de cette eau il faut apporter cinq fois plus d'énergie (2257 kJ de chaleur latente). Ainsi, plus la végétation contiendra d'eau, plus la quantité de chaleur nécessaire à son inflammation sera importante. Cette vapeur d'eau vaporisée en grande quantité joue également un rôle de frein de la vitesse de progression du front de flammes (Albini 1985, Jappiot et Mariel 1996).

L'évaluation de l'état hydrique de la végétation est donc particulièrement importante dans l'étude du risque d'incendie.

3.2. LE STRESS HYDRIQUE DU VÉGÉTAL

L'eau est le composant majoritaire et indispensable à tout être vivant. C'est un solvant ; les éléments minéraux sont absorbés sous forme hydratée. Le bilan hydrique de la plante est en permanence équilibré. S'il est négatif, un stress hydrique apparaît. La plante développe alors des processus physiologiques pour lutter contre ce manque d'eau, principalement en réduisant ses émissions pour retrouver un équilibre hydrique satisfaisant.

3.2.1. LE CYCLE DE L'EAU EN FORÊT

Le cycle de l'eau en forêt est représenté dans la Figure 9.

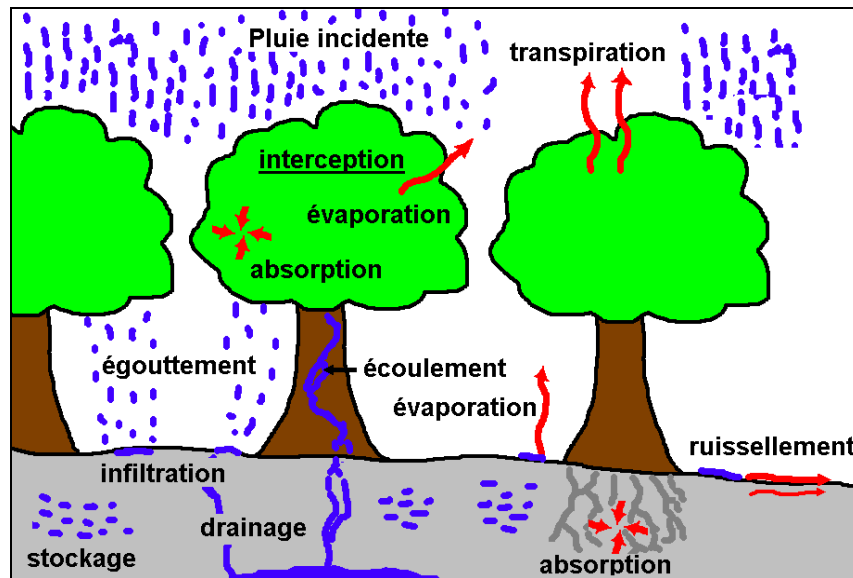


Figure 9. Cycle simplifié de l'eau en forêt

Les entrées au cycle de l'eau sont représentées par les hydrométéores (pluie, neige, grêle...). Si l'on considère la **pluie incidente** qui tombe sur une canopée¹⁴, on distingue plusieurs chemins de l'eau :

- les pertes par **interception** désignent la part de la pluie qui est retenue par la canopée et qui est soit absorbée par le couvert, soit rendue à l'atmosphère par évaporation ;
- l'**égouttement** est la part de la pluie qui atteint le sol directement à travers le couvert ou après écoulement sur les feuilles ou le long des branches ;
- l'**écoulement** le long des troncs est la part de la pluie interceptée par la canopée qui s'écoule le long du tronc.

D'après Duwig (1994), l'interception représente de 10% de la pluie incidente pour les feuillus à près de 50% pour les résineux. L'écoulement le long des troncs représente moins de 2% de la pluie incidente pour les chênes et résineux à près de 12% pour les hêtres.

¹⁴ Ensemble des couronnes (ou houppiers) des arbres d'une forêt. Vient de l'anglais *Canopy*.

Les sorties au cycle de l'eau suivent trois directions :

- vers le haut par évaporation et transpiration des plantes ;
- vers le bas par infiltration dans le sol (une partie retenue, une autre drainée) ;
- latéralement par ruissellement (superficiel ou hypodermique).

Nous rappelons les notions d'évapotranspiration réelle ETR et potentielle ETP. L'ETR représente la quantité réelle d'eau rejetée dans l'atmosphère par la transpiration des végétaux et l'évaporation à partir du sol et du couvert végétal. Cette évapotranspiration a une limite maximale (ETM), liée directement à la demande climatique de l'atmosphère, calculée de façon théorique (ETP) pour une réserve hydrique du sol maximale et une prairie enherbée.

3.2.2. LA VÉGÉTATION MÉDITERRANÉENNE

Quand on parle de végétation méditerranéenne, on rencontre souvent les termes xérophyte, sclérophyte, garrigue, maquis... Faisons un bref rappel de vocabulaire.

Un **xérophyte** est une plante dite xérophile qui croît sur des sols ou des matériaux de sol extrêmement secs et donc qui affectionne les milieux secs. Un **sclérophyte** est une plante dite sclérophylle à feuillage sempervirent, aux feuilles relativement petites, coriaces et assez épaisses.

La garrigue est une formation arbustive ouverte, en climat méditerranéen, avec des plages de sol nu, généralement sur sol calcaire, et résultant d'une régression de la forêt sous l'influence du feu et du pâturage intensif. Dominent les arbrisseaux (chêne kermès, genévrier, arbousier) et les plantes herbacées (lavande, thym, ciste blanc, romarin, myrte). La garrigue tient son nom de *garric* (chêne kermès). **Le maquis** est une formation fermée, xérique, difficilement pénétrable, constituée de végétaux ligneux bas, exclusivement méditerranéenne sur sol siliceux. Le maquis (caractéristique des sols siliceux, acides), qui résulte de la dégradation de la forêt de chênes-lièges est plus dense et plus touffu que la garrigue. Sa végétation atteint facilement quatre mètres de hauteur et se compose de nombreux arbrisseaux (arbousier, bruyère arborescente, ciste, genêt, pistachier, lavande), tellement serrés qu'ils gênent le développement des arbres (chêne-liège, chêne vert, pin maritime).

Les espèces forestières xérophiles consomment peu d'eau pour fabriquer une quantité donnée de matière sèche ; elles peuvent survivre longtemps, lorsque les réserves en eau diminuent jusqu'au point de flétrissement. Selon Baldy *et al.* (1988), on observe une **adaptation histologique** aux conditions de sécheresse (présence d'écorce, feuilles vernissées et petites, système racinaire ramifié et performant...).

3.2.3. PROCESSUS PHYSIOLOGIQUES

L'eau absorbée par une plante est restituée au milieu environnant selon deux voies : la transpiration (majoritaire) et la glutation (minoritaire). La glutation rejette des gouttelettes de sève brute par les stomates aquifères lors d'un excédent d'eau. La transpiration quant à elle représente le rejet de l'eau sous forme gazeuse ; seul 10% de la transpiration passe par la cuticule, la majorité de l'eau est véhiculée par les **stomates** des feuilles. Les stomates sont des ouvertures microscopiques dans l'épiderme des feuilles (éventuellement des tiges), formées de cellules différenciées et assurant les échanges gazeux entre la plante et l'atmosphère.

La transpiration varie selon des facteurs structuraux (densité stomatique, localisation des stomates, surface foliaire, mobilité foliaire, nature des cellules) et des facteurs externes (lumière, température, vent, sol) (Grace, 1983).

Le contrôle de l'ouverture des stomates s'effectue :

- par variation des pressions de turgescence des cellules formant le stomate (cellules de garde et cellules épithéliales) ;
- par variation de la pression osmotique dans les cellules de garde selon l'humidité de l'air (lorsque l'air s'assèche, le stomate se ferme).

Certaines substances composant la plante voient leur taux varier en fonction des mécanismes physiologiques : on les appelle les **effecteurs internes**. Pour le contrôle de la transpiration, le gaz carbonique, le potassium et les hormones végétales ont un rôle important. Le dioxyde de carbone CO_2 est nécessaire à la photosynthèse ; sa concentration dans les stomates est beaucoup plus élevée que dans l'air (phénomène d'accumulation la nuit). L'ion potassium K^+ a quant à lui un rôle important dans le contrôle des échanges gazeux. Sa concentration varie beaucoup dans les cellules de garde : $0,8 \text{ mol.L}^{-1}$ si le stomate est fermé, $0,4 \text{ mol.L}^{-1}$ si le stomate est ouvert (Aussenac, 1995).

On distingue aussi trois hormones végétales et une toxine qui régulent la transpiration :

- les auxines et cytokinines : elles stimulent l'ouverture des stomates par acidification des cellules (stimulation des pompes à protons et synthèse de l'ion malate Mal^-) ;
- l'acide abscissique ou hormone de détresse : en réponse à un stress, sa hausse de concentration provoque la fermeture des stomates ;
- la fusiococcine : cette toxine stimule en continu les pompes à protons ; les stomates restent ouverts et la plante meurt.

La plante réagit aussi à la lumière : le rayonnement bleu stimule les pompes à protons et active deux enzymes (malate déshydrogénase et PEP carboxylase). La pression osmotique des cellules de garde augmente et le stomate s'ouvre.

Dans tous les cas, la plante conserve un équilibre hydrique permanent, grâce à :

- des phénomènes physiologiques à court terme : la fermeture des stomates stoppe la perte d'eau et bloque la photosynthèse ;
- l'adaptation morphologique à long terme de la plante à son milieu : densité et position des stomates, subérification des tissus épidermiques, minéralisation des surfaces foliaires (exemple du cactus), hausse de la surface racinaire pour explorer plus de sol.

La végétation méditerranéenne est bien adaptée aux sécheresses extrêmes du climat, notamment grâce à des ajustements de la surface foliaire autour d'un état d'équilibre. Le stress hydrique des végétaux est lié aux humidités relatives du sol et de l'air ; on parle respectivement de stress osmotique et de stress évaporatoire. On mesure le stress d'une plante par sa teneur en eau (diminution lors d'un stress) et surtout par la modification de ses échanges gazeux. Corollairement, les organes d'échanges (feuilles) tendent à s'échauffer car le refroidissement par transpiration est insuffisant. Les flux de chaleur et les températures de surface mesurées sont étroitement liés au niveau de stress de la plante (Larcher 1995, Faria *et al.* 1998). En outre, des mesures indirectes *in situ* (teneur en eau) et à distance (spectre électromagnétique) permettent d'estimer ce stress hydrique.

3.2.4. INDICES DE STRESS HYDRIQUE

Hoff et Rambal (1999) ont travaillé sur les écosystèmes forestiers méditerranéens et leurs comportements face aux changements climatiques et notamment aux changements de régime pluviométrique. L'utilisation de modèles, qui simulent à la fois les composantes du bilan hydrique et l'état hydrique des végétaux, permet de quantifier le comportement de l'écosystème face à la sécheresse. Selon eux, les écosystèmes peuvent réagir différemment à l'allongement de la période de stress hydrique. Les pins par exemple réduisent très tôt leurs besoins en eau en bloquant leurs activités physiologiques alors que les chênes maintiennent des activités physiologiques jusqu'à des niveaux de sécheresse extrêmes. Toutefois, cette longue période de stress peut rendre les écosystèmes plus sensibles aux perturbations comme les incendies.

De nombreux indices de sécheresse, d'aridité ou de stress ont été développés, tels que le CMI *Crop Moisture Index* (Palmer, 1968), le CWSI *Crop Water Stress Index* (Jackson, 1981), le WDI *Water Deficit Index* (Moran *et al.*, 1994), le WSI *Water Stress Index* (Vidal *et al.*, 1994)... Ils prennent en compte pour la plupart des paramètres intrinsèques au végétal (teneur en eau, évapotranspiration réelle...) et des paramètres du milieu extérieur (humidité de l'air, température, évapotranspiration potentielle, précipitations...).

La principale limite de ces indices réside dans la nécessité de connaître les conditions météorologiques du milieu et/ou la physiologie des plantes pour les calculer.

D'autres méthodes sont indirectes pour déceler à distance le niveau de stress des végétaux. C'est le cas de la **télédétection** qui permet d'observer et d'analyser le spectre électromagnétique réfléchi ou émis par le couvert, et donc de cartographier le comportement de la végétation vis-à-vis du rayonnement.

4. LA TÉLÉDÉTECTION SPATIALE

4.1. LE SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

4.1.1. DÉFINITION

Le spectre électromagnétique se définit par une séquence ordonnée de fréquences ou de longueurs d'onde de la radiation électromagnétique (Figure 10).

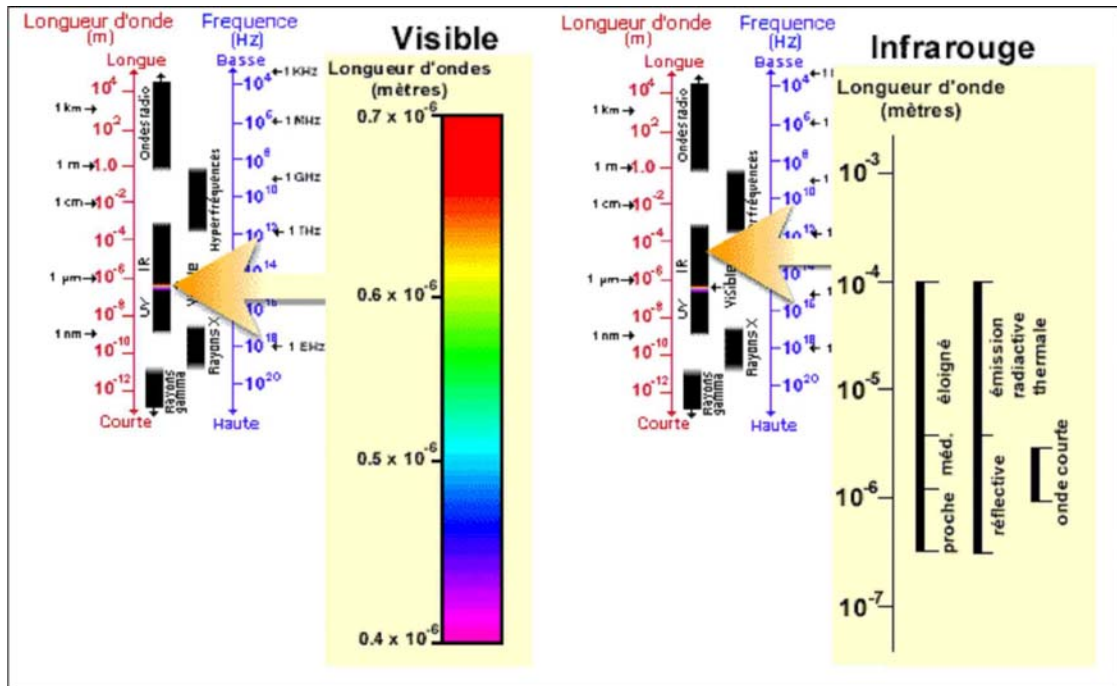


Figure 10. Spectre électromagnétique simplifié (d'après CCT, 2002)

La longueur d'onde λ est proportionnelle à la fréquence ν par la relation :

Équation 2.
$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \text{ avec } c \text{ la vitesse de la lumière.}$$

Le spectre électromagnétique correspond à la somme des absorptions de chaque molécule constitutive de l'élément mesuré. Dans le cas d'un végétal, il est d'ailleurs **impossible de retrouver par spectroscopie sa composition moléculaire précise**. Chaque plante est constituée de centaines de molécules différentes et il existe des interactions inter-moléculaires multiples difficiles à quantifier. Le spectre électromagnétique d'une feuille dépend de ces multiples interactions inter-moléculaires (Bertrand, 2002).

Quatre domaines spectraux sont distingués : les rayons et ultraviolets, le visible, l'infrarouge et les hyperfréquences.

Les rayons cosmiques, X, α , β , γ et les ultraviolets ont de grandes énergies et regroupent de très petites longueurs d'onde, dans tous les cas inférieures à 0,38 μm . Ce domaine spectral est peu utilisé pour l'observation du vivant.

Le spectre visible rassemble les longueurs d'onde perceptibles par l'œil humain. Aux termes des décisions adoptées par la CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) en 1963, le spectre visible s'étend du « violet » (0,4 μm) au « rouge » (0,76 μm). Il n'existe pas de limites déterminées au spectre visible mais seulement une efficacité lumineuse qui devient de plus en plus faible. En pratique, on convient d'adopter comme limites humaines 0,38 et 0,78 μm .

L'infrarouge est le domaine de prédilection pour observer certains paramètres de la végétation (évapotranspiration, biomasse...). Il couvre un large spectre de 0,78 à 14 μm . Il se décompose en quatre sous-domaines (Tableau 4).

Tableau 4. Domaines et longueurs d'onde associées (Girard et Girard, 1999)

Domaines de l'infrarouge	Longueurs d'onde
proche infrarouge (PIR)	0,78 à 1,2 μm
moyen infrarouge réflectif (MIRr)	1,2 à 2,2 μm
moyen infrarouge (MIR)	3 à 5 μm
infrarouge thermique (IRT)	8 à 14 μm

Enfin, les hyperfréquences regroupent les ondes allant du millimètre à plusieurs kilomètres. On retrouve les micro-ondes (télévision, radar), les ondes radios...

4.1.2. INTERCEPTION DU RAYONNEMENT

Grâce au rayonnement solaire, entre autre, la vie existe et se maintient sur notre planète. La loi de Planck donne la répartition suivant la longueur d'onde du flux émis F_{emi} d'un corps noir à la température T par la formule :

Équation 3.
$$F_{emi} = 2h \nu^3 c^{-2} \left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \right)^{-1},$$

avec h la constante de Planck,
 c la vitesse de la lumière,
 k la constante de Boltzmann,
 T = température en degrés Kelvin,
 ν la fréquence associée au photon, en cycles par seconde,
 λ = longueur d'onde associée au photon soit $\frac{c}{\nu}$

Deux lois découlent de la loi de Planck :

- la **loi de Stéfán** : le flux Φ (en W.m^{-2}) de rayonnement émis par un corps est proportionnel à la puissance quatrième de sa température absolue. La loi de Stéfán est la simple intégration de la loi de Planck sur l'ensemble des longueurs d'onde.

Équation 4. $\Phi = \varepsilon \sigma T^4$,

avec T la température du corps en Kelvin,
 ε l'émissivité du corps,
 σ la constante de Stefan-Boltzmann.

La formule de Stéfán est d'une importance capitale et rappelle que les flux incidents et partants ne sont fonction que de la température. On note la forte dépendance en T puisqu'il s'agit d'une puissance quatrième.

- la **loi de déplacement de Wien** donne la valeur de la longueur d'onde où le flux est maximal.

Équation 5. $\lambda_{\max} \cdot T = 2897$,

avec T la température du corps en Kelvin,
 $\lambda_{\max}$ la longueur d'onde d'émission maximale en micron.

Le maximum d'émission énergétique a lieu pour une longueur d'onde qui varie de façon inversement proportionnelle à la température. Par exemple, le maximum d'émission a lieu pour des longueurs d'ondes autour de $0,5 \mu\text{m}$ pour le soleil, autour de $10 \mu\text{m}$ pour le rayonnement terrestre.

On distingue trois différents flux de transferts d'énergie, selon leur origine solaire, atmosphérique ou terrestre. Le rayonnement terrestre suit la loi de Stefan. Le rayonnement solaire rencontre les masses gazeuses de l'atmosphère, composées de constituants à proportion fixe (azote, oxygène, argon, dioxyde de carbone) ou à proportion variable (eau et ozone). L'atténuation du rayonnement résulte de la superposition des phénomènes de diffusion (rayonnement renvoyé vers l'espace et dans toutes les directions) et d'absorption (de façon sélective selon les longueurs d'onde). Lorsque le rayonnement restant touche la surface du sol, une partie est réfléchi (notion d'albédo).

En 1837, le physicien français Claude Pouillet introduisit la **notion de constante solaire**. Il remarqua que la puissance du rayonnement solaire, mesurée sur le bord extérieur de l'atmosphère terrestre, est pratiquement invariable lorsque la Terre est à une distance moyenne du Soleil. Cette constante est égale à 1.350 W.m^{-2} et fluctue d'environ 0,2% tous les trente ans. L'intensité de l'énergie solaire réellement disponible à la surface de la Terre est inférieure à la constante solaire en raison de l'absorption et de la dispersion de cette énergie, due à l'interaction des photons avec l'atmosphère, les nuages ou encore les fumées produites par la pollution. En moyenne sur l'année et sur toute la Terre, le rayonnement solaire équivaut à 350 W.m^{-2} et **seulement 47% atteint la lithosphère**.

Dans un couvert végétal, la mesure des composantes du bilan radiatif est réalisée à l'aide d'un **pyranomètre** (mesures énergétiques en J.m^{-2}) et d'un **héliographe** (insolation) par plusieurs méthodes :

- Le rayonnement incident se compose du rayonnement solaire direct et du rayonnement atmosphérique diffus ; c'est l'énergie arrivant au sommet du couvert et disponible pour la plante. On le mesure par un capteur horizontal orienté vers le haut et au-dessus du couvert.
- Le rayonnement réfléchi (par le sol et la végétation) est mesuré par un capteur horizontal, orienté vers le bas, de 1 à 3 mètres au-dessus du couvert. Il est nécessaire de prendre en compte les hétérogénéités horizontales du couvert.
- Le rayonnement transmis au sol est difficile à mesurer avec précision à cause des variabilités spatio-temporelles fortes.

La plante n'utilise qu'une partie du rayonnement solaire, entre **0,4 et 3 μm** (du visible au MIR réfléchitif du spectre). En règle générale, l'énergie totale arrivant à la plante (45% visible - 55% IR) (Aussenac, 1995) va être :

- réfléchi vers l'atmosphère pour une faible part (2% visible - 15% IR) ;
- absorbée par le végétal (36% visible - 31% IR) ;
- transmise au sol (7% visible - 9% IR).

Seul 1% de l'énergie totale est utilisé pour la photosynthèse contre 45% pour la transpiration. Au maximum, un tiers des feuilles participe à la photosynthèse (deux tiers ombrés). La photosynthèse des plantes utilise les longueurs d'onde comprises entre **0,4 et 0,7 μm** ; cela correspond au rayonnement utile à la photosynthèse, noté **PAR** (*Photosynthetically Active Radiation*). Ce dernier peut être mesuré par un pyranomètre à filtre (J.m^{-2}) ou par des cellules photoélectriques (mesures quantiques en $\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$).

Cette énergie absorbée dépend de la surface foliaire, caractérisée par l'indice de surface foliaire **LAI** (*Leaf Area Index*) selon l'Équation 6.

Équation 6.
$$LAI = \frac{S_{\text{feuilles}}}{S_{\text{sol}}},$$

avec S_{feuilles} la surface de toutes les feuilles,

S_{sol} la surface qu'occupe au sol la plante (projection au sol de la couronne de l'arbre).

Le LAI est un bon indicateur de la biomasse foliaire d'une plante ainsi que de la densité d'un peuplement.

Pour observer le stress hydrique de la végétation, les domaines du visible et de l'infrarouge sont préférentiellement étudiés car porteurs d'informations : le visible et le PIR sont de bons indicateurs de l'état de biomasse active des couverts végétaux ; les données MIR sont fortement corrélées à l'état hydrique des plantes ; les données IRT permettent d'estimer l'évapotranspiration à partir des températures de surface des couverts. Plusieurs satellites et capteurs associés sont disponibles.

4.2. CAPTEURS DISPONIBLES

4.2.1. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

La plupart des satellites d'observation de la terre sont héliosynchrones¹⁵, avec une orbite quasi-polaire, à une altitude située entre 400 et 1500 km.

Il existe deux grands types de satellites :

- Les satellites actifs émettent des micro-ondes et mesurent la part des ondes rétrodiffusées. Ils fonctionnent par tous les temps (exemple : ERS, Radarsat).
- Les satellites passifs mesurent la part réfléchi du rayonnement solaire ainsi que l'émission de rayonnement propre de la cible (exemple : Spot, Landsat, Terra).

En télédétection satellitaire, on décrit les capteurs selon trois résolutions : spatiale, spectrale et temporelle.

La **résolution spatiale** est liée à la largeur du champ de visée du satellite et au nombre de cellules de détection qui composent la barrette du capteur. On distingue communément trois types de résolution spatiale : basse, haute et très haute (Tableau 5).

Tableau 5. Différentes résolutions spatiales

Libellé	Résolution	Exemple de capteur
Basse Résolution Spatiale (BRS)	> 100 m	AVHRR, MVIRI, MODIS, WiFS
Haute Résolution Spatiale (HRS)	5 à 100 m	ETM+, HRVIR, ASTER, LISS 3
Très Haute Résolution Spatiale (THRS)	< 5 m	IKONOS, QuickBird

La résolution spatiale des images est en constante évolution depuis 1972 avec le premier satellite LANDSAT 1, équipé du capteur MSS d'une résolution de 80 mètres. Aujourd'hui dans le domaine du visible (bandes *Bleu*, *Vert* et *Rouge*) on atteint des niveaux de précision inférieure au décimètre (8 m pour OrbView3, 4 m pour Ikonos-2, 2 m pour Quickbird-2). La précision satellitaire est voisine du mètre dans le cas d'une seule bande couvrant le visible (mode panchromatique). La principale limite réside encore dans le coût élevé des images (plus de 15 € le km²).

La **résolution** (ou richesse) **spectrale** est liée à la couverture spectrale du rayonnement électromagnétique et donc au nombre et à la largeur des bandes explorées par le capteur (Tableau 6).

Tableau 6. Différentes résolutions spectrales

Mode	Nombre de bandes	Largueur bande	Exemple de capteur
Multispectral	<10	50-200 nm	HRVIR (5 bandes), ETM+ (8 bandes)
Superspectral	10 à 40	10-20 nm	ASTER (14 bandes)
Hyperspectral	>100	<10 nm	LAC (256 bandes de 0,85 à 1,5 µm)

¹⁵ Le plan de l'orbite du satellite fait un angle constant avec la direction Terre-Soleil. Le satellite survole toujours aux mêmes heures un lieu donné.

La **résolution temporelle** dépend de la fréquence de couverture d'une même zone par le capteur du satellite. Certains systèmes ont la possibilité de se dépointer de leur trace par programmation (satellites Spot). La résolution temporelle est en général inversement proportionnelle à la résolution spatiale (Figure 11).

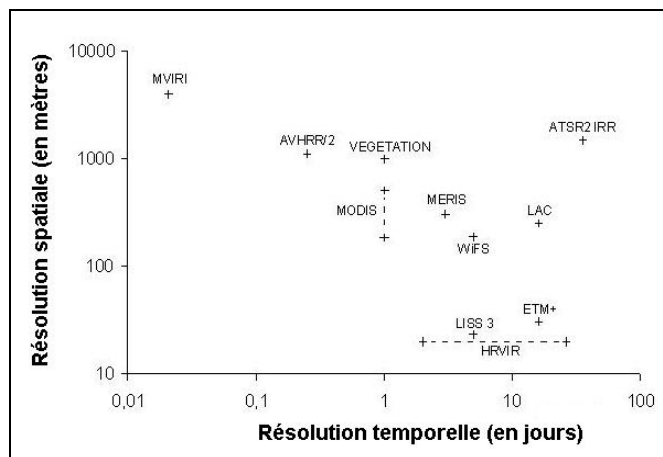


Figure 11. Résolutions temporelles et spatiales pour quelques capteurs satellitaires

4.2.2. LES NOUVEAUX SYSTÈMES

La tendance des récents capteurs va vers une amélioration de la résolution spatiale et une couverture large du spectre (du *Bleu* à l'*IRT*). Les résolutions temporelles sont toujours quotidiennes, hebdomadaires, bimensuelles ou mensuelles mais à de meilleures précisions spatiales. Les capteurs quotidiens possèdent plusieurs canaux dans le MIR et l'IRT et permettent ainsi d'observer les changements climatiques globaux, les phénomènes de désertification, de déforestation... Les capteurs bimensuels ou mensuels s'approchent de la THRS en mode panchromatique.

Autrefois spécialisés dans le *Vert*, *Rouge*, *PIR*, les nouveaux capteurs à basse résolution couvrent l'ensemble du spectre avec de bonnes précisions (exemple du capteur ASTER : visible et PIR à 15 m, MIR à 30 m, IRT à 90 m).

Les avancées futures vont vers des systèmes multi-capteurs de petits satellites, à THRS et en mode hyperspectral (exemple du projet Pléiades prévu en 2005). Le but est de réduire les coûts, d'améliorer les performances des capteurs et de développer de nouvelles applications.

4.3. LA TÉLÉDÉTECTION DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION

Les réflectances mesurées par satellites ne sont pas toujours directement exploitables. De multiples indices de végétation combinent plusieurs canaux et sont censés être plus explicites pour caractériser l'activité photosynthétique des plantes ou leur état hydrique. La littérature en regorge. Nous présentons en *annexe 3* une liste composée d'une trentaine d'indices et non exhaustive !

Le plus universel est l'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) défini par l'Équation 7.

Équation 7.
$$NDVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R}$$
 avec ρ_R : réflectance dans le rouge,
 ρ_{PIR} : réflectance dans le proche infrarouge.

La paternité de l'indice est multiple. Le NDVI a été proposé en 1974 par Rouse *et al.* mais le concept de différence normalisée fut présenté dès 1969 par Krieger *et al.* Les premières études de télédétection à grande échelle avec le NDVI ont été menées par Tucker (1980). Aujourd'hui, cet indice est utilisé par la plupart des chercheurs en télédétection et en particulier pour décrire l'état physiologique de la végétation (Hardy et Burgan, 1999).

Parmi la communauté scientifique d'observation de la Terre par télédétection, il est de bon aloi de développer soi-même son propre indice de végétation pour être reconnu ! Ainsi, la plupart des indices ont été développés pour des conditions de milieu et d'espèces particulières et sont souvent inadaptés à la plupart des situations.

Les études entreprises en télédétection pour tenter d'évaluer la teneur en eau des peuplements forestiers, afin d'estimer le risque d'incendie, sont assez récentes. Celles-ci ne se sont développées qu'à partir de la fin des années 1980. Grâce au capteur AVHRR des satellites NOAA notamment, l'appréciation du risque a pu être testée au pas de temps journalier et pour une résolution kilométrique. On a ainsi pu mettre en évidence la corrélation entre les néocanaux établis dans le visible et l'infrarouge et la physiologie des plantes (Burgan, 1996).

Deux démarches ont prévalu dans la tentative de détermination de la teneur en eau par télédétection :

- de manière indirecte, en postulant que la teneur en eau est corrélée à la teneur en chlorophylle, à la densité foliaire ou au degré de stress de la plante, matérialisé par la réduction de sa transpiration ;
- de manière directe, basée sur les variations du comportement spectral des végétaux dans le *Proche* et *Moyen infrarouge* selon leur état physiologique.

4.3.1. DÉTERMINATION INDIRECTE PAR TÉLÉDÉTECTION DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION

De nombreuses études font l'hypothèse réductrice que la teneur en chlorophylle des plantes est proportionnelle à leur teneur en eau (Ceccato *et al.*, 2001). Ainsi, pour des couverts de prairies, l'indice NDVI semble lié au LAI et au rythme chlorophyllien saisonnier du couvert observé et corrélativement, à la teneur en eau des plantes herbacées (Paltridge et Barber 1988). Forts de ces conclusions, plusieurs chercheurs ont tenté dès lors d'utiliser l'indice NDVI dans l'estimation indirecte de la teneur en eau d'un couvert sub-forestier ou forestier. Cependant, pour ces formations peu homogènes, aussi bien dans leur matériel végétal que dans leur organisation structurelle, le NDVI se révéla nettement moins probant que sur prairies.

Cette moindre efficacité pouvant être mise sur le compte de phénomènes perturbateurs (sol, atmosphère, visée...), certains ont alors essayé de s'affranchir des erreurs d'appréciation du capteur. Ils ont ainsi établi de nouveaux indices corrigés des facteurs physiques (sol, atmosphère) à partir des bandes *Bleu* et *Rouge* du capteur (Huete *et al.*, 1994 et 1997). D'autres ont prôné l'utilisation d'indices, corrigés ou non, intégrant la bande verte afin d'obtenir une lecture directe du niveau chlorophyllien des végétaux (Gitelson *et al.*, 1996). Mais, les validations de ces indices, non nécessairement créés pour estimer la teneur en eau, procèdent généralement d'un suivi à grande échelle ou de simulations en laboratoire. Il existe donc peu d'informations quant à leur efficacité à détecter réellement l'état hydrique de la végétation sur le terrain.

D'autres études encore furent basées sur le couplage d'indices de végétation à d'autres paramètres estimés par télédétection. Il s'agit par exemple du projet de recherche FIERS mené en France et en Italie de 1994 à 1998 (Sol, 2000). Dans cette étude, le NDVI est couplé aux données de température de l'air et de la surface du pixel. Ces températures sont calculées à partir des bandes de l'infrarouge thermique du capteur AVHRR. Sur un pas de temps hebdomadaire, le NDVI et la différence entre la température de l'air et celle du couvert permettent d'estimer la proportion d'évapotranspiration réelle et potentielle, elle-même apparemment reliée au stress hydrique de la végétation (Chuvienco *et al.*, 1999).

Cette voie de recherche a été développée par les expériences de Deshayes *et al.* (1998), obtenant de bonnes corrélations (r^2 de 70%) entre la teneur en eau des plantes et le rapport entre l'indice NDVI et la température de surface (**indice NDVI/TS**). La forte hétérogénéité des résultats, selon les sites, les années et les espèces testées, ne permet pas en théorie d'application directe de la méthode, d'autant que les résultats les plus probants furent obtenus à partir de moyennes hebdomadaires des indices (Deshayes *et al.* 1998, Chuvienco *et al.* 1999). Néanmoins, dans la gestion opérationnelle du risque d'incendie et à défaut d'autres moyens plus fiables, certains pays comme l'Espagne ont choisi de travailler avec le rapport NDVI/TS. Le Laboratoire de télédétection de l'Université de Valladolid, sur demande de la Direction Générale de la Conservation de la Nature, propose ainsi quotidiennement, de mars à octobre, des cartes de risques sur l'ensemble du territoire espagnol à partir de cet indice (Casanova *et al.* 1998, Latuv 2002). En revanche, en France le projet FIERS n'a pas débouché sur un dispositif opérationnel. On notera également que de manière sensiblement identique les italiens Martellacci *et al.* (1993) ont proposé l'utilisation d'un indice basé sur la combinaison du NDVI à des données estimées de réserve utile du sol. A l'issue de trois campagnes de tests effectuées entre 1988 et 1990 en Sardaigne, ils réaffirmaient ainsi la relation qui pouvait exister entre le NDVI et le stress hydrique des plantes. Toutefois celle-ci apparaissait fort instable, à l'image des résultats obtenus par le rapport NDVI/ TS.

De manière générale, toutes ces recherches ont démontré que les indices tels qu'ils étaient construits, à partir du rapport de bandes dans le visible et le proche infrarouge associés ou non à l'infrarouge thermique, permettent de détecter dans une certaine mesure l'eau tissulaire. Dans le même temps, il est clair que ceux-ci s'avéraient apparemment bruités par d'autres variables du végétal détectées par le capteur dans ces parties du spectre. Ces approches indirectes de l'état hydrique de la végétation sont discutées car pour partie fondées sur des hypothèses contestables (Ceccato *et al.* 2001, Verbesselt *et al.* 2002).

4.3.2. DÉTERMINATION DIRECTE PAR TÉLÉDÉTECTION DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION

Pour se libérer des perturbations liées à l'atmosphère, fortement actives dans les bandes du visible, et en se basant sur des travaux de laboratoire du début des années 1980, Hunt et Rock (1989) proposent une détermination directe de la teneur en eau des plantes à partir d'un rapport de bandes entre le *Proche* et le *Moyen infrarouge*. Le statut hydrique des végétaux semble en effet appréciable en utilisant ces sous domaines spectraux. Réalisée en laboratoire, cette expérience n'est pourtant pas immédiatement applicable à la détection du risque d'incendies. En effet, avant les années 1990, excepté le capteur *Thematic Mapper* (TM) de Landsat à faible répétitivité (bimensuelle) aucun capteur adapté ne disposait de bandes spectrales appropriées. A la suite de ces constatations, d'autres indices furent créés comme le générique *Normalized Difference Infrared Index* NDII ou d'autres plus spécifiquement basés sur les caractéristiques spectrales des capteurs.

Par exemple, depuis la mise en orbite de SPOT 4 en 1998, Ceccato a montré (Ceccato *et al.*, 2001, 2002a, 2002b) que le rapport des bandes du *Moyen* et *Proche infrarouge* était déterminant dans le suivi du stress hydrique des végétaux. Il a donc développé l'indice GVMI (*Global Vegetation Moisture Index*), intégrant les canaux PIR et MIR du capteur VEGETATION. Sur diverses formations végétales d'Afrique de l'Ouest, l'indice GVMI expliquerait jusqu'à 87% des valeurs d'un indice d'état hydrique de la végétation (indice *Equivalent Water Thickness* EWT dans cette étude).

5. CONCLUSION

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté le contexte du sujet de thèse, à savoir le risque de feux de forêt en France et le rôle de l'état hydrique de la végétation. Compte tenu de l'augmentation des surfaces à risque, la connaissance spatiale du stress hydrique des plantes est un enjeu scientifique d'actualité. La gestion opérationnelle du risque est basée sur le déploiement de moyens conséquents, avec une occupation constante du terrain par les équipes de sécurité civile pendant l'été pour anticiper tout départ de feu. Les aléas d'incendie (éclosion et propagation du feu) sont spatialisés quotidiennement par Météo-France à partir d'indices météorologiques (*IS*, *IH*, *IFM*...) calculés pour des zones moyennes de 700 km². L'évolution de tout incendie déclaré dépendra non seulement des conditions climatiques locales (température, vent...) mais aussi des propriétés du combustible et des écosystèmes forestiers en général. L'inflammabilité et la combustibilité d'un peuplement sont ainsi principalement liées à l'état hydrique de la végétation. Le stress hydrique d'une plante peut être évalué précisément en laboratoire par la mesure de flux, de température ou de pression. Mais c'est surtout l'observation à distance du rayonnement par satellite (la télédétection) qui devient désormais un outil de choix pour estimer l'état hydrique de la végétation.

Avant même de tester plusieurs produits satellitaires et indices de végétation, il nous paraît indispensable de revenir sur la première phase du travail qui consiste à recueillir sur le terrain les données représentatives de l'état hydrique de la végétation.

Jusqu'ici, l'utilisation des images satellitaires pour cartographier cet état hydrique s'est heurtée à un problème d'échelle en comparant des données de télédétection kilométriques à des mesures de terrain ponctuelles. En conséquence, dans le prochain chapitre de la thèse, nous proposons de valider les mesures satellitaires par des mesures multi-échelles de la teneur en eau des plantes. Nous allons donc tester plusieurs dispositifs, du décimètre au kilomètre, pour connaître les variabilités spatiales et temporelles de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne, afin d'identifier les protocoles d'échantillonnage adéquats pour estimer la teneur en eau réelle des plantes. Ces mesures permettront alors de valider les observations satellitaires à différentes échelles.

CHAPITRE 2

SUIVI DE TERRAIN DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION

« La nature est bien une somme et non pas un tout. »
Gilles Deleuze, philosophe (1925-)

La première étape du travail consiste à identifier les pratiques de terrain et les protocoles existants permettant d'estimer l'état hydrique de la végétation méditerranéenne et de suivre son évolution en période de risque d'incendie.

L'INRA et l'ONF ont défini dans les années 1990 un protocole commun concis (3 pages) présenté en *annexe 4* et repris par Desbois *et al.* (1997). L'objectif de ce protocole est de fournir aux agents techniques une base commune de travail permettant de mesurer rapidement l'état hydrique de la végétation en période de risque de feu. Les différents auteurs de ce travail nous ont indiqué au cours d'entretiens que ce protocole est basé principalement sur des observations de terrain (dires d'experts) ainsi que sur des tests effectués dans le massif des Maures à la fin des années 1980. Ce protocole reste toutefois un compromis entre la représentativité de la mesure et la disponibilité des techniciens forestiers chargés des prélèvements.

Concernant les autres protocoles, nous avons rencontré plusieurs équipes internationales qui suivent pendant l'été le stress hydrique de la végétation dans leurs pays (Espagne, Portugal, Grèce, Italie, Canada...). Leurs protocoles diffèrent principalement au niveau du nombre d'échantillons à prélever (de 1 à 10) et de la technique de laboratoire pour calculer la teneur en eau des feuilles.

Dans ce chapitre, nous tenterons de comprendre un peu mieux le comportement hydrique de la végétation méditerranéenne à travers plusieurs protocoles de terrain. L'objectif est de mesurer *in situ* l'état hydrique de la végétation, représentatif de la réalité, à différentes échelles spatio-temporelles. Cette « mesure-référence » sera ensuite comparée aux images de télédétection ; **sa précision doit donc être parfaitement identifiée.**

Remarque importante : par souci d'homogénéité et pour une meilleure compréhension, pour l'ensemble du chapitre, dans le texte et les illustrations, les heures mentionnées correspondent aux **heures locales des sites d'étude** (par exemple, 14h locale en été équivaut à 12h solaire).

1. PROTOCOLES SPÉCIFIQUES DE MESURE DE L'ÉTAT HYDRIQUE DES PLANTES

1.1. TECHNIQUES POUR MESURER L'ÉTAT HYDRIQUE D'UNE PLANTE

Depuis les années 30, les chercheurs « biologistes » ont développé des méthodes à la fois précises et faciles à mettre en œuvre pour déterminer la teneur en eau du combustible sur le terrain (Chatto, 1997). Certaines méthodes relèvent de techniques directes (thermiques, électriques, mécaniques, chimiques...), d'autres de techniques indirectes (météorologiques, télédétection).

Généralement les méthodes indirectes font intervenir des variables environnementales (température, humidité relative de l'air, exposition du site, proportion d'ombres, saison...) et ne sont donc valables que dans les conditions pour lesquelles les modèles ont été développés. En d'autres termes, ces modèles ne sont pas extrapolables et une simple différence d'espèce ou de zone géographique suffit à fausser les résultats.

Dans cette première partie nous présentons brièvement quelques méthodes directes d'estimation de l'état hydrique d'une plante.

1.1.1. MESURE PAR ÉTUVAGE

L'étuvage est la méthode la plus simple et la moins coûteuse, de loin la méthode universelle. Elle consiste à prélever une partie ou l'ensemble d'un végétal afin d'en extraire l'eau par séchage en étuve en condition de température stable. La différence des masses fraîches et sèches correspond à la masse d'eau contenue dans l'échantillon. La dessiccation dure généralement de 24 à 48 heures entre 60 et 90°C dans une étuve ventilée. On note que cette technique d'extraction thermique surestime légèrement la teneur en eau pour les végétaux contenant beaucoup de composés organiques volatiles, comme certains résineux.

Récemment, la société *Neosystems*® a développé une étuve portative alimentée par une batterie de voiture qui permet de peser et sécher sur le terrain les échantillons. Chaque mesure nécessite environ 20 minutes. Ce matériel est donc limité à un petit nombre de prélèvements.

1.1.2. MESURE DE PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES

On utilise la relation entre l'humidité et les propriétés électriques des végétaux, par l'intermédiaire d'appareils de mesure de capacité ou de résistance électrique. Ces derniers sont, d'après Hartley et Marchant (1988), les plus utilisés en foresterie et les plus précis. Les matériels disponibles sont multiples et variés : appareil diélectrique, de capacité, de perte de puissance, de capacité-admission, de Marconi, le Protimeter® (Buckley, 1988), le Granitec Meter®...

Néanmoins, leur principal inconvénient réside dans leur difficulté à mesurer l'ensemble de la gamme de l'état hydrique des feuilles des végétaux (de 10 à 70%¹⁶). Certains sont fiables pour les faibles valeurs, d'autres pour les fortes et en général tous ces matériels nécessitent un calibrage fin et des conditions environnantes d'utilisation précises (température, humidité de l'air).

1.1.3. MESURE MÉCANIQUE

Certains se sont penchés sur la relation entre la teneur en eau d'une feuille et sa résistance au pliage sans casser. Burrows (1991) obtint de bons résultats avec les aiguilles de pin et les feuilles d'eucalyptus. La méthode mériterait d'être testée sur d'autres espèces.

1.1.4. MESURE CHIMIQUE

Le *Speedy Moisture Tester* de la société anglaise Mastrad® permet de mesurer la teneur en eau des feuilles de façon précise. L'échantillon finement haché est introduit dans un cylindre pressurisé contenant du carbure de calcium. Celui-ci réagit avec l'eau de l'échantillon en produisant de l'acétylène gazeux. La pression produite est mesurée et reliée directement à la teneur en eau de l'échantillon. Cette méthode nécessite la préparation des échantillons et n'est malheureusement valable que pour de faibles humidités (<30%).

Une autre méthode emploie la distillation du xylène (hydrocarbure benzénique pour les initiés). Elle utilise le principe selon lequel les propriétés d'ébullition d'un liquide sont modifiées lorsque ce liquide est mélangé avec un autre liquide non miscible (Buck et Hugues, 1939). Elle implique donc la distillation d'un échantillon de fluide en présence d'un solvant (xylène) miscible dans l'eau. L'eau distillée du fluide est condensée et séparée dans un tube récepteur spécialement conçu ou dans un bac gradué pour indiquer directement le volume d'eau distillée. Cette méthode nécessite l'emploi de matériels complexes de laboratoire et n'est donc pas utilisable sur le terrain. Néanmoins, elle trouve son utilité pour les végétaux à forte teneur en composés organiques volatiles.

Enfin une dernière méthode dite de « titrage Karl Fischer » est considérée comme la plus précise pour mesurer la teneur en eau des plantes (Hartley et Marchant 1988, Isengard 1994). La méthode est basée sur une réaction chimique spécifique avec une indication électromagnétique pour mesurer la teneur en eau de fluides à base minérale. Le réactif de Karl Fischer est un mélange d'iode, d'anhydride sulfureux, de pyridine et de méthanol. Ces produits contiennent moins de 0,005% d'eau. La teneur en eau totale est obtenue après dissolution complète de cristaux d'iode. L'eau dans l'échantillon réagit à l'iode. Quand l'eau n'est plus libre de réagir à l'iode, un excès d'iode dépolarise les électrodes, signalant la fin du test. Malheureusement seuls des chimistes qualifiés peuvent utiliser cette méthode dont le coût limite son usage à certains domaines (industries pétrochimiques, agroalimentaires...).

¹⁶ Teneur en eau calculée par rapport à la masse fraîche du végétal

1.1.5. LA MÉTHODE RETENUE ET LES INDICES ASSOCIÉS

La mesure de l'état hydrique de la végétation doit être rapide, facile et précise. La méthode de « titrage Karl Fischer » est la plus précise mais très difficile à mettre en œuvre ; l'étuvage est donc devenu LA méthode standard. On notera surtout qu'aucun appareil portatif de terrain n'est réellement adapté ni suffisamment précis pour des teneurs en eau couvrant une large gamme, de 10 à 70% d'eau par rapport à la masse fraîche.

Dans le cadre de notre étude, notre choix s'est logiquement porté sur la méthode la plus simple et la moins onéreuse, l'étuvage. Les échantillons sont prélevés sur le terrain et stockés dans un contenant hermétique, à l'abri de la lumière. Après une première pesée (masse fraîche) l'échantillon est séché pendant 24 heures à 60°C. Une fois refroidi l'échantillon est pesé à nouveau (masse sèche) et le calcul de sa teneur en eau initiale se fait simplement.

Notons que la littérature est peu précise sur la durée d'étuvage. Nous avons donc procédé à des tests préliminaires pour connaître la durée d'étuvage nécessaire et suffisante pour extraire la quasi-totalité de l'eau de l'échantillon. L'expérience a été répétée 2 fois, pour 4 espèces (chêne vert, chêne kermès, arbousier et bruyère arborescente) et sur une durée de 87 heures. Pour des échantillons composés majoritairement de feuilles, plus de 99% de l'eau est extraite au bout de 16 heures d'étuvage seulement. Dans le cas de prélèvements composés de rameaux de petits diamètres (de 4 à 10 mm) un séchage en étuve de 48 heures est nécessaire pour extraire toute l'eau.

A partir de ces mesures de pesées, l'état hydrique de l'échantillon est représenté par un indice. Il existe plusieurs formules utilisant les masses sèche et fraîche (Tableau 7).

Tableau 7. Indices d'état hydrique à partir de pesées des échantillons

Sigle	Libellé	Formule	Intervalle
FMC ₁	Foliage Moisture Content	(Masse fraîche – Masse sèche) / Masse sèche	]0 ; +∞[
FMC ₂	Foliage Moisture Content	(Masse fraîche – Masse sèche) / Masse fraîche	]0 ; +1[
IS	Indice de Siccité	2 (Masse sèche / Masse fraîche) – 1	] -1 ; +1[

Dans la littérature l'indice le plus couramment rencontré est l'indice FMC₁ calculé par rapport à la masse sèche du végétal et recommandé par de nombreux auteurs : Van Wagner (1967), Blackmarr et Flanner (1968), Simard (1968), Viegas *et al.* (1992), Burgan (1996), Chuvieco *et al.* (1999, 2002 et 2003), Catchpole *et al.* (2001), Prasertsan et Krukanont (2003). Nous le choisissons en sachant qu'il est mathématiquement très simple de passer d'un indice à l'autre. Dans la suite nous le nommerons simplement **FMC**.

Un autre indice est parfois utilisé dans la littérature (Ceccato *et al.* 2001, Champagne *et al.* 2003, Datt 1999, Zarco-Tejada *et al.* 2003), l'*Equivalent Water Thickness* (EWT) donné par l'Équation 8.

$$\text{Équation 8.} \quad EWT = \frac{\text{Masse Fraîche} - \text{Masse Sèche}}{\text{Surface de l'échantillon}}$$

Unités : Masse Fraîche et Sèche en grammes et Surface en cm²

Il rapporte la teneur en eau de l'échantillon à sa surface et nécessite donc la mesure de la surface de l'ensemble des feuilles prélevées. Dans la réalité il est très difficile de mesurer l'indice EWT. Pour le chêne kermès par exemple, il faut près de 160 feuilles pour constituer un échantillon de 20 grammes seulement !

Nous avons calculé en laboratoire les indices FMC et EWT de feuilles de chêne vert et de chêne kermès au moyen d'une balance électronique (précision 10^{-4} gramme) et d'un planimètre¹⁷ laser (précision 10^{-3} cm²). De juin à octobre 2002, un total de 727 feuilles de chêne vert et de chêne kermès ont été pesées et scannées (Figure 12).

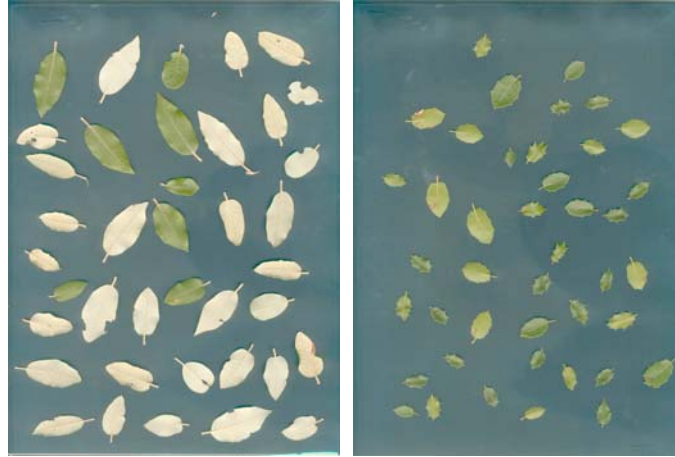


Figure 12. Exemple de feuilles de chêne vert (à gauche) et de chêne kermès (à droite)

Pour chaque espèce, nous obtenons une relation linéaire forte ($r^2 > 99\%$) entre la surface des feuilles et leur masse sèche, relation représentée par l'Équation 9 :

Équation 9. $Surface\ foliaire = a \cdot Masse\ Sèche + b$

A partir des deux équations précédentes, nous proposons donc une nouvelle formule de l'indice EWT en fonction des masses fraîches et sèches uniquement (Équation 10).

Équation 10.
$$EWT = \frac{Masse\ Fraîche - Masse\ Sèche}{a \cdot Masse\ Sèche + b}$$

Unités : Masse Fraîche et Sèche en grammes et EWT en g.cm⁻²

Pour le chêne vert : $a = 51,4002$ et $b = 9,8240$

Pour le chêne kermès : $a = 59,2889$ et $b = 1,9014$

En conséquence, pour les deux espèces étudiées, on peut calculer les indices FMC et EWT en s'affranchissant de la mesure contraignante de la surface des feuilles. Il serait intéressant d'étendre ce travail à d'autres espèces méditerranéennes sur d'autres années et d'identifier leurs coefficients a et b (et leur robustesse d'une année sur l'autre) dans l'Équation 10.

L'EWT d'un échantillon peut s'associer au *Leaf Area Index*¹⁸ (LAI) d'un couvert végétal et permet de calculer l'EWT non plus d'un échantillon mais du couvert tout entier (Équation 11).

Équation 11. $EWT_{couvert} = EWT_{échantillon} \times LAI$

L'EWT_{couvert} correspond alors à une lame d'eau contenue dans la canopée et représente donc l'état hydrique de l'ensemble des feuilles du couvert. Il faut toutefois connaître la variabilité spatiale du LAI, rajoutant un niveau supplémentaire d'incertitudes !

¹⁷ Instrument servant à mesurer les aires planes

¹⁸ L'indice de surface foliaire LAI est défini par le rapport entre la somme des surfaces des feuilles d'un arbre et la surface couverte au sol par cet arbre. Il est sans unité.

1.2. CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL VÉGÉTAL

Quoi de plus déstabilisant que de se retrouver devant un arbre ou un arbuste, sécateur à la main (Figure 13), et de se demander quelle partie du végétal prélever pour « être représentatif de la réalité » ? Excepté le prélèvement de l'individu entier (système racinaire compris) il apparaît impossible de connaître l'état hydrique exact d'une plante.



Figure 13. Prélèvement de feuilles sur un pied de chêne kermès

L'objectif de notre travail impose certaines contraintes pour suivre l'évolution temporelle du stress hydrique de la végétation pendant plusieurs mois.

L'état hydrique des parties subéreuses du végétal (tronc, branches) varie très peu et n'est donc pas un facteur variable dans le temps pour l'aléa d'incendie. Le lieu privilégié des processus de photosynthèse et de respiration d'une plante est bien entendu au niveau de la feuille. De même, la régulation du stress hydrique est gérée à son niveau par le mécanisme d'ouverture-fermeture des stomates. Il semble donc intéressant de suivre l'évolution de la teneur en eau des feuilles d'une plante. Sur un arbuste ou un arbre il apparaît aisé de prélever sans grande perturbation pour l'individu une faible quantité (environ 20 grammes) de feuilles fraîches et ceci à plusieurs reprises sur la saison afin de suivre l'évolution de son état hydrique.

Comme nous l'avons précisé dans le paragraphe précédent sur la technique d'étuvage, il est important de bénéficier d'échantillons homogènes et composés majoritairement de feuilles et de fins pédoncules. Les rameaux sont à exclure car leur FMC est beaucoup plus faible, la durée d'extraction de l'eau plus longue et il serait difficile de connaître avec précision la proportion rameaux/feuilles a priori variable de chaque prélèvement.

Tous les protocoles développés dans cette étude ont pour but premier de réduire les erreurs et incertitudes d'échantillonnage pour pouvoir reproduire dans le temps et l'espace chaque prélèvement avec la même rigueur.

Une plante est constituée de centaines de feuilles pour les plus petits arbustes à plusieurs millions pour les grands résineux. Les feuilles se différencient notamment par leur âge, leur localisation dans l'arbre, leur orientation. Quel type de feuillage doit-on prélever pour suivre le stress hydrique ?

1.2.1. L'ÂGE DU FEUILLAGE

Les espèces à feuillage persistant comme le chêne vert (*Quercus ilex*) disposent de deux années d'étage foliaire : la nouvelle pousse de l'année N et celle de l'année précédente N-1. Un protocole de terrain a consisté à prélever près de Montpellier pendant trois mois (du 14 juin au 18 septembre 2001) les deux types de feuilles sur 8 pieds distincts d'un taillis de chêne vert.

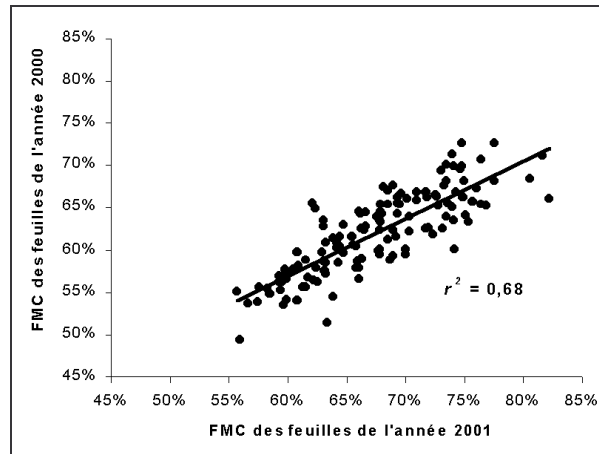


Figure 14. Comparaison de la teneur en eau des feuilles de deux âges différents (années 2000 et 2001) de chêne vert (n=131)

Pour la période estivale de l'été 2001, la Figure 14 montre la bonne corrélation du comportement hydrique des deux années de feuillage avec une teneur en eau plus forte de 8 pour cent en moyenne pour les feuilles les plus jeunes. Ces observations permettent de préciser le protocole de prélèvement. Le comportement des feuilles semble sensiblement identique en réponse à un manque d'eau mais le contenu en eau des feuilles diffère selon leur année de croissance. Nous pouvons conseiller pour la suite des protocoles de prélever **uniquement le feuillage de l'année**, à condition qu'il soit facilement identifiable.

1.2.2. LOCALISATION ET ORIENTATION DES FEUILLES

L'âge des feuilles joue un rôle sur l'hétérogénéité du prélèvement. La position spatiale des feuilles au sein de la couronne d'un arbre est aussi une source d'hétérogénéité. Nous utilisons un nouveau protocole pour identifier au sein d'un arbre les variations de l'état hydrique selon la localisation des feuilles et leur exposition.

1.2.2.1. FEUILLES DE LUMIÈRE OU FEUILLES D'OMBRE

Les feuilles dites de lumière (héliophiles) interceptent la lumière directe du soleil et sont situées sur la périphérie de la couronne des arbres. Elles forment la canopée vue d'avion. A l'inverse, les feuilles d'ombre (sciaphiles) sont situées à l'ombre des feuilles de lumière, à l'intérieur de la couronne (Figure 15).



Figure 15. Vue d'en dessous d'un chêne blanc (*Quercus pubescens*)

Les deux types de feuillage ne se différencient pas uniquement par leur exposition à la lumière directe mais également par leur composition chimique et leur rendement photosynthétique (Roussel, 1980). Enfin les feuilles de lumière sont plus exposées aux effets desséchants du vent.

Un protocole supplémentaire a été mis en place pendant l'été 2002 pour comparer ces deux types de feuilles :

Individus suivis : 4 pieds de chêne vert de taille différente (2,2 à 4,2 mètres)

Nombre d'échantillons : 4 x 20 grammes de feuilles de lumière, autant de feuilles d'ombre

Durée : 1 fois dans la journée à horaire différent selon le pied (11h, 13h, 15h et 17h)

La teneur en eau (FMC) est calculée en laboratoire après passage à l'étuve à 60°C pendant un minimum de 16 heures (Tableau 8).

Tableau 8. Différence de teneur en eau selon le type de feuillage

Type de feuillage	FMC moyen	Ecart-type
lumière	0,721	0,034
ombre	0,757	0,035

A la lecture du Tableau 8, les deux types de feuillage présentent un écart-type équivalent, représentatif de la variabilité spatiale de l'échantillonnage. En revanche la différence d'état hydrique est avérée avec une teneur en eau plus faible pour les feuilles de lumière (différence $\approx$ écart-type). On peut aussi avancer l'hypothèse que l'état hydrique de ces feuilles varie fortement en période de fort éclaircissement et de faible hygrométrie de l'air, de manière plus marquée que celui du feuillage d'ombre, plus protégé.

Ainsi, pour déterminer l'état hydrique d'un arbuste ou d'un arbre, nous pouvons recommander de **prélever exclusivement les feuilles de lumière**.

1.2.2.2. EXPOSITION DU FEUILLAGE

Dans le cadre de l'étude précédente, les quatre prélèvements de chaque type foliaire ont été effectués selon l'orientation des quatre points cardinaux N-S-O-E. Ne connaissant pas *a priori* les résultats, il nous semblait important de ne privilégier aucune orientation du prélèvement ni aucun type de feuillage.

Tableau 9. Différence de teneur en eau selon l'orientation du feuillage

Orientation du feuillage	FMC moyen	Ecart-type
Nord	0,747	0,045
Sud	0,744	0,032
Ouest	0,740	0,034
Est	0,726	0,041

Les résultats présentés dans le *Tableau 9* ne permettent pas d'identifier une orientation préférentielle à choisir lors d'un prélèvement. Même si les feuilles situées à l'Est du houppier sont un peu plus stressées, l'écart-type de la mesure ne permet pas d'affirmer une réelle différence (différence < écart-type). Aucune différence Nord-Sud n'est observée non plus.

1.2.3. SYNTHÈSE SUR LE FEUILLAGE À PRÉLEVER

Les différents protocoles mis en œuvre ont permis d'identifier les différences de comportement hydrique des feuilles selon leur âge et leur localisation dans le houppier.

Nous préconisons fortement de ne prélever que les feuilles de lumière et les pousses de l'année. Il est également important de minimiser la quantité de matériel ligneux sous forme de rameaux dans l'échantillon et de disposer d'une quantité suffisante de matériel (environ 20 grammes).

1.3. CARACTÉRISTIQUES TEMPORELLES DES PRÉLÈVEMENTS

Au cours des trois années de suivi de terrain qu'a couvert ce travail (étés 2001, 2002 et 2003) nous avons testé plusieurs protocoles à diverses échelles spatiales afin de calculer un état hydrique de terrain représentatif d'une zone limitée. Ces données de FMC seront par la suite reliées aux données de télédétection (*chapitres 4 et 5*).

La première source d'hétérogénéité des relevés vient de la variabilité temporelle du paramètre étudié. Certes la teneur en eau des feuilles varie au cours d'une année ou d'une saison mais nous allons également préciser la variation observée à l'échelle de la journée.

1.3.1. VARIATIONS JOURNALIÈRES

1.3.1.1. ÉTUDES EXISTANTES

Viegas *et al.* (1992), Desbois *et al.* (1997) et Chuvieco *et al.* (1999) préconisent aux opérateurs de réaliser les prélèvements aux heures les plus chaudes de la journée, à savoir entre 14 et 16h. Blackmar et Flanner (1968) observent de fortes variations horaires de teneur en eau pour six arbustes alors que d'autres comme Ustin *et al.* (1998) n'observent pas de différences significatives de la teneur en eau entre 10h et 17h. Que faut-il conclure ?

D'après la base de données française Prométhée qui recense l'ensemble des feux depuis 1973, la fréquence la plus forte d'éclosion d'un incendie se situe entre 14 et 16h (Figure 16).

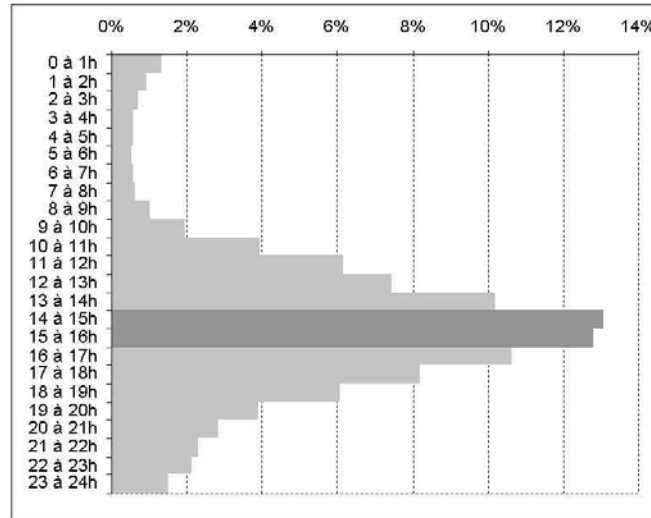


Figure 16. Répartition horaire des éclosions d'incendie (moyenne calculée sur 82.591 feux de 1973 à 2002). Source : BD Prométhée

En 1995, l'INRA a étudié la variation journalière de l'indice FMC (Moro, 1996) dans le massif des Maures. Les espèces suivies étaient l'arbousier et la bruyère arborescente. Les prélèvements ont été réalisés sur des pieds identifiés en deux stations, l'une composée d'un couvert dense, l'autre d'un couvert épars.

Pendant 30 heures consécutives¹⁹, les 13 et 14 juin 1995, l'opérateur a suivi l'évolution de l'état hydrique des feuilles (pousses de l'année), de la température de l'air (de 13,7 à 29,5°C) et de l'humidité de l'air (de 21 à 81%). La Figure 17 montre l'évolution horaire de l'indice FMC de l'arbousier pour les deux stations.

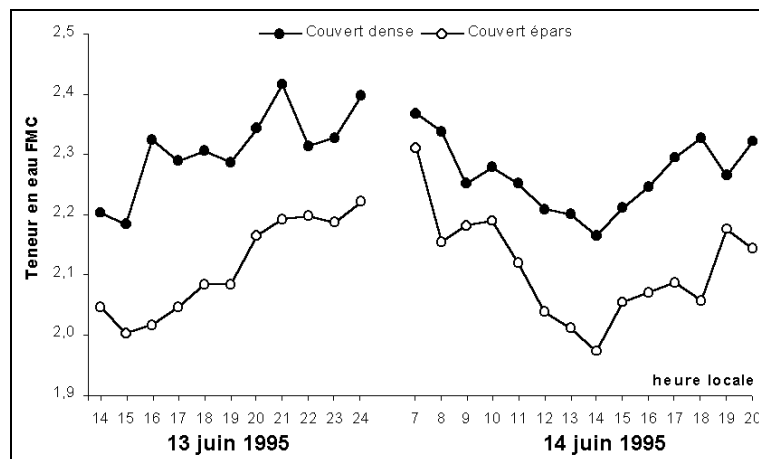


Figure 17. Évolution horaire de la teneur en eau des feuilles d'arbousier en condition de couverts denses et épars dans le massif des Maures (d'après Moro, 1996)

¹⁹ Interrompues de 7 heures pour le sommeil du personnel !

En condition de milieu ouvert, l'état de sécheresse est plus marqué. L'architecture de la végétation et la notion de strates et d'ouverture du milieu régit sensiblement le comportement hydrique des végétaux. Dans l'étude présentée, la teneur en eau minimale est observée entre 14 et 15 h, soit au midi solaire. Dans ce travail l'INRA montre également que les paramètres climatiques de l'air sont étroitement liés à l'indice FMC. Par exemple, dans le cas de l'arbousier en couvert dense, le coefficient de corrélation r entre l'indice FMC et la température de l'air est de $-0,80$ et de $+0,71$ entre l'indice FMC et l'humidité de l'air.

1.3.1.2. PROTOCOLE MIS EN OEUVRE

Nous avons également réalisé nos propres tests sur deux autres espèces, le chêne vert et le chêne kermès près de Montpellier.

Individus suivis : 8 pieds choisis par espèce, de taille différente

Nombre d'échantillons : 10 grammes de feuilles de lumière et de l'année par pied

Durée : 5 fois dans la journée à horaire différent pour chaque pied (10h30, 12h, 14h, 16h et 18h)

Les pieds ont été choisis dans un cercle de 20 mètres de rayon et dans 8 directions différentes. Chaque individu prélevé est identifié et ponctionné de 10 grammes de feuillage toutes les deux heures. Étant donné la forte variabilité constatée sur nos sites de l'indice FMC entre individus, nous avons choisi de mélanger l'ensemble des 80 grammes de feuilles avant de les répartir dans 5 boîtes (moyenne de 16 g par boîte).

Les résultats (moyennes et écart-types) sont présentés sur la Figure 18 suivante.

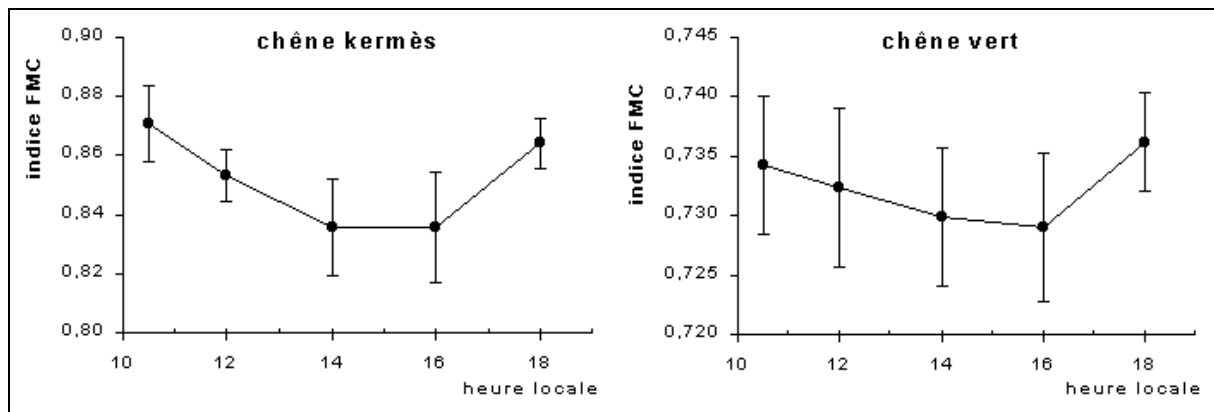


Figure 18. Évolution horaire de la teneur en eau (indice FMC) des feuilles de chêne kermès et de chêne vert (valeurs moyennes avec $\pm$ l'écart-type)

Pour les deux espèces suivies nous observons une courbe en U présentant un minimum entre 14 et 16h. A la fois l'espèce et les conditions du milieu (température, humidité, densité de végétation) influencent la variabilité journalière de l'état hydrique. Les observations faites sur ces quatre espèces ne sont pas généralisables mais seulement représentatives d'un état hydrique en un lieu et un instant donné. On peut toutefois penser que la FMC des plantes tout au long de la journée suit une courbe en U avec un minimum aux alentours de 15h.

1.3.1.3. LIEN AVEC LES PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES

Nous comparons les teneurs en eau mesurées pendant une journée aux paramètres météorologiques enregistrés par les stations Météo-France les moins éloignées, triangulant nos sites, à savoir les postes de Mauguio, Sète et Gignac (Figure 19).

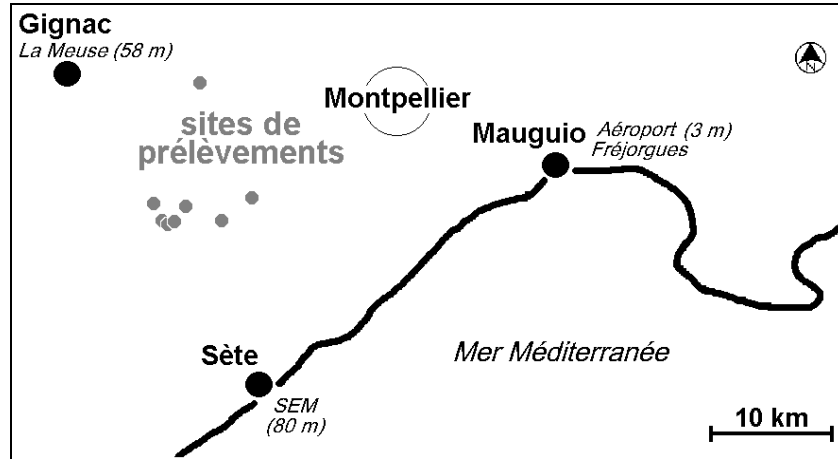


Figure 19. Carte des trois stations météorologiques et des sites de prélèvement

Nous disposons des données de température et d'humidité relative de l'air au pas de temps horaire pour ces trois stations. Ces données sont interpolées de manière linéaire en chaque site de prélèvement des feuilles. La Figure 20 représente un exemple de la variation horaire de ces deux paramètres.

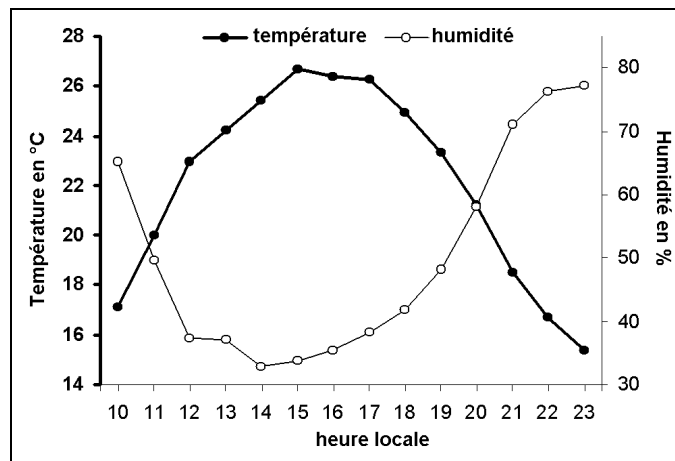


Figure 20. Variation horaire des paramètres de température et d'humidité de l'air pour le taillis de chêne vert près de Montpellier le 11 septembre 2002

Température et humidité de l'air sont inversement liées et leur opposition est maximale entre 14 et 17 heures.

L'évolution des paramètres météorologiques peut être comparée à la variation horaire de l'état hydrique des feuilles, mesurée sur le terrain (Figure 21).

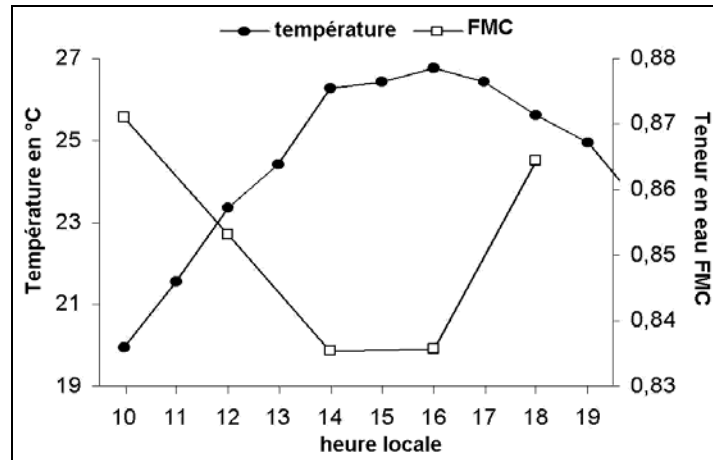


Figure 21. Variation horaire de l'indice FMC et de la température de l'air (garrigue de chêne kermès près de Montpellier le 28 août 2002)

La teneur en eau des feuilles est inversement corrélée à la température de l'air. Ainsi le jour des prélèvements, pour le site de chêne kermès, nous notons une température maximale à 16 h correspondant à un indice FMC minimal.

1.3.1.4. CONCLUSION

Les études menées au long d'un jour sur la teneur en eau de plusieurs espèces méditerranéennes montrent une variation journalière non négligeable (par rapport à la variation annuelle) de la teneur en eau des feuilles. Le stress hydrique maximal coïncide avec les heures les plus chaudes et sèches de la journée (température maximale, humidité minimale). Les préconisations initiales de prélever les échantillons à **15h ±1h** sont donc justifiées et conseillées pour l'ensemble des campagnes de terrain.

1.3.2. VARIATIONS SAISONNIÈRES

La répartition des incendies de forêt en zone méditerranéenne n'est pas homogène sur l'année mais suit la dynamique du stress hydrique des plantes (Van Wagner 1967, Papio 1988, Brown *et al.* 1989). Ainsi en moyenne sur les trente dernières années, 56% des surfaces brûlées le furent pendant les trois mois d'été (Figure 22).

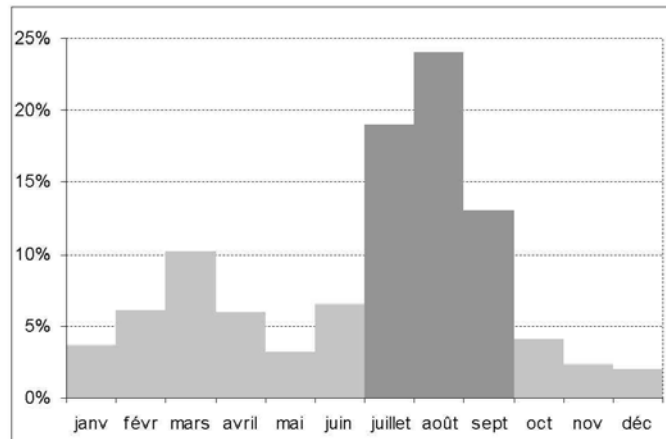


Figure 22. Répartition mensuelle des surfaces brûlées (moyenne calculée sur 82.591 feux de 1973 à 2002). Source : BD Prométhée

Pendant les trois années de l'étude (2001 à 2003), nous avons suivi sur deux sites distincts l'évolution de l'état hydrique de plusieurs espèces méditerranéennes. La dimension spatiale des prélèvements (plusieurs protocoles à différentes échelles) sera détaillée dans le *paragraphe 1.4* de ce chapitre.

Le *Tableau 10* résume le conséquent travail de terrain effectué pendant les trois étés sur les deux sites d'étude.

Tableau 10. Travail de terrain réalisé pour le suivi de l'indice FMC

Sites	Critères	Été 2001	Été 2002	Été 2003
Causse d'Aumelas Montpellier	Espèces suivies	Chêne kermès Chêne vert	Chêne kermès Chêne vert Chêne pubescent	Chêne kermès Chêne vert
	Nombre de sites de prélèvement	4	3	2
	Nombre d'échantillons prélevés par site	8	5	3
	Nombre d'échantillons prélevés	799	155	90
Massif des Maures	Espèces suivies	Arbousier commun Bruyère arborescente		
	Nombre de sites de prélèvement	3	2	6
	Nombre d'échantillons prélevés par site	7	5	3
	Nombre total d'échantillons prélevés	1.064	380	321

Près de 3.000 échantillons ont été prélevés, pesés et séchés pour le suivi temporel de l'état hydrique de la végétation. En complément de ces prélèvements s'ajoutent d'autres échantillons concernant des protocoles plus spécifiques : suivi horaire de l'état hydrique sur une journée, échantillonnage spatial dans le houppier, récolte du matériel végétal nécessaire aux mesures de spectroradiométrie de laboratoire...

Certains sites ont été suivis pendant les trois étés. Les figures suivantes (Figure 23 et Figure 24) représentent un exemple d'évolution temporelle moyenne de la FMC pour deux espèces.

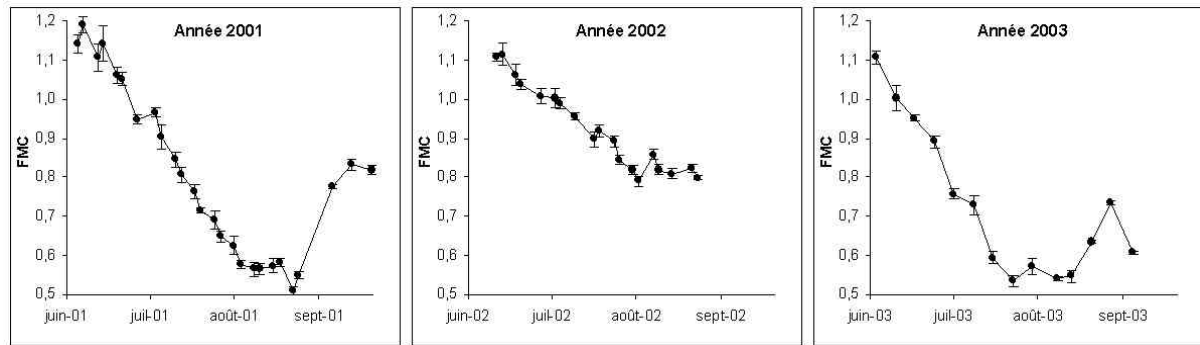


Figure 23. Évolution temporelle de l'état hydrique de la bruyère arborescente. Exemple du site A dans le massif des Maures (valeurs moyennes avec +/- l'écart-type)

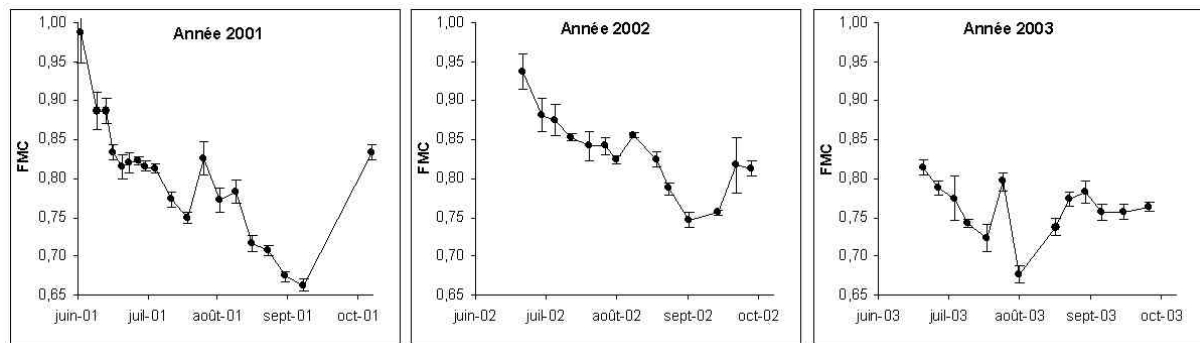


Figure 24. Évolution temporelle de l'état hydrique du chêne kermès sur le Causse d'Aumelas près de Montpellier (valeurs moyennes avec +/- l'écart-type)

Les étés 2001 et 2003 ont connu une sécheresse marquée alors que l'été 2002 fut humide avec un faible stress hydrique.

Conjointement aux données de terrain, plusieurs paramètres météorologiques furent enregistrés dans les stations météorologiques les plus proches des sites de prélèvement. Les données couvrent en deçà de la période à risque d'incendie (du 1^{er} juin au 30 octobre) de chaque année. On relève :

- les moyennes quotidiennes :
 - o de la température de l'air sous abri,
 - o de la durée pendant laquelle l'humidité relative de l'air est inférieure à 40%,
 - o du cumul journalier des précipitations,
 - o de l'évapotranspiration potentielle (ETP) Penman ;
- les données horaires :
 - o de la température sous abri à 14h,
 - o de l'humidité relative à 14h,
 - o du vent moyen mesuré à 10 mètres à 14h,
 - o du rayonnement global (pas de temps horaire),
 - o de la visibilité horizontale (pas de temps horaire ou tri-horaire).

L'ensemble de ces données permet de relier les évolutions d'état hydrique aux conditions environnantes, comme par exemple le calcul du délai moyen d'hydratation de la végétation après une pluie (présenté en quatrième partie de ce chapitre).

De manière générale, l'évolution estivale du stress hydrique des plantes suit le régime des précipitations avec des amplitudes différentes selon les années et les espèces suivies. Les graphiques suivants (Figure 25) représentent l'évolution conjointe de l'indice FMC et le régime des précipitations pour quelques espèces et sites.

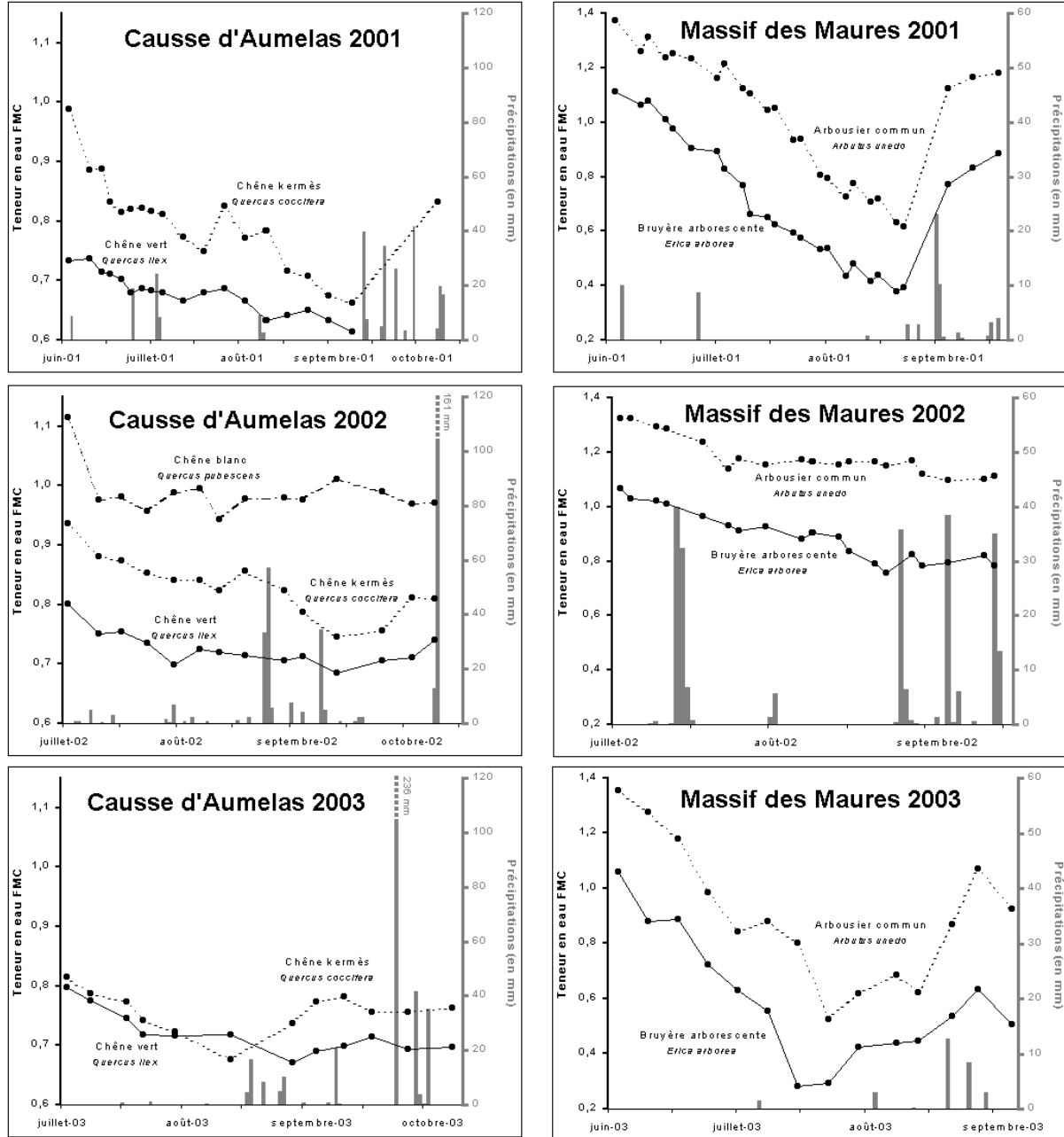


Figure 25. Précipitations et variation de l'indice FMC des étés 2001 à 2003 sur les sites du Causse d'Aumelas et du massif des Maures

Un autre élément permettant de décrire le stress hydrique de la végétation est la comparaison inter-annuelle de l'état hydrique des feuilles, pour un même site. Parmi la vingtaine d'espèces étudiées (propres au réseau de surveillance de l'ONF, aux sites de l'INRA et du CEMAGREF), prenons l'exemple du chêne kermès et de la bruyère arborescente (Tableau 11).

Tableau 11. États hydriques (FMC) extrêmes observés sur le terrain en plusieurs sites pour le chêne kermès et la bruyère arborescente

Espèces	Département	Code site	FMC min.	FMC max.*	Période d'étude
Chêne kermès	34	CEMAGREF Site 1	0,663	1,048	2001-2003
		ONF Site 2	0,605	1,054	1996-2003
	11	ONF Site 1	0,528	1,396	
	13	ONF Site 2	0,407	1,285	
Bruyère arborescente	2A	ONF Site 2	0,236	0,879	1996-2003
	83	ONF Site 1	0,297	1,075	
		INRA Maures PK38	0,475	1,235	1989-2003
		INRA Maures Bœuf	0,281	1,113	2001-2003
	66	ONF Site 1	0,403	0,962	1996-2003

* maximum des mesures de juin à octobre

Pour ces deux espèces, nous observons des valeurs de FMC différentes selon le site de prélèvement. Comme nous disposons d'un historique suffisamment représentatif, comprenant notamment des années extrêmes, il semble intéressant de représenter l'état hydrique de la végétation par rapport à son amplitude maximale, ceci pour toutes les espèces étudiées. Il est certain que l'amplitude de variation de l'état hydrique du chêne vert par exemple est minime comparée à celle du ciste cotonneux qui peut sécher complètement. Et pourtant, les deux espèces subissent un stress hydrique au même titre.

Ainsi, une idée originale serait d'utiliser des **classes de stress hydrique** pour décrire la teneur en eau calculée à un instant donné. Il faut donc travailler avec des données qualitatives (classes de FMC par rapport à l'amplitude de FMC observée historiquement) plutôt que quantitatives. Cette approche n'a pas encore été utilisée par les organismes chargés de la prévention du risque (l'Office National des Forêts, la Délégation pour la Protection de la Forêt Méditerranéenne ou la Sécurité Civile). Dans la mesure où un important réseau d'échantillonnage existe dans le sud-est de la France depuis 1996 (et même 1989 pour certains sites), il nous semble important de valoriser les données d'archives pour mieux décrire le stress hydrique des plantes et *a fortiori* le risque d'incendie.

1.4. CARACTÉRISTIQUES SPATIALES DES PRÉLÈVEMENTS

1.4.1. ÉTAT DE L'ART

Les références en la matière sont assez limitées. Que ce soit en Espagne (Chuvieco *et al.*, 1999), au Portugal (Viegas *et al.*, 2002) ou en France (protocole commun INRA-ONF, *annexe 4*), la détermination de l'indice FMC de la végétation s'effectue toujours de la même manière (Équation 12).

Équation 12.
$$\overline{FMC} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^n FMC_i \text{ avec } n \leq 10$$

L'état hydrique calculé en un site correspond toujours à l'indice FMC moyen des i échantillons (1 à 10) prélevés aléatoirement sur une petite surface (< 5.000 m²).

Dans notre étude la mise en place de protocoles d'échantillonnage dans l'espace doit permettre de répondre à deux objectifs :

- Mesurer et quantifier la variabilité spatiale de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne, pour plusieurs espèces et sur plusieurs sites ;
- Calculer une humidité représentative d'une surface dans le but de la relier aux données de télédétection à différentes résolutions (de 10 à 1000 mètres). Nous utiliserons donc plusieurs protocoles imbriqués entre-eux à ces résolutions.

1.4.2. CHOIX DES SITES : GARRIGUE ET MAQUIS

Le choix des sites de mesure est important car il préfigure la représentativité des résultats et leur généralisation ou non aux autres zones méditerranéennes. Chaque type de végétation méditerranéenne est liée à un bioclimat²⁰ ainsi qu'aux conditions géographiques des sites (substrat, altitude, exposition...). Ces contraintes climatiques et édaphiques²¹ ont un rôle d'étagement ou de zonage de la végétation.

En zone méditerranéenne française, parmi les formations majoritairement arbustives, on distinguera la garrigue du maquis. Nous avons donc choisi deux sites :

- Une garrigue sur le causse d'Aumelas près de Montpellier (Hérault)²² suivie par le CEMAGREF de Montpellier ;
- Un maquis dans le massif des Maures près de Toulon (Var)²³ suivi par l'INRA, à travers la station expérimentale du domaine du Ruscas.

²⁰ Ensemble des conditions climatiques dont l'influence est considérée comme fondamentale sur le comportement des organismes vivants

²¹ Qui concernent le sol et les relations d'ordre écologique avec le sol

²² Coordonnées géographiques approchées : 43°33'Nord et 3°39'Est

²³ Coordonnées géographiques approchées : 43°13'Nord et 6°22'Est

1.4.2.1. CAUSSE D'AUMELAS DANS L'HÉRAULT

Les stations de mesure se situent sur le Causse d'Aumelas en zones de plateaux karstiques (altitude de 130 à 300 mètres selon les sites) sous un bioclimat mésoméditerranéen. Les différents sites de prélèvement sont distants de moins de 15 kilomètres (*Figure 26*).

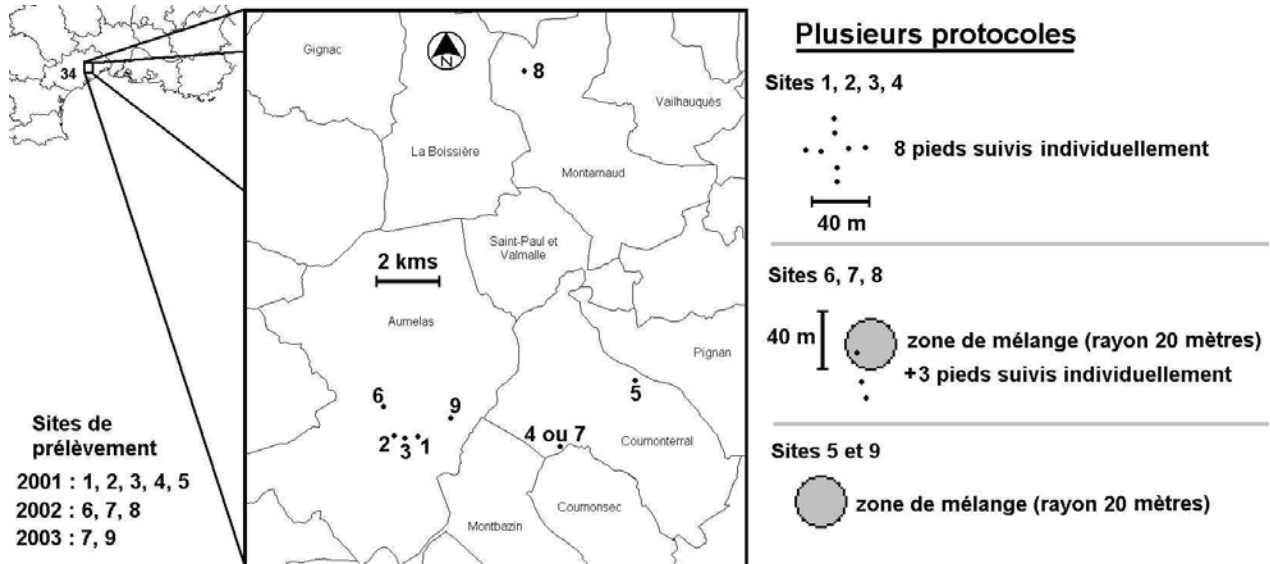


Figure 26. Localisation des sites de prélèvements dans l'Hérault

La végétation représentée est composée d'une garrigue ouverte de chêne kermès (sites 1, 2, 3, 5, 6 et 9), d'un taillis de chêne vert (site 4 ou 7) (*Figure 27*) et d'une futaie de chêne pubescent (site 8). Dans le but de mesurer à la fois la variabilité de l'état hydrique entre individus et entre bouquets²⁴, plusieurs protocoles (et échelles) d'échantillonnage ont été choisis (*Figure 26*).



Figure 27. Garrigue de chêne kermès (à gauche) et taillis de chêne vert (à droite)

²⁴ Groupe d'individus dans une surface définie (par exemple 200 m²)

1.4.2.2. MASSIF DES MAURES DANS LE VAR

Le massif des Maures s'étend sur 900 km² et est régulièrement sujet à de catastrophiques incendies de forêt (59 km² en 1979, 58 km² en 1982, 67 km² en 1986, 43 km² en 1989, 96 km² en 1990, 160 km² en 2003). L'INRA d'Avignon a mis en place, dès 1968, au sein même du massif une station expérimentale (domaine du Ruscas) pour comprendre le rôle de la végétation méditerranéenne lors d'un incendie. Le site héberge un poste de mesure des paramètres d'inflammabilité de la végétation pour préciser le risque d'éclosion du feu, ainsi qu'un four pour analyser les processus de décomposition thermique de la matière végétale. Après un incendie, l'équipe étudie aussi la régénération des essences et sélectionne les plantes dans le but ultime de prévenir le risque d'incendie.

Dans le cadre de notre étude, les différents sites de prélèvement sont localisés au sommet du Bœuf et sont assez proches les uns des autres (Figure 28).

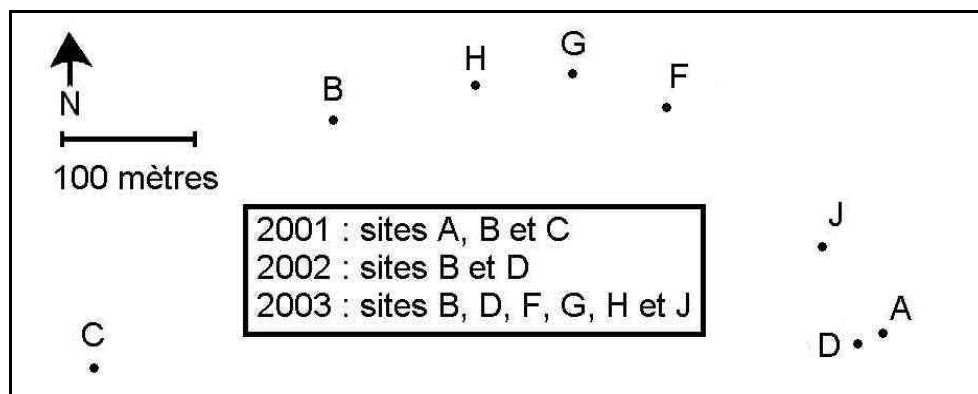


Figure 28. Localisation des huit sites de prélèvements dans le massif des Maures

Les sites se situent en zones granitiques de basse altitude (600 à 650 mètres) sous un bioclimat supraméditerranéen. La végétation est composée d'un maquis d'arbousier et de bruyère arborescente (Figure 29) exposés en versants Sud et Ouest (pente jusqu'à 20°). Comme pour le causse d'Aumelas, des pieds ont été suivis individuellement, ainsi que quelques zones de mélange (rayon de 20 m), pendant trois étés. L'arbousier est prélevé sur 8 sites (A, B, C, D, F, G, H, J) et la bruyère arborescente sur 4 sites (A, B, C, D).



Figure 29. Maquis d'arbousier (à gauche) et de bruyère arborescente (à droite)

1.4.3. SUIVI MULTI-ÉCHELLE

La notion de multi-échelle doit permettre d'étudier la structure spatiale de la variable mesurée (teneur en eau des feuilles FMC).

1.4.3.1. *VARIATION D'UN INDIVIDU À L'AUTRE*

Cette démarche consiste à suivre les évolutions de l'état hydrique de plusieurs individus sur une saison (de juin à octobre). Pour chaque espèce nous identifions plusieurs pieds de taille différente et éloignés de 10 à 100 mètres.

1.4.3.2. *VARIATION D'UN BOUQUET À L'AUTRE*

Ce protocole consiste à suivre l'évolution de l'état hydrique moyen d'un bouquet pendant plusieurs étés. Les sites sont distants de 75 à 750 mètres.

Dans cette *première partie du chapitre 2*, nous venons de préciser les protocoles spécifiques à la mesure de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne, avec tout ce que cela comporte d'imprécision. Avant même d'étudier en détail les variabilités spatiales (*partie 3*) et temporelles (*partie 4*) de la teneur en eau des plantes, il est intéressant de reprendre la méthode opérationnelle de risque météorologique, énoncée précédemment (*partie 2 du chapitre 1*), pour comparer les indices fournis par Météo-France au contenu en eau de la végétation.

2. INDICES DE RISQUE MÉTÉOROLOGIQUE ET TENEUR EN EAU DE LA VÉGÉTATION

Il nous paraît important de comparer les indices de risque météorologique calculés par Météo-France (système opérationnel de prévention du risque) aux mesures d'état hydrique de la végétation. D'après les services de Météo-France, ces indices de risque, calculés à partir de paramètres climatiques, n'ont jamais été reliés aux paramètres biologiques de la végétation, comme l'état hydrique. Ce travail est en effet colossal puisqu'il faudrait mesurer, à proximité d'une station automatique Météo-France, la teneur en eau de la végétation, pendant plusieurs années et pour plusieurs espèces afin de comparer ces paramètres biologiques aux indices météorologiques.

Selon nous, la démarche vaut la peine d'être tentée, ce que nous essayons de faire à notre échelle pour trois sites et trois espèces.

Sur le site du Causse d'Aumelas près de Montpellier, nous avons suivi l'évolution de la teneur en eau des feuilles de deux espèces (chêne vert et chêne kermès) pendant deux étés consécutifs (2001 et 2002). Pour calculer les indices de risque, nous avons besoin de données météorologiques journalières et horaires au niveau de chaque site de prélèvement. Aucun poste Météo-France ne se trouvant proche des sites de mesure, nous choisissons donc les trois postes les moins éloignés triangulant nos sites, à savoir les postes de Mauguio, Sète et Gignac du département de l'Hérault (*Figure 19*). Nous faisons l'**hypothèse de la linéarité (stationnarité) des variables météorologiques** entre les trois stations (température, humidité relative de l'air, vitesse du vent, précipitations). En effet, en l'absence de mesure locale précise (par un pluviomètre par exemple), il semble plus logique de choisir comme hypothèse la linéarité des variables en préférence à d'autres fonctions de répartition (exponentielle, puissance...).

Nous résolvons le système de trois équations à trois inconnues par la méthode matricielle de Cramer (interpolation par triangulation). Nous obtenons alors les valeurs des paramètres météorologiques en chaque site de mesure.

L'analyse des données porte sur un total de 138 mesures de FMC à comparer à sept indices météorologiques (*ICL, IS, IH, IPI, ICD, IFM et IJS*). Quels que soient les indices, le coefficient de détermination calculé s'avère très faible ($r^2 < 15\%$) et aucune relation n'apparaît.

Les tests ont été renouvelés en considérant un décalage temporel (2, 5, 10 jours auparavant) entre la teneur en eau mesurée et le paramètre météo associé. Malheureusement, les corrélations restent toujours faibles ($r^2 < 20\%$).

Nous ne pouvons conclure qu'une seule chose : dans les conditions restrictives d'expérience (*deux espèces : chêne vert et chêne kermès ; deux périodes : étés 2001 et 2002 ; un site : Causse d'Aumelas près de Montpellier*) et sous l'hypothèse de stationnarité des variables météorologiques, nous n'avons pas pu mettre en évidence de relations entre l'état hydrique des feuilles des végétaux et les indices de risque météorologique interpolés des trois stations climatiques les plus proches des sites de mesure.

Conscients du résultat nous souhaitons compléter notre étude par le choix de conditions d'expérience meilleures, à savoir un site de prélèvement le plus proche possible d'une station Météo-France automatique. Le seul site méditerranéen connu est celui de la station de l'INRA du Ruscas dans le massif des Maures. Nous avons sélectionné les mesures de teneur en eau (indice FMC) et d'inflammabilité (indice du délai moyen d'inflammation MDI) de la bruyère arborescente pendant six étés (1997 à 2002). Les prélèvements végétaux ont toujours été effectués par l'INRA sur le même site, à moins de 300 mètres de la station automatique de Météo-France. Après comparaison (Tableau 12), les meilleures corrélations sont obtenues avec l'indice *IS* (Indice de Sécheresse) tant pour l'indice FMC que MDI.

Tableau 12. Corrélation (r^2) entre 2 mesures biologiques et 7 indices de risque météorologique

n=219	ICL	IS	IH	IPi	ICD	IFM	IJS
FMC	0,02	0,74	0,41	0,07	0,53	0,20	0,22
MDI	0,04	0,71	0,51	0,08	0,60	0,27	0,29

La Figure 30 détaille la relation entre les indices FMC et *IS* pour 219 valeurs.

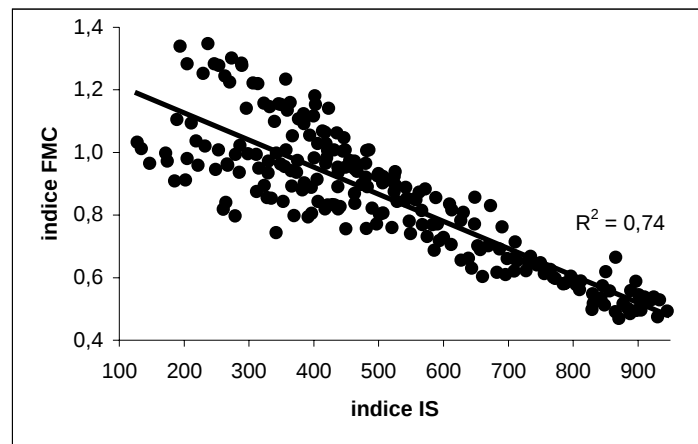


Figure 30. Comparaison des indices FMC et *IS* de la bruyère arborescente suivie de 1997 à 2002 au domaine du Ruscas dans le massif des Maures

Pour les faibles valeurs de l'indice *IS* (< 400), le modèle linéaire est moins bien ajusté (plus grande dispersion des points). Mais cela n'est pas gênant puisque le risque d'incendie est surtout important aux fortes valeurs d'*IS*, avec un risque exceptionnel au-delà de 700 selon Météo-France.

Dans le cas de précipitations inférieures ou égales à 2,8 mm, l'indice *IS* se calcule par l'Équation 13.

$$\text{Équation 13.} \quad IS = IS_v + \frac{0,36(T + 2,8) + M}{2}$$

avec IS_v l'indice *IS* de la veille (300 par défaut pour le premier jour de calcul) ;

T la température de l'air sous abri en degré Celsius à 12 heures locales ;

M un coefficient de correction fonction du mois de l'année (-1,6 de novembre à mars, 0,9 en avril, 3,8 en mai, 5,8 en juin, 6,4 en juillet, 5 en août, 2,4 en septembre et 0,4 en octobre).

Dans le cas de précipitations supérieures à 2,8 mm, l'indice IS se calcule par l'Équation 14.

Équation 14.
$$IS = 400 \ln \frac{800}{800 e^{\frac{IS_v}{400}} + 3,26771P - 5} + \frac{0,36(T + 2,8) + M}{2}$$

avec IS_v , l'indice IS de la veille (300 par défaut pour le premier jour de calcul) ;

P la hauteur de pluies en mm cumulée sur 24 heures ;

T la température de l'air sous abri en degré Celsius à 12 heures locales ;

M un coefficient de correction fonction du mois de l'année (-1,6 de novembre à mars, 0,9 en avril, 3,8 en mai, 5,8 en juin, 6,4 en juillet, 5 en août, 2,4 en septembre et 0,4 en octobre).

Ces deux équations ne sont applicables que pour une température de l'air T supérieure ou égale à -2,8°C. Cette limite n'est bien sûr jamais atteinte pendant les mois d'été sur le pourtour méditerranéen.

D'autre part, si l'on étudie la relation entre l'état hydrique (indice FMC) et l'inflammabilité (indice MDI) de la bruyère pour la période 1997-2002, on obtient une forte corrélation ($r^2 = 87\%$). L'INRA a ainsi pu mettre en équation la relation liant l'inflammabilité à la teneur en eau de la bruyère arborescente ; chaque été, l'INRA calcule un modèle non linéaire admettant d'excellentes corrélations (Moro, 2001, 2002 et 2003).

Exemple : pour l'été 2001, on a un r^2 de 96% pour le modèle défini par l'équation : $MDI = 20,4673e^{-1,8519IS}$ avec IS l'indice de sécheresse (voir formule au Tableau 7).

Parmi les indices de risque météorologique proposés par Météo-France pour la prévention du risque d'incendie, l'indice IS (Indice de Sécheresse) semble le meilleur pour décrire l'état hydrique de la végétation. Cet indice est corrélé à l'indice FMC de teneur en eau de la végétation dans la mesure où les deux indices sont calculés en un même lieu (r^2 de 74% pour le site des Maures de 1997 à 2002). Dès lors que l'humidité de la végétation est mesurée loin d'une station météorologique, les corrélations diminuent ($r^2 < 20\%$). Il est donc important de préciser avant tout la variabilité spatiale de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne.

3. COMPORTEMENT SPATIAL DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION MÉDITERRANÉENNE

3.1. CONTEXTE

Afin de comparer l'état hydrique de la végétation aux images satellitaires, il est important d'identifier sur le terrain la variabilité spatiale du stress hydrique. Il est clair que le comportement des plantes dépend essentiellement de la variabilité spatiale intrinsèque des sols et de leur réserve en eau.

Dans cette partie nous proposons un protocole de terrain permettant d'identifier, pour des conditions particulières (sites et espèces), l'échelle de structure spatiale de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne. Cette approche est primordiale avant de traiter les images satellitaires à diverses résolutions.

Plusieurs relevés de terrain ont été réalisés pendant les trois mois d'été des années 2001, 2002 et 2003 sur les deux sites d'étude (Hérault et Var). Au total, 23 stations furent suivies (8 en 2001, 7 en 2002, 8 en 2003) regroupant 5 espèces (chênes blanc, vert, kermès, arbousier et bruyère arborescente).

L'évolution de la teneur en eau des feuilles (de l'année) a été mesurée :

- au niveau des individus (prélèvements de pieds distincts),
- au niveau de bouquets (mélange d'échantillons prélevés sur plusieurs pieds dans une zone géographique définie),
- au niveau du peuplement (par échantillonnage spatial aléatoire).

Les différentes étapes du traitement des données font appel à :

- la géostatistique (analyse spatiale des relevés au niveau du peuplement),
- la statistique descriptive (test d'indépendance des bouquets, des pieds individuels).

3.2. ANALYSE GÉOSTATISTIQUE

Ce travail est novateur et permet de préciser le comportement spatial d'espèces différentes, en conditions hydriques différentes. Huit campagnes de mesures spatiales ont été réalisées (Tableau 13).

Tableau 13. Campagnes de mesures spatiales de la FMC

Site	Espèce	Date	Nombre de relevés	FMC moyen	Écart-type
Causse d'Aumelas, Hérault	Chêne kermès	17 juillet 2001	55	0,841	0,068
		4 septembre 2001	69	0,743	0,054
		15 juillet 2003	60	0,818	0,055
	Chêne vert	17 juillet 2003	60	0,753	0,049
Massif des Maures, Var	Arbousier	23 juillet 2003	45	0,530	0,041
		18 septembre 2003	60	1,092	0,073
	Bruyère arborescente	23 juillet 2003	45	0,420	0,069
		18 septembre 2003	54	0,709	0,080

Il est important de préciser que la méthode d'échantillonnage ne suit aucune règle statistique (Figure 31). Les difficultés de circulation à l'intérieur des sites de prélèvement ont empêché un tirage aléatoire strict. Néanmoins, il nous a semblé primordial de couvrir l'ensemble des classes de distance avec des prélèvements aléatoires sur une distance maximale d'un kilomètre et des prélèvements sur des pieds proches (< 10 mètres). De plus, précisons que les campagnes de terrain furent opérées en temps limité (2 heures) afin d'éviter au maximum tout changement hydrique entre les premiers individus prélevés et les derniers.

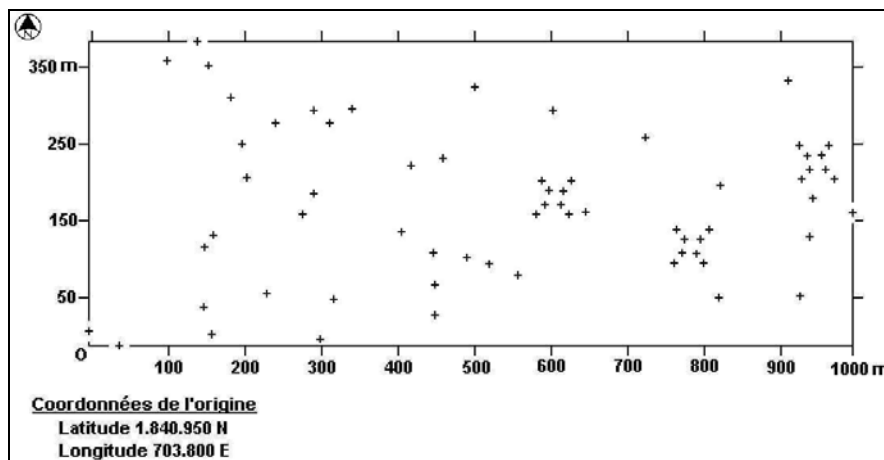


Figure 31. Cartographie de l'échantillonnage spatial de la teneur en eau du chêne kermès effectuée sur le causse d'Aumelas le 4 septembre 2001.

Pour mettre en évidence une structure spatiale on souhaite tracer le variogramme de la teneur en eau mesurée, et ceci pour des classes de distance inférieure au kilomètre.

Afin de juger de la pertinence du variogramme, on associera un test de permutations (test de Monte-Carlo) représentant l'intervalle de variation du variogramme. Le test H_0 de permutations n'a lieu d'être que si les données initiales sont centrées (Metropolis *et al.*, 1949).

Or on observe pour les campagnes de terrain sur le Causse d'Aumelas une dérive des mesures de teneur en eau selon la latitude (Figure 32). Cette dérive est approchée par régression linéaire et l'analyse variographique est alors faite sur les résidus centrés.

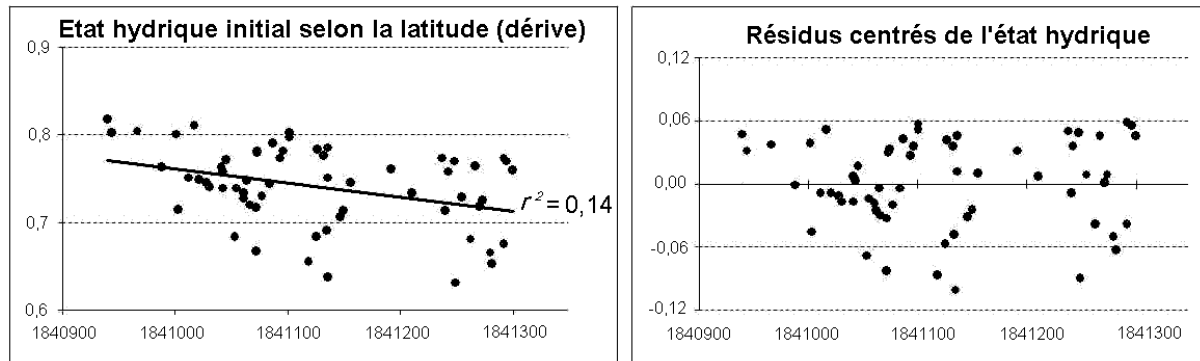


Figure 32. Exemple de correction de la dérive des données selon la latitude

L'étape suivante consiste à tracer le variogramme des teneurs en eau mesurées pour chaque campagne de terrain. Le choix de la distance maximale du variogramme expérimental va dépendre de la taille de la zone échantillonnée (< 1000 m). Le nombre de classes dépendra du nombre de couples de distances disponibles. Il est important de garder un nombre suffisant de couples ($np > 100$) pour chaque classe.

Sur les graphiques suivants (Figure 33) sont représentés les variogrammes et leurs enveloppes de confiance (90% et Min-Max) données par le test de permutations de Monte-Carlo.

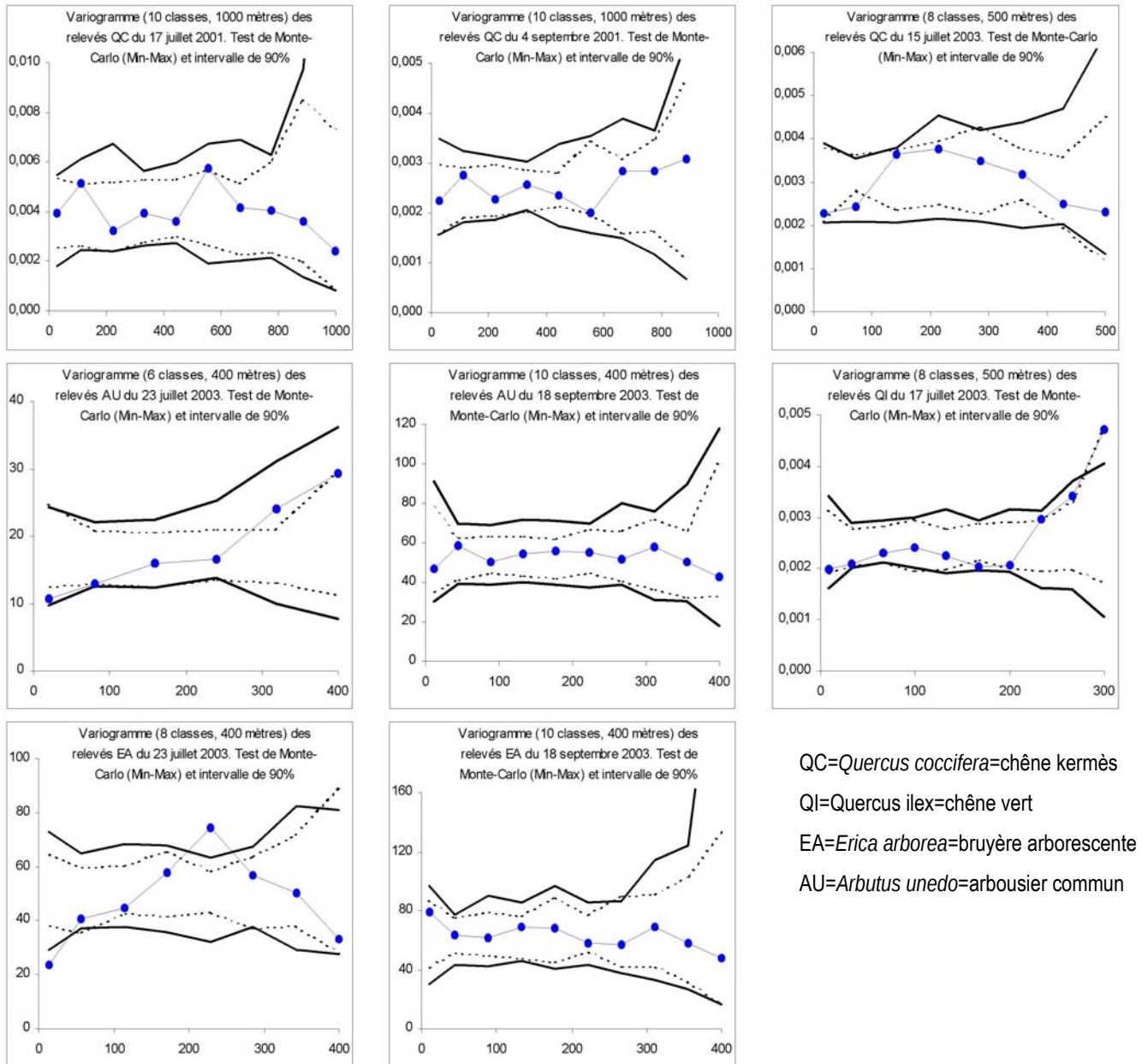


Figure 33. Variogrammes et enveloppes de confiance de la teneur en eau

Sept variogrammes sur huit s'inscrivent dans leur enveloppe de variation pour toutes les distances. Ils atteignent leur variance dès les premiers pas de distance (effet de pépite pure). L'hypothèse H_0 d'absence de corrélation spatiale est donc vérifiée.

Un seul variogramme s'écarte des enveloppes (bruyère arborescente prélevée pendant la canicule de juillet 2003) à une distance de 230 mètres environ alors que le nombre de couples de distances est correct ($np=134$). Cette exception mérite d'être confirmée par de nouvelles mesures en 2004 sur le même site, si les conditions climatiques le permettent.

En conclusion, pour les zones d'étude (Causse d'Aumelas et massif des Maures) et les espèces suivies (chêne kermès, chêne vert, bruyère arborescente et arbousier) il n'existe pas de structure spatiale proprement dite de l'état hydrique. Ainsi pour évaluer l'état hydrique d'une zone géographique et ce, quelle que soit sa taille, un **échantillonnage aléatoire de plus de 30 individus** (théorème central limite) suffit à représenter la distribution normale des relevés.

La réalisation de cartes de la teneur en eau de la végétation n'est pas souhaitable. Les méthodes d'interpolation des relevés ponctuels comme le krigeage ne se justifient pas. Aucun modèle variographique (sphérique, exponentiel...) n'est préférable à un autre. L'absence de structure spatiale rend néanmoins possible les analyses statistiques dites « classiques » et notamment les tests de comparaison d'échantillons, objet du paragraphe suivant.

3.3. STATISTIQUES DESCRIPTIVES DU COMPORTEMENT SPATIAL

3.3.1. EFFET DE LA STATION DE MESURE

Nous souhaitons comparer les relevés effectués sur les mêmes sites d'étude mais pour des bouquets (d'arbres ou d'arbustes) distants de 300 mètres environ.

La comparaison des échantillons indépendants (de 2 à 5 selon les cas) a été permise par le test non paramétrique de Kruskal-Wallis. D'après Lehmann et D'Abrera (1975), l'idée est d'effectuer une analyse de variance basée sur les rangs, c'est-à-dire sur les numéros de valeurs observées rangées par ordre croissant. Ceci simplifie en général beaucoup les calculs mais provoque évidemment une perte d'information. De ce fait, les analyses de variance non paramétriques sont généralement moins puissantes que les analyses de variance paramétriques correspondantes, dans les conditions où ces dernières sont applicables.

Le Test de Kruskal-Wallis permet de décider si les différences observées entre t échantillons indépendants sont dues au hasard ou au fait que les échantillons proviennent de différentes populations.

Ce test s'applique par exemple pour des expériences complètement randomisées²⁵. On commence par remplacer les N observations par leur rang : la plus petite valeur est remplacée par 1, la suivante par 2, etc. La plus grande valeur est remplacée par N . Puis la somme des rangs de chaque échantillon (ou traitement) est calculée. Le test de Kruskal-Wallis détermine si les sommes des rangs sont significativement différentes, c'est-à-dire si les échantillons sont tellement différents qu'il y a peu de chance qu'ils proviennent de la même distribution (et donc que la probabilité que les traitements soient identiques est faible).

²⁵ Réparties au hasard

Pour comparer deux échantillons, d'autres tests statistiques ont été réalisés comme les tests paramétriques sur les moyennes (T de Student, Z) et sur les variances (F de Fisher, Bartlett, Levene), et les tests non paramétriques (Kolmogorov-Smirnov, Mann-Whitney). Dans notre cas, ces tests ont fourni une interprétation des données identique au test de Kruskal-Wallis et ne sont donc pas détaillés ici. Les résultats de la comparaison sont présentés dans le *Tableau 14*.

Tableau 14. Analyse de la différence inter-sites de l'état hydrique (indice FMC) au sein d'une même espèce selon le test de Kruskal-Wallis

Été 2001			
Données	4 sites de chêne kermès (Montpellier)	3 sites de bruyère arborescente (Maures)	3 sites d'arbousier (Maures)
P value	74%	12%	0,14%
Interprétation	la différence intra-sites n'est pas significative (dans 95% des cas)		Différence significative à 1%

Été 2002			
Données	2 sites de chêne kermès (Montpellier)	2 sites de bruyère arborescente (Maures)	2 sites d'arbousier (Maures)
P value	12%	37%	2%
Interprétation	la différence intra-sites n'est pas significative (dans 95% des cas)		Différence significative à 5%

Été 2003			
Données	2 sites de chêne kermès (Montpellier)	2 sites de bruyère arborescente (Maures)	6 sites d'arbousier (Maures)
P value	17%	38%	1,12%
Interprétation	la différence intra-sites n'est pas significative (dans 95% des cas)		Différence significative à 5%

P value : probabilité sous l'hypothèse nulle d'obtenir un résultat aussi extrême que celui observé, vers la droite de la distribution. On rejette l'hypothèse nulle lorsque la probabilité est inférieure au seuil alpha.

Pour les trois années de suivi, le chêne kermès a le même comportement quel que soit le bouquet (la station) de mesure. Il en est de même pour la bruyère arborescente du massif des Maures. En revanche les bouquets d'arbousier ont des comportements significativement différents entre-eux. L'espèce semble donc jouer un rôle important dans le critère suivi.

3.3.2. EFFET DE L'INDIVIDU

Nous comparons également les relevés effectués sur des pieds individuels (de 3 à 9) suivis pendant les étés 2001 et 2002 en 10 stations différentes (Tableau 15). Le test non paramétrique de Kruskal-Wallis est également utilisé.

Tableau 15. Analyse des différences entre individus selon le test de Kruskal-Wallis

Seuils : * 5% ** 1% *** 1%

Année	Espèce	Code site	Zone	Nbre de pieds	P value	Seuil	Interprétation
2001	chêne kermès	1	Montpellier	9	0,05%	***	Individualité forte
	chêne kermès	2	Montpellier	8	< 0,01%	***	Individualité forte
	chêne kermès	3	Montpellier	8	0,6%	**	Individualité forte
	chêne vert	4	Montpellier	8	< 0,01%	***	Individualité forte
2002	chêne kermès	6	Montpellier	3	< 0,01%	***	Individualité forte
	chêne vert	7	Montpellier	3	< 0,01%	***	Individualité forte
	chêne pubescent	8	Montpellier	3	< 0,01%	***	Individualité forte
	arbousier	B	Maures	3	0,12%	**	Individualité forte
	arbousier	D	Maures	3	13%		pas d'individualité
	arbousier	E	Maures	3	0,4%	**	Individualité forte
	bruyère arborescente	B	Maures	3	< 0,01%	***	Individualité forte
	bruyère arborescente	D	Maures	3	0,19%	**	Individualité forte
	bruyère arborescente	E	Maures	3	81%		pas d'individualité

Excepté deux cas, il y a un effet marqué des individualités des pieds suivis. Sur une station donnée, chaque pied a donc une teneur en eau statistiquement différente de son voisin.

3.4. CONCLUSION

La teneur en eau de la végétation méditerranéenne semble différente d'un individu à l'autre au sein d'une même espèce et d'un même site.

Les différentes campagnes de suivi spatial mettent en évidence l'absence de structure spatiale et donc un stress hydrique aléatoire.

Pour les sites d'étude considérés et les espèces suivies, il convient de prélever et de mélanger un nombre suffisant d'échantillons (> 30) afin d'estimer l'état hydrique de la végétation et ceci quelle que soit la surface considérée *a priori*.

4. COMPORTEMENT TEMPOREL DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION MÉDITERRANÉENNE

Au sein de ce chapitre, nous avons tout d'abord décrit les méthodes de mesure de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne. Puis nous avons précisé que le comportement spatial du stress hydrique évolue d'un individu à l'autre. Il semble qu'aucune échelle de structure spatiale de variation de la teneur en eau ne puisse se distinguer. Dans cette quatrième partie du chapitre, nous abordons plus en détails le comportement temporel des processus de dessèchement des plantes.

Tout processus biologique est régi par une « vie », un « cycle » plus ou moins long. Nous essayons de répondre à la question suivante : quelle est la variabilité temporelle de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne ? Il est clair que les phénomènes de dessèchement et d'hydratation de la végétation en milieu méditerranéen sont directement liés au régime de précipitation, d'une part, et à la nature des sols et leur capacité à stocker l'eau, d'autre part.

Nous disposons de plusieurs dizaines de stations de mesures (35 au total) réparties sur le Causse d'Aumelas près de Montpellier (CEMAGREF), dans le massif des Maures (INRA) et dans les 15 départements de l'Entente (réseau ONF).

Nous étudions les campagnes 2001 et 2002 et pas moins de vingt espèces différentes couvrant les principales formations arborées et arbustives méditerranéennes. Ces conditions de départ de l'étude couvrent deux années très différentes (2001 sèche, 2002 pluvieuse) et des conditions édaphiques variées.

L'unité de mesure de la variabilité temporelle est le Jour. En conditions favorables, il faudrait donc un relevé quotidien sur chaque site et pour chaque espèce afin d'identifier le délai de réponse de la végétation à un épisode pluvieux. Cela n'a jamais été le cas et la fréquence des relevés de FMC varie de 2 à 15 jours selon les sites et les opérateurs.

Au niveau statistique, plusieurs analyses sont développées :

- la description statistique du délai moyen de réponse de la végétation après un épisode pluvieux,
- l'analyse de tendance ,
- l'analyse de variance et l'analyse factorielle en composantes principales des données.

4.1. ANALYSE DE TENDANCE

Nous utilisons le test non paramétrique de Spearman (*annexe 5*) pour faire l'analyse de tendance dans une série chronologique. Soit x_i une réalisation de la variable aléatoire X . Nous désirons savoir si les x_i peuvent être considérés comme des réalisations indépendantes les unes des autres. Pour cela, Spearman propose le raisonnement suivant : si les réalisations sont indépendantes, l'échantillon ne présente pas de structure, donc pas d'ordre privilégié. On testera donc la présence de dépendance en comparant l'ordre de l'échantillon recueilli avec celui issu d'une procédure de tri.

Cette comparaison se fait grâce au coefficient de corrélation de Spearman r_s . Sous l'hypothèse H_0 d'indépendance, le coefficient de corrélation doit être nul. Dans le cas d'un processus purement aléatoire, $r_s = 0$ et sa variance $\sigma_{r_s}^2 = (n-1)^{-1}$.

Chaque fois, pour les sites d'étude suivis, on a pu mettre en évidence une tendance entre la teneur en eau des feuilles et le jour de l'année. Par exemple, pour l'arbousier du site A du massif des Maures suivi en 2001, nous avons :

$$r_s = -0,82 \quad \sigma_{r_s}^2 = 0,02 \quad \sigma_{r_s}^2 \text{ théorique} = 25^{-1} = 0,04 \quad \text{ainsi } \sigma_{r_s}^2 \neq \sigma_{r_s}^2 \text{ théorique}$$

L'évolution de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne n'est donc pas un processus aléatoire mais suit une tendance. Le contraire nous aurait étonnés !

4.2. STATISTIQUES DESCRIPTIVES DU COMPORTEMENT TEMPOREL

Nous essayons ici de connaître le délai de « réponse » de la végétation à un épisode pluvieux. A chaque observation d'humectation des feuilles d'une espèce (hausse de la teneur en eau mesurée) au niveau d'un site, on associe un ou plusieurs épisodes pluvieux antérieurs. Étant donné l'absence de prélèvements quotidiens, on ne peut qu'estimer une fourchette inférieure-supérieure du nombre de jour $[j_{\text{inférieur}} ; j_{\text{supérieur}}]$. Dans certains cas nous observons une hausse de la teneur en eau des plantes alors qu'aucun épisode pluvieux récent n'a été mesuré par la station météorologique la plus proche. Pour éviter les omissions, nous ne conservons que les pluies datant de moins de 16 jours.

Tableau 16. Calcul des délais de réponse pour les deux campagnes

Intitulé	Année 2001	Année 2002
Nombre de hausses de la teneur en eau de la végétation	289	339
Épisodes pluvieux de moins de 16 jours avant la hausse	62 %	95 %
Nombre d'épisodes pluvieux retenus	180	322
Lame d'eau moyenne	21 mm	22 mm
Fourchette moyenne de délai	[4,6 ; 7,6 jours]	[2,9 ; 7,1 jours]
Fourchette médiane de délai	[3 ; 7 jours]	[1 ; 7 jours]

Les calculs ci-dessus confirment bien la différence de régime de précipitation entre les deux années. Pour l'année 2002 pluvieuse, il est aisé d'associer chaque accroissement de FMC à un épisode de pluie datant de moins de 16 jours (95% des cas). L'année 2001 en revanche comptabilise beaucoup moins d'épisodes et il est difficile de faire correspondre chaque hausse à une lame d'eau. En effet, une bonne partie des pluies (38%) n'a pas été observée par les stations météorologiques « proches » des sites (de 5 à 30 km selon les cas) du fait de l'instationnarité des phénomènes.

En résumé, nous avons observé pendant les étés 2001 et 2002 près de 502 accroissements de la teneur en eau de la végétation, correspondant à des épisodes pluvieux datant de moins de 16 jours. En moyenne on peut considérer que la végétation méditerranéenne a un délai de réponse à une pluie de **5 ou 6 jours**. Dans les deux tiers des cas ce délai est inférieur à 8 jours.

4.3. ANALYSES DE VARIANCE ET FACTORIELLES

L'analyse de variance (ANOVA) selon l'espèce prélevée n'a pas permis une bonne modélisation (r^2 de 9% pour $j_{\text{inférieur}}$, de 5% pour $j_{\text{supérieur}}$). De même l'ANOVA selon le site de prélèvement est mauvaise (r^2 de 16% pour $j_{\text{inférieur}}$, de 13% pour $j_{\text{supérieur}}$). Les tests de classement et de regroupement (par exemple Test de Fisher LSD *Least Significant Difference*²⁶) des espèces ou des sites ne sont donc pas significatifs.

Même si l'on peut supposer que sur les 20 espèces suivies, certaines s'hydratent plus rapidement que d'autres, les tests utilisés ne permettent pas de les différencier. En conclusion, ni l'espèce, ni le site ne sont des facteurs jouant un rôle sur la réponse de la végétation après une pluie.

On peut aussi penser que la quantité de pluie (Q_{pluie}) joue un rôle. Pour cela on effectue l'analyse factorielle en composantes principales (ACP) des variables quantitatives ($j_{\text{inférieur}}$, $j_{\text{supérieur}}$ et Q_{pluie}). $j_{\text{inférieur}}$ et $j_{\text{supérieur}}$ expliquent 93% de l'axe 1, Q_{pluie} explique 99% de l'axe 2. La quantité de pluie tombée ne semble pas jouer un rôle direct sur le délai de réponse de la végétation.

4.4. CONCLUSION

La teneur en eau de la végétation méditerranéenne, observée sur les années 2001 et 2002, pour un ensemble d'espèces (20) et de sites (35) différents, augmente en moyenne **5 ou 6 jours** après un épisode pluvieux. Le rôle de l'espèce ou du site d'étude n'est pas majoritaire sur ce facteur, la quantité de pluie non plus. Le délai observé inférieur à la semaine peut s'expliquer par la combinaison de multiples facteurs locaux biotiques, abiotiques et climatiques. Ainsi nous suggérons de **travailler à une échelle inférieure ou égale à 8 jours** (deux tiers des cas) pour :

- les fréquences d'échantillonnage et de relevés de terrain,
- les données d'observations de télédétection (photographies aériennes, images satellitaires).

Dans le cas où ce délai serait dépassé, les observations risquent d'omettre certaines évolutions de l'état hydrique des plantes et donc de compromettre les analyses basées sur ces relevés.

²⁶ Teste la différence entre chaque série d'effectif différent, après une analyse de variance significative

5. SYNTHÈSE

La tâche n'est pas aisée. Comment peut-on mesurer une vérité de terrain de l'état hydrique de la végétation la plus représentative de la réalité ? Le problème réside surtout dans le besoin en précision, conditionnée par l'utilisation de la donnée.

A l'heure actuelle, dans le système opérationnel de prévention des incendies, l'ONF mesure la teneur en eau des plantes à travers un réseau de trente stations. Une à deux fois par semaine, l'état hydrique des feuilles est calculé. La précision n'est pas recherchée ; l'importance réside surtout dans la répétitivité des prélèvements chaque année sur les mêmes sites et espèces. Les données produites sont transmises aux services de sécurité civile qui intègrent ces informations aux systèmes de prévention des risques aux niveaux départemental et régional. L'ONF retient 2 seuils, quelle que soit l'espèce, en deçà desquels le risque est important (teneur en eau < 40%) ou très important (< 30%). L'enquête des services SDIS met en évidence un intérêt limité de ces relevés ponctuels pour la gestion quotidienne du risque de feu dans chaque département.

Les mesures effectuées par les autres laboratoires (INRA, CEMAGREF, CEREN) n'ont pas de rôle décisionnel mais une pure finalité de recherche. La précision demandée est alors beaucoup plus stricte et la représentativité des mesures se pose plus particulièrement dès lors qu'on compare l'indice FMC aux autres tests (inflammabilité, modèles de combustion, de propagation du feu, mesures radiométriques, images satellitaires...). Le protocole de prélèvement doit dans ce cas être précis et suivi par les opérateurs, concernant le matériel prélevé (type de feuillage, nombre d'échantillons...) ou l'heure et le jour du prélèvement. Ce protocole est très contraignant car il doit tenir compte des problèmes soulevés de variabilités spatiales et temporelles du stress hydrique.

Il est donc important, avant même de comparer les données de télédétection aux FMC de terrain (*chapitre 4*), de nuancer nos propos et de ne pas considérer la donnée de terrain comme vraie mais plutôt comme une estimation grossière d'un état physiologique d'un ensemble d'individus en un lieu donné.

Avant d'aborder de grandes dimensions spatiales, métriques à kilométriques, nous souhaitons travailler à l'échelle élémentaire où ont lieu les échanges atmosphériques de la plante, à savoir la feuille. Dans le prochain chapitre, l'indice FMC est plus facile à mesurer puisque chaque échantillon est composé d'une seule feuille, laquelle fait l'objet de nombreuses expériences...

CHAPITRE 3

SPECTROSCOPIE PROCHE INFRAROUGE DE LA TENEUR EN EAU DES FEUILLES

« La méthode expérimentale, considérée en elle-même, n'est rien d'autre qu'un raisonnement à l'aide duquel nous soumettons méthodiquement nos idées à l'expérience des faits »

Claude Bernard, physiologiste (1813-1878)

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2 précédent, l'estimation *in vivo* de l'état hydrique de la végétation consiste à mesurer la quantité d'eau foliaire des plantes. Par la suite, nous suivons l'évolution de cette teneur en eau à la fois dans l'espace et dans le temps.

La feuille est bien entendu l'organe de la plante qui présente le plus de variation physiologique en période de sécheresse. Il paraît de ce fait original d'**étudier ses propriétés optiques en fonction de son état hydrique**. Avant d'observer des couverts végétaux entiers à l'aide d'images de télédétection, il semble intéressant d'étudier les propriétés optiques d'une feuille en conditions contrôlées de laboratoire et à l'aide de matériel sophistiqué.

Lors de la mise en place des dispositifs expérimentaux de laboratoire, trois objectifs se dessinent :

1. Identifier le comportement spectral des feuilles de plantes méditerranéennes pour des conditions hydriques différentes, dans le domaine du spectre électromagnétique visible et proche infrarouge (de 350 à 2500 nm).
2. Mettre en évidence dans ce domaine spectral, des longueurs d'onde sensibles à la teneur en eau des feuilles puis créer un modèle pour retrouver l'état hydrique d'une feuille à partir de la simple mesure de son spectre de réflectance.
3. Étudier l'intérêt des satellites actuels d'observation de la Terre pour mesurer le stress hydrique de la végétation. Les spectres sont transformés en bandes spectrales de capteurs existants et un nouveau modèle est testé.

1. LA SPECTROSCOPIE PROCHE INFRAROUGE

Il convient tout d'abord de rappeler les définitions des principaux termes employés dans ce chapitre.

Les termes **spectrométrie** ou **spectrographie** représentent la mesure ou l'enregistrement des spectres.

Le terme **spectroscopie** désigne l'étude générale des spectres, quelle que soit la méthode d'observation. On distingue quatre sortes de spectroscopie : la spectroscopie de résonance magnétique nucléaire (RMN), la spectroscopie de masse (SM), la spectroscopie ultraviolette (UV) et la **spectroscopie infrarouge** (IR). Seule cette dernière nous intéresse.

L'instrument permettant de mesurer l'intensité du rayonnement et sa distribution en fonction de la longueur d'onde sera appelé le **spectroradiomètre**. Il comprend au moins quatre parties essentielles : une source lumineuse appropriée, un système de séparation de la lumière polychromatique en fonction des longueurs d'onde, un système permettant d'installer l'échantillon, un ou plusieurs capteurs photosensibles. Il est conçu de manière à ce qu'une radiation d'une longueur d'onde bien précise traverse l'échantillon. La fréquence de ce faisceau incident est modifiée de manière progressive et l'intensité de la lumière émergente (par rapport à un faisceau de référence) est mesurée par un détecteur. Chaque fois que l'échantillon absorbe la lumière incidente, la différence d'intensité est mesurée par le détecteur et est enregistrée sous forme d'un pic. Le tracé obtenu pour l'ensemble de la gamme des longueurs d'onde représente le spectre.

Nous allons maintenant présenter brièvement les règles de spectroscopie, puis la relation entre le spectre électromagnétique et la teneur en eau des plantes.

1.1. RÉFLECTANCE, ABSORPTANCE ET TRANSMITTANCE

Tout matériau réagit à une source énergétique en répartissant le rayonnement selon trois sous-ensembles : **réflectance-absorptance-transmittance** (Woolley, 1971) noté R-A-T (Figure 34).

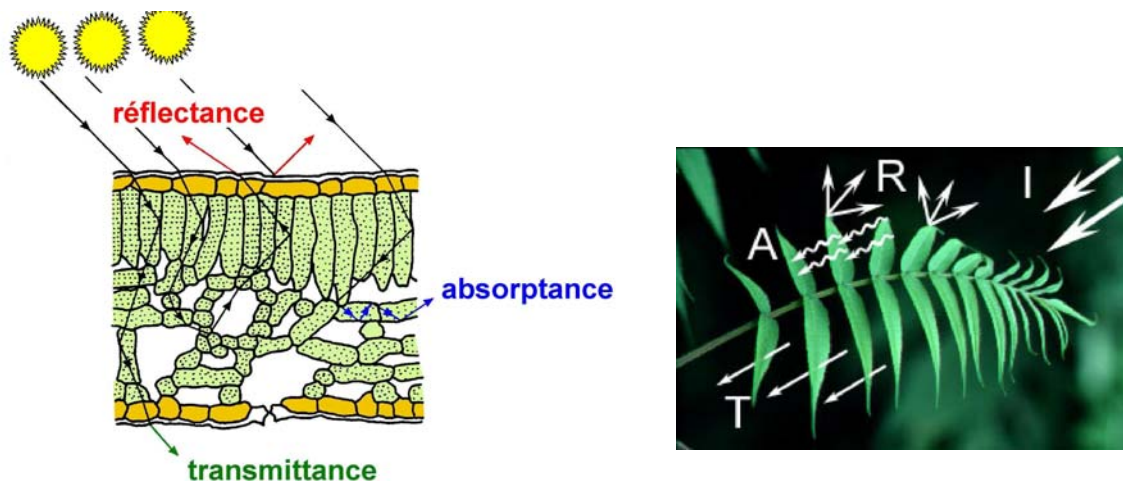


Figure 34. Répartition du rayonnement incident en R-A-T à travers une feuille (d'après Sinclair *et al.*, 1973).

Le rayonnement incident (I) est en partie réfléchi par la surface des feuilles (réflectance R) et en partie absorbé par la plante pour la photosynthèse (absorptance A). Contrairement aux matériaux opaques, les feuilles des végétaux laissent passer une partie de la lumière (transmittance T) (Figure 35).



Figure 35. Transmittance d'une feuille (photographie de Tessa Traeger)

La spectroscopie va permettre d'étudier la répartition du rayonnement pour plusieurs feuilles en conditions physiologiques variées.

1.2. LE SPECTRE DE L'EAU

L'eau est le constituant majoritaire des tissus végétaux et influe donc majoritairement sur le tracé d'un spectre. Dans cette partie nous allons expliquer simplement **comment interpréter le tracé d'un spectre**. Certains constituants moléculaires (chlorophylle, cellulose, lignine, azote, divers pigments...) sont quantifiables à partir de la mesure du spectre électromagnétique (études empiriques de Baldini *et al.* 1997, Card *et al.* 1988, Curran *et al.* 1992 pour quelques espèces). Nous choisissons de prendre l'exemple de la molécule d'eau et d'en expliquer le rôle sur le tracé du spectre d'une feuille de chêne vert.

1.2.1. LA MOLÉCULE H₂O

La molécule d'eau, notée H₂O, est composée d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène (Figure 36).

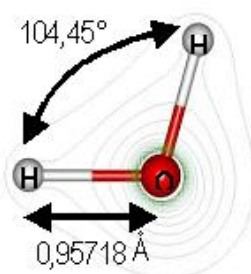


Figure 36. Structure spatiale de la molécule d'eau

L'atome d'oxygène possède 6 électrons sur sa couche de valence et devra en partager 2 (1 par atome d'hydrogène) (Tableau 17). La molécule d'eau possède 2 doublets libres centrés sur l'oxygène. L'atome O est entouré par 4 doublets (2 liants et 2 non liants) ; ceux-ci adoptent une répartition tétraédrique de sorte que la molécule est coudée (Figure 36). D'après le Théorème de Gillespie, la valeur du moment dipolaire (et sa direction) tient compte de tous les électrons de la molécule. La molécule d'eau est polaire, le moment dipolaire étant porté par la bissectrice de l'angle $\text{H}\hat{\text{O}}\text{H}$, de l'oxygène vers les hydrogènes.

Tableau 17. Caractéristiques des éléments de la molécule d'eau

Élément	Symbole	Numéro atomique Z	Masse molaire atomique en g.mol ⁻¹	Configuration électronique
Hydrogène	H	1	1,0079	(1s) ¹
Oxygène	O	8	15,9994	(1s) ² (2s) ² (2p) ⁴

1.2.2. LES LIAISONS

On distingue trois types de liaisons correspondant à des niveaux énergétiques différents (Tableau 18).

Tableau 18. Liaisons de la molécule d'eau et enthalpie associée

Liaisons	Type	Détail	Enthalpie (en kJ.mol ⁻¹)
covalence	intra-molécules O-H	Attraction qui résulte du partage mutuel d'électrons par deux atomes (force de Coulomb)	459
hydrogène	inter-molécules O-H	Liaison électrostatique entre l'atome H d'une molécule et le doublet libre de l'atome O d'une molécule voisine.	25
Van der Waals	inter-molécules	Attraction des électrons d'une molécule par les noyaux des molécules voisines	1

Les liaisons inter-moléculaires sont faibles, impliquant une **géométrie des molécules d'eau en constante variation**.

1.2.3. QUANTIFICATION DE L'ÉNERGIE DES ATOMES

Faisons un bref rappel de physique atomique et de mécanique quantique pour comprendre les énergies mettant en jeu la molécule d'eau.

La théorie de la mécanique quantique, développée dans les années 1920 par les professeurs Heisenberg, Schrödinger et Dirac (prix Nobel de physique en 1932 et 1933), décrit le mouvement d'un électron autour d'un noyau sous forme d'équations. Les solutions de ces équations sont appelées les **orbitales atomiques**.

La longueur d'onde de De Broglie $\lambda = \frac{h}{mv}$ indique qu'à une masse m se mouvant à la vitesse v correspond une longueur d'onde λ .

Dans le cas le plus simple de l'atome d'hydrogène, lequel est constitué d'un proton entouré d'un électron, l'unique solution de plus basse énergie pour l'équation d'onde est appelée l'orbitale 1s de symétrie sphérique. Pour les autres atomes, on a des niveaux d'énergie supérieurs : 2s puis 2p, 3s, 3p, 4s etc. (règle de Hund).

Les liaisons au sein de la molécule d'eau sont mieux décrites lorsqu'on considère que l'oxygène s'hybride en sp^3 (Tableau 17). Deux des orbitales sp^3 serviront à réaliser les liaisons avec les atomes d'hydrogène tandis que les deux autres abriteront les paires électroniques libres.

D'après la théorie de Bohr, il existe dans chaque atome des trajectoires d'énergie bien déterminées telles qu'un électron situé sur une de ces trajectoires ne rayonne ni n'absorbe de l'énergie électromagnétique : on dit que l'électron est dans un état stationnaire. Dans les autres cas, les énergies des électrons ne peuvent prendre que certaines valeurs ; **l'énergie est quantifiée en niveaux**. Les niveaux d'énergie les plus élevés correspondent aux électrons périphériques. Il peut y avoir transition d'un électron d'un niveau vers un autre (Figure 37) :

- vers un niveau inférieur par émission d'une onde lumineuse (photon de désexcitation) ;
- vers un niveau supérieur par absorption d'énergie (excitation).

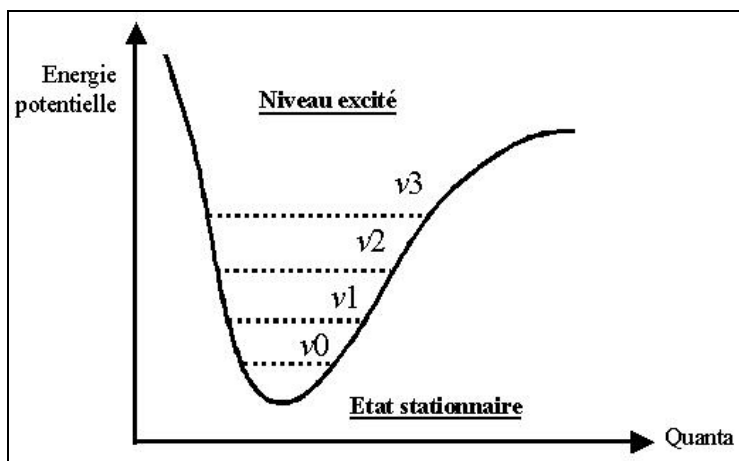


Figure 37. Courbe du potentiel énergétique de l'état électronique de base de la molécule d'eau et niveaux de vibration v (d'après Gerhard Herzberg, prix Nobel de chimie en 1971)

En résumé, l'absorption d'un quantum de radiation par une molécule d'eau provoque une transition de son état fondamental vers un état excité.

Bohr a appliqué la théorie des quanta de Planck à cet échange d'énergie entre matière et rayonnement (Équation 15).

Équation 15.

$$E_m - E_n = h \cdot \nu$$

h = constante de Planck ($6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s)

ν = fréquence de l'onde électromagnétique absorbée ou émise

E_m = énergie du niveau supérieur

E_n = énergie du niveau inférieur

La molécule d'eau absorbe les radiations électromagnétiques sous forme de « paquets » discrets d'énergie (quanta). L'énergie absorbée provoque une sorte de « mouvement » électronique ou mécanique dans la molécule, processus que l'on appelle **excitation**. Selon les gammes de longueurs d'onde, la transition est différente (Tableau 19 et Figure 38).

Tableau 19. Types de transitions des électrons selon la gamme de longueurs d'onde

Longueurs d'onde	Type de transitions
< 800 nm	électroniques (électrons de valence des atomes et molécules)
de 800 nm à 20 μm	vibrationnelles (élongation et cisaillement)
> 20 μm	rotationnelles (selon trois axes)

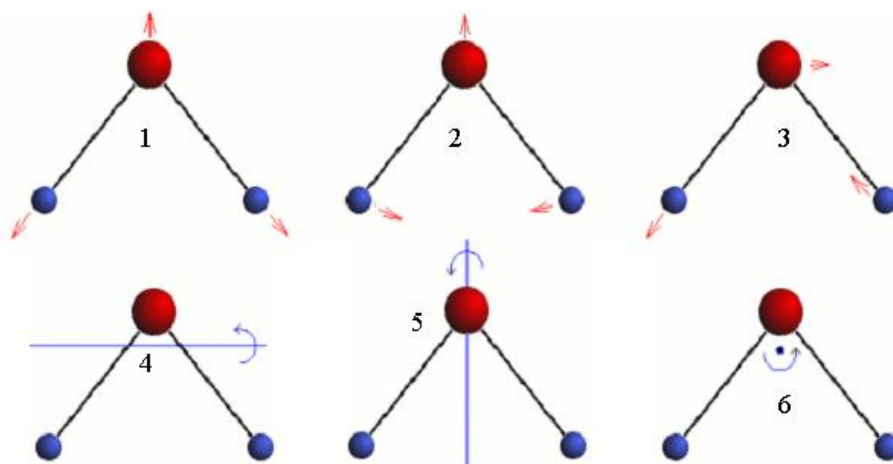


Figure 38. Représentation des états vibrationnels et rotationnels de la molécule d'eau
(1 : élongation symétrique v_1 - 2 : cisaillement v_2 - 3 : élongation asymétrique v_3 - 4-5-6 : rotation selon trois axes)

Pour la gamme de longueurs d'onde de notre étude (350-2500 nm), seules les **transitions électroniques et vibrationnelles** vont être observées par le spectre électromagnétique d'absorption. Les longueurs d'onde diffèrent selon la phase de la molécule d'eau (solide, liquide ou gazeuse) et les types de transition (Tableau 20).

Tableau 20. Intensité d'absorption et longueurs d'onde selon la phase de la molécule d'eau

Transition par vibration	Intensité d'absorption	H ₂ O gazeux	H ₂ O liquide	H ₂ O solide
v_1	0,07	2730 nm	2870 nm	3050 nm
v_2	1,57	6270 nm	6080 nm	
v_3	1,00	2660 nm	2900 nm	

La plupart du temps deux modes de transition se combinent entre eux (Tableau 21).

Tableau 21. Combinaison de transitions et longueurs d'onde pouvant se manifester selon la phase de la molécule d'eau

Combinaison de transitions	H ₂ O liquide	H ₂ O gazeuse
$v_1 + v_3$	739 nm	
$2v_1 + v_3$	970 nm	1004 nm
$v_1 + v_2 + v_3$	1200 nm	1272 nm
$v_1 + v_3$	1450 nm	1536 nm
$v_2 + v_3$	1940 nm	1990 nm

Sur la Figure 39 on retrouve les principales zones du spectre où le rayonnement est absorbé.

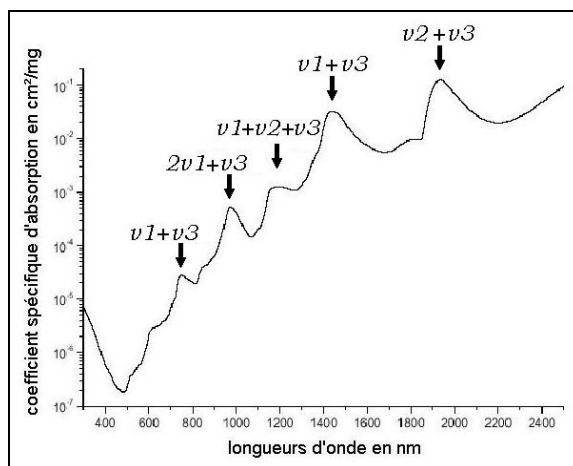


Figure 39. Courbe d'absorption de l'eau liquide pure entre 300 et 2500 nm (d'après Maier, 2000)

Il faut toutefois noter que dans le cas de molécules polyatomiques comme la molécule d'eau, toutes les liaisons inter-atomiques ne sont pas capables d'absorber de l'énergie lumineuse infrarouge, même dans le cas où la fréquence de la lumière est la même que la fréquence propre de la liaison. Selon Bertrand (2002), seules les liaisons qui présentent un moment électrique dipolaire oscillant sont « actives dans l'infrarouge ».

1.2.4. LE SPECTRE DE L'EAU DANS LA PLANTE

Prenons l'exemple d'un spectre d'absorptance de feuille de chêne vert mesuré en laboratoire (Figure 40).

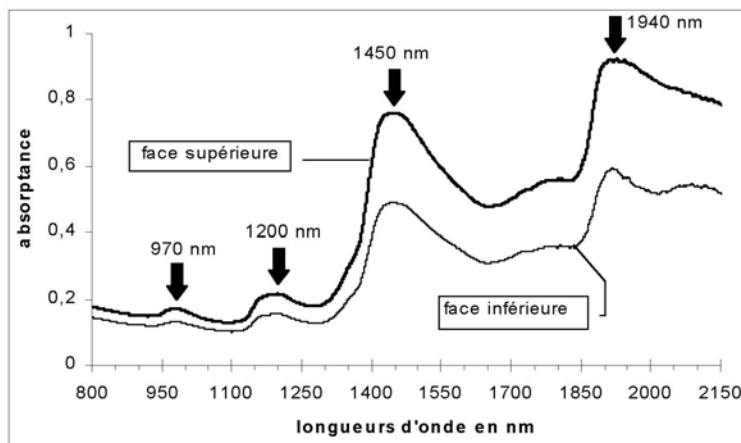


Figure 40. Spectre électromagnétique en absorptance des faces supérieures et inférieures d'une feuille de chêne vert entre 800 et 2150 nm

On retrouve aisément les deux pics majeurs d'absorption de l'eau à 1450 et 1940 nm et les pics mineurs à 970 et 1200 nm, ceci pour les deux faces de la feuille.

Nous venons de préciser dans cette partie le comportement de la molécule d'eau et son influence sur le spectre électromagnétique. Ainsi le spectre d'absorptance est une sorte d'« empreinte digitale » de la feuille, liée à sa composition chimique et donc à son état physiologique. L'état hydrique peut donc s'observer et se quantifier à partir d'un spectre.

1.3. LE STRESS HYDRIQUE PAR SPECTROSCOPIE

1.3.1. CONTEXTE

Les propriétés optiques des feuilles ont été étudiées par divers auteurs (Gates et al. 1965, Knipling 1970, Colwell 1974, Curan 1980, Jensen 1983, Ripple 1986, Lusch 1989), démontrant le rôle important des pigments foliaires, de la structure interne des feuilles et de leur teneur en eau (Jacquemoud et Ustin, 2001). La Figure 41 précise les facteurs dominants de la réponse spectrale selon la longueur d'onde, pour une feuille de chêne vert mesurée en laboratoire.

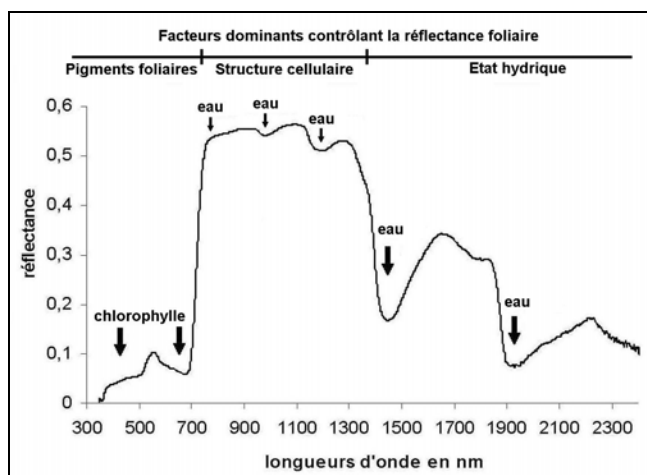


Figure 41. Spectre de réflectance d'une feuille de chêne vert et pics d'absorption associés entre 350 et 2400 nm

Ainsi dans la partie visible du spectre (380-780 nm) l'influence des pigments foliaires est prépondérante. Le proche infrarouge (800-1400 nm) est dominé par la structure des cellules alors que le moyen infrarouge réflectif (1400-2500 nm) est influencé par l'état hydrique du végétal. Lorsque la feuille se dessèche, les caractéristiques d'absorption de la matière sèche apparaissent (cellulose, lignine, amidon...).

1.3.2. MODÉLISATION RADIATIVE APPLIQUÉE

Dans le cadre du projet SPREAD, nous avons confié nos mesures spectrales à l'équipe de Mark Danson de l'Université de Salford, dans le but de simuler les images satellitaires de nos sites d'étude à partir de modèles de transfert radiatif. Le système proposé par Danson et Bowyer (2003) est composé du couplage :

- du modèle de réflectance foliaire PROSPECT (Jacquemoud et Baret, 1990) en nouvelle version (Jacquemoud *et al.*, 2000), pour des couverts modélisables par des couches homogènes superposées ;
- des modèles de réflectance du couvert SAIL (Verhoef, 1984 et 1985) et de sa version modifiée GEOSAIL (Jasinski et Eagleson 1989, Huemmrich 2001), pour des couverts discontinus.

Les modèles sont testés pour des valeurs standards de paramètres, puis pour des valeurs spécifiques correspondant aux trois espèces prélevées sur les deux sites d'étude.

1.3.2.1. MODÈLE À L'ÉCHELLE DE LA FEUILLE

Au niveau de la feuille, nous disposons de mesures spectroscopiques de laboratoire de trois espèces : arbousier (AU), chêne kermès (QC) et chêne vert (QI). Ces spectres sont introduits dans le modèle PROSPECT pour simuler le rayonnement. Danson et Bowyer (2003) proposent d'étudier la sensibilité du modèle à travers quatre paramètres (teneurs en chlorophylle, eau, matière sèche, structure foliaire). Nous représentons dans le *Tableau 22* l'amplitude de variation de chaque paramètre ; on considère à la fois les valeurs standards (valables pour la plupart des végétaux) et les valeurs spécifiques aux trois espèces étudiées.

Tableau 22. Paramètres du modèle PROSPECT

Paramètres	Valeurs standards	Valeurs spécifiques		
		AU	QI	QC
Teneur en chlorophylle a et b, en $\mu\text{g.cm}^{-2}$	10 à 65	inconnu	30-90*	10 à 50*
Teneur en eau EWT, en $\text{g.cm}^{-2} \times 10^{-4}$	1 à 850	143 à 200	91 à 154	78 à 133
Teneur en matière sèche SLW (<i>specific leaf weight</i>) en $\text{g.cm}^{-2} \times 10^{-4}$	20 à 200	88 à 147	110 à 177	87 à 138
Paramètre N de structure foliaire	1 à 4	non directement mesurable		

*valeurs issues de travaux du CNRS-CEFE de Montpellier pour les feuilles de QC et QI de juin à septembre

Les valeurs standards des paramètres du modèle présentent de grandes amplitudes de variation. A l'inverse, définir les valeurs spécifiques aux espèces a permis de restreindre les amplitudes.

1.3.2.2. MODÈLE À L'ÉCHELLE DU COUVERT VÉGÉTAL

Au niveau du couvert, deux sites A et B près de Montpellier sont étudiés avec les capteurs haute résolution SPOT-HRVIR et basse résolution NOAA-AVHRR, SPOT-VGT et TERRA-MODIS. Pour la modélisation de la réflectance du couvert, les images satellitaires acquises ont des angles de visée variables $[-29^\circ; +29^\circ]$ sources d'effets de BRDF. Les mesures de LAI ne sont que des estimations grossières (estimation ponctuelle par appareil LAI-2000) et demandent à être confirmées.

Tableau 23. Paramètres du modèle de couvert GEOSAIL

Paramètres	Valeurs standards	Valeurs spécifiques	
		Site A	Site B
Angle zénithal solaire SZA (<i>solar zenith angle</i>) pour la période de risque de feu	17 à 70°	40 à 70°	40 à 70°
Indice foliaire LAI (<i>leaf area index</i>)*	1 à 3	2 à 4	1,8 à 3
Taux de couvert végétal	60 à 100%	60 à 90%	100%

* uniquement sur les composants végétaux d'occupation du sol

De la même manière que précédemment, les paramètres standards du modèle prennent des valeurs de plus fortes amplitudes que les paramètres des deux sites d'étude.

1.3.2.3. TRAITEMENTS ET RÉSULTATS

Les associations des modèles PROSPECT+SAIL et PROSPECT+GEOSAIL sont testées pour le site A et l'espèce QC ainsi que pour le site B et l'espèce QI.

L'équipe de Mark Danson réalise l'analyse de sensibilité des modèles par la méthode EFAST (*Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test*) de Saltelli *et al.* (1999). Près de 5000 simulations sont testées pour l'ensemble des jeux de paramètres et pour une distribution uniforme.

La Figure 42 représente la sensibilité du spectre de réflectance avec la méthode EFAST et l'association des modèles PROSPECT et GEOSAIL, pour les valeurs standards des paramètres (large amplitude).

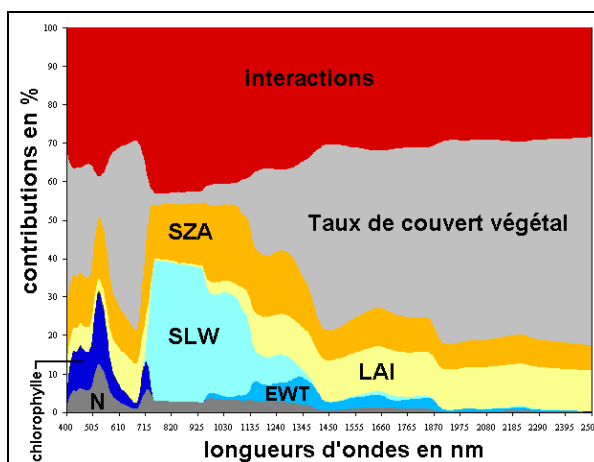


Figure 42. Contributions des différents paramètres standards pour le modèle PROSPECT + GEOSAIL (analyse de sensibilité EFAST)

Pour ce cas précis, le signal est donc fortement influencé par le taux de couvert végétal (jusqu'à 50%) ainsi que par les interactions entre les paramètres (de 30 à 40%). En revanche, la contribution de l'état hydrique de la végétation (indice EWT) est très faible (moins de 10%).

Les mêmes simulations sont ensuite effectuées avec les paramètres spécifiques au site B (taillis de chêne vert QI). La Figure 43 représente la sensibilité du spectre de réflectance obtenue par la méthode EFAST. N'interviennent pas dans les contributions le taux de couvert végétal, fixé à 100% pour le site B, et le paramètre foliaire N, fixé à 2 pour le chêne vert.

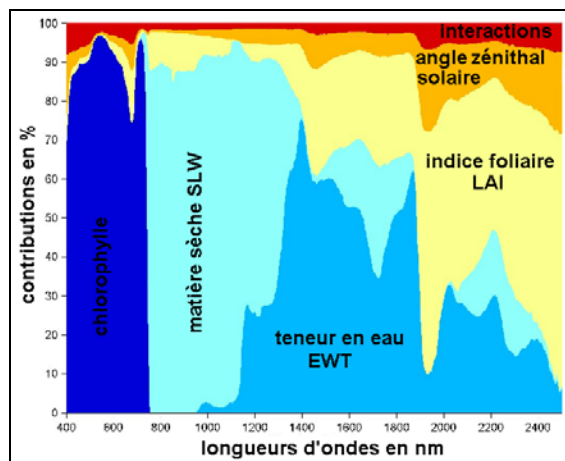


Figure 43. Contributions des différents paramètres spécifiques au site B pour le modèle PROSPECT + GEOSAIL (analyse de sensibilité EFAST)

Nous notons que les interactions entre les paramètres sont très fortement réduites par rapport à la simulation précédente. Pour la partie du spectre du moyen infrarouge de 1350 à 1900 nm, l'indice de teneur en eau EWT est majoritairement impliqué dans les variations des modèles (environ 60%). Pour cette plage de longueurs d'ondes, l'indice foliaire LAI participe à environ 25%. Les 15% restants correspondent à la matière sèche SLW et à l'angle zénithal du soleil SZA.

Ces simulations de transfert radiatif de Danson et Bowyer (2003) sont encourageantes. On peut penser que dans le cas de sites à couvert végétal dense, **l'état hydrique des feuilles est le facteur qui influence en premier lieu les valeurs de réflectance dans le moyen infrarouge**. A partir des données de télédétection, l'angle zénithal solaire est connu. De même, il est désormais possible d'estimer, plus ou moins précisément selon les couverts, l'indice foliaire LAI d'un pixel sans mesure de terrain à partir de nouveaux produits satellitaires (par exemple avec le capteur MODIS). La NASA propose même des produits de teneur en chlorophylle *a* des pixels MODIS.

La combinaison de plusieurs produits satellitaires devrait donc permettre dans l'avenir d'isoler les différents paramètres influençant la réflectance (aérosols, nuages, chlorophylle *a*, indice foliaire LAI, angles de visée et du soleil...) pour mieux identifier les seules variations liées à l'état hydrique du couvert.

Dans cette première partie du *chapitre 3*, nous avons précisé la notion de spectroscopie proche infrarouge et surtout l'origine du spectre électromagnétique. La modélisation radiative montre la potentialité du spectre pour observer l'état hydrique des plantes. Chaque spectre s'obtient à partir de mesures en laboratoire. Afin de simplifier les spectres de manière efficace, il est nécessaire d'appliquer différents traitements (mathématiques et statistiques) que nous allons détailler dans la prochaine partie.

2. CHIMIOMÉTRIE

Selon Geladi (1995), la chimiométrie (en anglais *chemometrics*) est la « science de l'utilisation des méthodes mathématiques, statistiques et informatiques dans le but d'améliorer l'extraction des informations obtenues à partir des données analytiques ».

En d'autres termes, la chimiométrie peut être définie comme la branche de la chimie qui utilise les outils mathématiques et statistiques pour construire et sélectionner les expériences de manière à en extraire le maximum d'informations grâce à une analyse des données pertinente. Pour notre domaine d'étude, elle représente plus exactement l'ensemble des traitements mathématiques et statistiques des spectres.

L'objectif de cette étude est de relier le spectre de réflectance d'une feuille à son état hydrique. Il s'agit donc d'utiliser la chimiométrie pour déterminer la teneur en eau de la feuille analysée. Comme la spectrométrie est pour notre étude une méthode indirecte, il est nécessaire avant toute mesure d'établir un étalonnage basé sur un modèle empirique (Figure 44) permettant de prédire les indices FMC et EWT à partir des données spectrales.

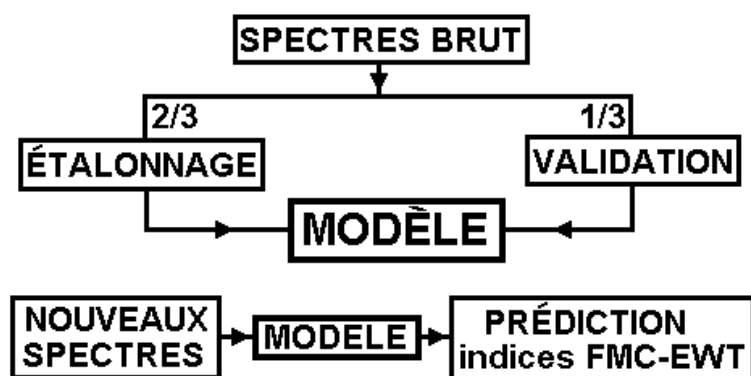


Figure 44. Démarche de modélisation du spectre

L'étalonnage (en anglais *calibration*) du modèle implique la recherche de relations de prédiction entre les spectres et les données de teneur en eau (FMC et EWT) de référence. Pour créer ce modèle, des échantillons de feuilles suffisamment représentatifs (grande variance d'état hydrique) sont considérés. On calcule les indices FMC et EWT de ces échantillons par les méthodes classiques (cf. chapitre 2). Ces valeurs tiendront lieu de **valeurs de référence** pour notre modèle. Ensuite on mesure les spectres de ces échantillons ; puis on introduit les données spectrales et les valeurs de références dans une **équation d'étalonnage**. Le contrôle de l'acquisition des spectres bruts est primordial.

2.1. ÉTALONNAGE DES DONNÉES

Les équations d'étalonnage sont des fonctions mathématiques construites en utilisant un jeu de données d'étalonnage (spectres et indices de référence). Elles seront ensuite appliquées pour prédire le contenu en eau de nouveaux échantillons à partir de la mesure de leur spectre.

L'équation d'étalonnage est établie à l'aide de méthodes statistiques dont le modèle de régression général est :

$$\text{Équation 16.} \quad \hat{Y} = X \cdot b + b_0 \text{ avec } Y = X \cdot b,$$

où $\hat{Y} = \{\hat{y}_{n,p}\}$ est la matrice des données prédites pour n échantillons et p indices de teneur en eau,

$Y = \{y_{m,p}\}$ est la matrice des données de référence pour m échantillons et p indices de teneur en eau (1 ou 2),

$X = \{x_{n,q}\}$ est la matrice des données spectrales pour n échantillons et q longueurs d'onde,

b représente la matrice des constantes d'étalonnage (coefficients du modèle à estimer) et b_0 la matrice des résidus.

L'Équation 16 s'écrit aussi :

$$\text{Équation 17.} \quad \hat{Y} = X \cdot b + b_0 \text{ avec } X^t \cdot Y = (X^t \cdot X) b.$$

Du point de vue mathématique, l'inconnue b ne peut être déterminée que dans le cas où n est supérieur à q (condition pour inverser $X^t \cdot X$), c'est-à-dire lorsque le nombre d'échantillons est supérieur au nombre de longueurs d'onde. Dans ce cas on a :

$$\text{Équation 18.} \quad \hat{Y} = X \cdot b + b_0 \text{ avec } b = (X^t \cdot X)^{-1} \cdot X^t \cdot Y.$$

Mais pour notre étude le nombre d'échantillons est très inférieur au nombre de longueurs d'onde : on est en **surdimensionnement**.

On distingue alors deux sortes de méthodes d'étalonnage pour résoudre cette équation :

- les méthodes factorielles,
- les méthodes sélectives.

2.1.1. MÉTHODES FACTORIELLES

Les méthodes factorielles utilisent l'**ensemble de l'information spectrale**. Le principe de ces méthodes est de trouver des combinaisons significatives de la variable explicative X (spectres) et de n'utiliser que ces combinaisons pour la régression avec la variable expliquée Y (indices de teneur en eau) (Martens et Naes 1989). **Elles permettent donc de réduire le nombre de variables en un petit nombre de facteurs.**

2.1.1.1. **CHOIX ET RÉDUCTION DU NOMBRE DE FACTEURS**

Dans notre étude, nous devons manipuler des matrices de 2100 par 2100 et les inverser. La recherche des meilleures combinaisons de longueurs d'onde en régression multiple ou en analyse discriminante peut demander des temps de calcul longs. Pour les limiter, on choisit donc de réduire le nombre de facteurs des spectres (longueurs d'onde) tout en conservant le maximum d'informations (Roger *et al.*, 2002). Pour limiter le nombre de longueurs d'onde nous utilisons principalement l'Analyse en Composantes Principales (ACP).

Après avoir réduit le nombre de facteurs, les méthodes factorielles sont appliquées aux spectres simplifiés. On trouve parmi les méthodes factorielles la régression aux moindres carrés partiels PLS (*Partial Least Square*) et la PCR (*Principle Component Regression*).

2.1.1.2. **LA RÉGRESSION PARTIAL LEAST SQUARE PLS**

La grande majorité des applications en NIRS (*near infrared reflectance spectroscopy*) repose sur des méthodes prédictives (dites supervisées) et linéaires pour la prévision de variables quantitatives, comme la méthode PLS. La régression aux moindres carrés partiels PLS consiste en la combinaison d'analyses en composantes principales ACP et de régressions linéaires multiples MLR (*multiple linear regression*). Dans le modèle PLS, la compression des valeurs spectrales et l'étalonnage se font ensemble. La méthode maximise la covariance entre les données étudiées et les combinaisons linéaires des données spectrales, réduisant l'impact des grandes variations du spectre (Martens et Jensen 1982, Shenk et Westerhaus 1991b). En réduisant le nombre de longueurs d'onde en un petit nombre de facteurs orthogonaux, la PLS évite certains problèmes de colinéarité et de bruit aléatoire (Wold *et al.* 1984 et 2001, Martens et Naes 1989).

2.1.2. MÉTHODE SÉLECTIVE DE RÉGRESSION MULTIPLE PAS À PAS

Contrairement aux méthodes factorielles précédentes, les méthodes sélectives utilisent **seulement une partie du spectre**. Dans notre étude, la régression linéaire multiple pas à pas ascendante (*ascending stepwise multiple linear regression* MLR) est utilisée. Elle commence par la sélection d'une première longueur d'onde donnant le meilleur coefficient de détermination (r^2) avec la donnée. On ajoute alors successivement les longueurs d'onde qui améliorent ce coefficient.

A chaque pas, des tests statistiques (*Student*, *F*) sont réalisés pour éliminer d'éventuelles longueurs d'onde non significatives. L'algorithme s'arrête lorsque l'addition d'une nouvelle longueur d'onde n'apporte pas d'amélioration supplémentaire dans l'explication du paramètre étudié. Cette méthode présente toutefois des limites lorsque les paramètres étudiés sont inter-corrélés (Curran *et al.*, 1992). On peut alors sélectionner des longueurs d'onde non significatives pour le paramètre à déterminer, en l'occurrence la teneur en eau ! Dans le cas de notre étude, nous limitons la sélection à 20 variables.

2.2. VALIDATION DES MODÈLES

Une fois les équations d'étalonnage du modèle établies, on peut donc prédire les indices de teneur en eau de nouveaux échantillons à partir de leurs données spectrales. Afin de sélectionner les meilleurs modèles, on étudie qualitativement les phases de création (étalonnage) et d'application (prédiction) du modèle.

2.2.1. ÉCART-TYPE D'ÉTALONNAGE

La qualité d'une équation d'étalonnage est donnée par son écart-type SEC (*standard error of calibration*). On l'obtient en faisant la moyenne géométrique des différences entre les valeurs de référence et les valeurs prédites par le modèle :

Équation 19.
$$SEC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - q' - 1}},$$

avec $(y_i)_{[1,n]}$ les valeurs de référence de la teneur en eau,

$(\hat{y}_i)_{[1,n]}$ les valeurs prédites de la teneur en eau,

n le nombre de spectres,

q' le nombre de longueurs d'onde sélectionnées pour construire le modèle.

Le meilleur modèle est celui dont le SEC est minimal.

2.2.2. ÉCART-TYPE DE PRÉDICTION

Pour évaluer la qualité de la prédiction, on réalise un test de validation sur un groupe d'échantillons autre que celui ayant servi à la création du modèle d'étalonnage (*Figure 44*).

L'écart-type de prédiction SEP (*standard error of prediction*)²⁷ correspond à la moyenne quadratique des différences entre les valeurs de référence et les valeurs prédites :

Équation 20.
$$SEP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}},$$

avec $(y_i)_{[1,n]}$ les valeurs de référence de la teneur en eau,
 $(\hat{y}_i)_{[1,n]}$ les valeurs prédites de la teneur en eau,
 n le nombre de spectres.

En général le SEP est supérieur au SEC.

On utilise également l'écart-type des valeurs de référence SD (*standard deviation*) défini par :

Équation 21.
$$SD = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{n(n-1)}},$$

avec $(y_i)_{[1,n]}$ les valeurs de référence de la teneur en eau,
 n le nombre de spectres.

Le rapport $\frac{SD}{SEP}$ est souvent utilisé comme descriptif d'un bon modèle (Williams, 1992).

²⁷ aussi noté RMSEP (*root mean square error of prediction*)

2.2.3. ÉCART-TYPE DE VALIDATION CROISÉE

Si le nombre d'individus n'est pas assez important pour pouvoir calculer, dans de bonnes conditions d'effectifs, les écart-types SEC puis SEP, on utilise la méthode classique de validation croisée (Wold, 1978). On emploie alors l'écart-type de validation croisée SECV (*standard error of cross validation*). Les spectres sont séparés en k ensembles de même taille, choisis aléatoirement : $\{(X_1, Y_1) \dots (X_k, Y_k)\}$. Les k modèles partiels et les k $\hat{y}_i$ estimés sont ensuite obtenus à partir des données X (spectres) et Y (teneur en eau). On a :

Équation 22.
$$SECV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (y_i - \hat{y}_i)^2}{k}}$$

avec $(y_i)_{[1,k]}$ les valeurs de référence de la teneur en eau,
 $(\hat{y}_i)_{[1,k]}$ les valeurs prédites de la teneur en eau,
 k le nombre d'ensembles.

Comme les k ensembles sont choisis aléatoirement, si on recalcule plusieurs fois l'indice SECV, on obtient des valeurs différentes (excepté le cas où le nombre d'ensemble est égal au nombre d'individus). La méthode de validation croisée est réalisée un grand nombre de fois en faisant varier le nombre d'individus par ensemble (n/k). On retient le rapport qui produit le SECV optimal.

Les indices SECV et SEP sont de bons estimateurs des capacités de prédiction du modèle d'étalonnage. Selon Williams (1990), si le SECV ou le SEP approche l'écart-type initial des données, le modèle créé n'est pas très efficace. Selon lui, un ratio de 3 est un seuil raisonnable pour un modèle de qualité. En d'autres termes, la variabilité de prédiction du modèle doit être au moins 3 fois plus faible que la variabilité initiale des données ($SD/SECV \geq 3$). Comme dans notre étude le nombre d'individus est faible, nous utilisons le SECV plutôt que le SEP.

3. SPECTROSCOPIE PROCHE INFRAROUGE DES FEUILLES FRAÎCHES DE VÉGÉTATION MÉDITERRANÉENNE ET SIMULATION DES CAPTEURS SATELLITAIRES

3.1. ÉTAT DE L'ART

Plusieurs études de laboratoire montrent des **relations entre le contenu en eau d'une feuille fraîche et son spectre de réflectance** dans le domaine optique (Thomas *et al.* 1971, Hunt *et al.* 1987, Hunt et Rock 1989, Bowman 1989, Carter 1991, Cohen 1991a, Danson *et al.* 1992, Méthy *et al.* 1998, Yu *et al.* 2000). En général ces travaux portent sur les caractéristiques d'absorption de l'eau dans la partie proche infrarouge (PIR) et moyen infrarouge (MIR) du spectre. Plusieurs études développent des **indices spectraux** ou des rapports entre les valeurs de réflectance à certaines longueurs d'onde, comme le rapport entre 1650 et 2220 nm (Elvidge et Lyon, 1985).

Habituellement le matériel végétal employé est composé de feuilles détachées de leur branche qui sèchent à l'air libre. Un spectroradiomètre mesure le processus de déshydratation de la feuille provoquée en laboratoire pendant plusieurs heures. Les spectres observés sont ensuite reliés à la teneur en eau calculée. Les changements observés dans le spectre d'absorption de la feuille proviennent à la fois de la perte d'eau par transpiration mais aussi des modifications de structure et de composition (pigments, sucres) de la feuille. Selon nous, dans la mesure où l'on provoque un stress à des feuilles coupées, les changements spectraux observés ne peuvent pas expliquer des changements physiologiques ou biochimiques réellement dus à l'ajustement osmotique de la plante entière en réponse à une restriction d'eau.

De plus, les variations intra et inter-spécifiques de l'épaisseur des feuilles, de leur structure, de leur teneur en matière sèche, rajoutent de l'**hétérogénéité dans les réflectances mesurées** et rendent difficile le lien entre les spectres et la teneur en eau des feuilles (Carter 1991, Cohen 1991b, Ceccato *et al.* 2001). Aussi, lorsque les indices spectraux définis pour des feuilles stressées en laboratoire, sont utilisés pour des feuilles de plantes réellement en manque d'eau, ces indices ne remarquent que les grands changements de teneur en eau et ne sont pas adaptés pour détecter le début d'un stress hydrique (Thomas *et al.* 1971, Hunt *et al.* 1987). Il est donc difficile d'obtenir des informations pertinentes sur la liaison entre les propriétés spectrales de feuilles fraîches et leur état hydrique physiologique.

Dans le cadre de notre étude, nous proposons donc de **mesurer le spectre de réflectance pour les feuilles de la plante entière subissant un stress hydrique naturel sur le terrain et non un stress provoqué en laboratoire sur la feuille seule**. En d'autres termes, la question scientifique posée est la suivante : Est-ce que les changements physiologiques et biochimiques d'une feuille, liés à l'adaptation de la plante entière à un manque d'eau, peuvent être exprimés par les changements de son spectre de réflectance ?

3.2. PROTOCOLES ET MATÉRIELS

Afin de recueillir les informations nécessaires aux objectifs posés, nous proposons deux protocoles expérimentaux de laboratoire, le premier assez lourd pour caractériser le comportement spectral de deux chênes méditerranéens, le second plus léger pour mesurer la réflectance des feuilles de trois espèces selon différentes conditions d'état hydrique.

3.2.1. LE MATÉRIEL VÉGÉTAL À PRÉLEVER

Le matériel végétal utilisé pour les mesures de spectroscopie provient d'une garrigue proche de Montpellier. Trois espèces méditerranéennes sont considérées : le chêne vert QI (*Quercus ilex*), le chêne kermès QC (*Quercus coccifera*) et l'arbousier AU (*Arbutus unedo*). Pour chaque espèce, des branches entières sont prélevées pendant les étés 2001 et 2002 puis stockées au frais et à l'abri de la lumière afin de limiter leur modification physiologique. Toutes les expériences sont menées en laboratoire dans les trois heures suivant le prélèvement. L'élément végétal support est la **feuille**, qui pour des raisons techniques doit présenter une **surface supérieure à 0,6 cm²**. Pour le chêne vert, des feuilles de deux années se côtoient sur une même branche ; seules les nouvelles feuilles de l'année sont utilisées pour les mesures de spectroscopie.

3.2.2. PROTOCOLES DE MESURE

3.2.2.1. *ÉTUDE DU COMPORTEMENT SPECTRAL DES FEUILLES DE DEUX CHÊNES MÉDITERRANÉENS*

Pendant l'été 2001 l'étude spectrale porte sur les deux chênes QC et QI. Les mesures spectrales s'effectuent lors de trois campagnes de prélèvement (2 et 23 août et 12 septembre) et un total de 50 spectres est traité. On mesure conjointement la réflectance et la transmittance des faces supérieures et inférieures de chaque feuille. L'appareil est calibré en réflectance et les données de transmittance sont corrigées par un spectre étalon. La teneur en eau est également mesurée suivant la méthode classique d'étuvage. L'indice FMC est calculé.

3.2.2.2. *MESURE DE LA RÉFLECTANCE DE FEUILLES PAR SPECTROSCOPIE ET CALCUL DE LEUR ÉTAT HYDRIQUE*

Pendant l'été 2002, l'étude spectrale porte sur les trois espèces méditerranéennes AU, QC et QI. Pour chaque espèce, on mesure uniquement la réflectance de la face supérieure des feuilles. Une centaine d'échantillons est traitée par espèce. En parallèle, la teneur en eau des feuilles est calculée et leur surface est mesurée pour calculer les indices FMC et EWT.

3.2.3. MATÉRIELS EXPÉRIMENTAUX

3.2.3.1. LE SPECTRORADIOMÈTRE

L'appareil utilisé est un spectroradiomètre portable de marque ASD[®] (*Analytical Spectral Devices*[®]) à barrettes de diodes (Tableau 24).

Tableau 24. Caractéristiques techniques du spectroradiomètre ASD FieldSpec™FR (d'après ASD, 2002)

Critères	Caractéristiques		
Composants	3 spectromètres		
Longueurs d'onde	350-1000 nm	1000-1800 nm	1800-2500 nm
Matériaux	barrette de silice de 512 photodiodes	barrette InGaAs ²⁸	barrette InGaAs étendue
Résolution spectrale	3 nm	10 nm	
Largeur d'échantillonnage	1,4 nm	2 nm	
Nombre total de canaux bruts	1512		
Nombre total de canaux interpolés	2151 au pas de 1 nm		
Précision des longueurs d'onde	+/- 1 nm		
Temps d'acquisition	10 spectres par seconde		

L'échantillon est illuminé par un rayon polychromatique (lampe halogène) dispersé par un monochromateur. Les trois barrettes composées de diodes photosensibles sont placées dans le plan de dispersion du monochromateur. Chaque diode enregistre donc l'intensité de la lumière correspondant à une longueur d'onde donnée.

Le spectroradiomètre ASD[®] s'utilise avec plusieurs types de modèles d'exploitation FieldSpec[™] qui diffèrent selon leur gamme de mesures. Nous avons utilisé le modèle FR qui permet les applications les plus larges. Les spectres, exportés en format « texte », sont ensuite traités au moyen du logiciel Matlab[®], choisi pour sa rapidité d'exécution (nécessité d'inverser des matrices de plus de 2000 x 2000).

Pour notre protocole, chaque spectre mesuré par le spectroradiomètre correspond à la moyenne de 30 acquisitions.

3.2.3.2. LE COUPLAGE D'UNE SPHÈRE D'INTÉGRATION

Nous utilisons comme source lumineuse une lampe halogène QTH de 50 watts, filtrée par un système de prismes et de lentilles. Le rayonnement incident est ensuite réfléchi par la surface de l'échantillon.

Deux cas se présentent alors (Figure 45) :

- Si l'énergie qui pénètre une ou plusieurs particules de la feuille est réfléchi dans toutes les directions, nous sommes dans le cas de la **réflexion diffuse** (lambertienne).
- Si la lumière est réfléchi selon une seule direction et si l'angle de la lumière réfléchi est égal à l'angle d'incidence du rayon, nous sommes dans le cas de la **réflexion spéculaire**. Celle-ci peut s'avérer gênante et venir perturber la mesure de la composante diffuse.

²⁸ barrettes de semi-conducteurs indium-gallium-arsenic

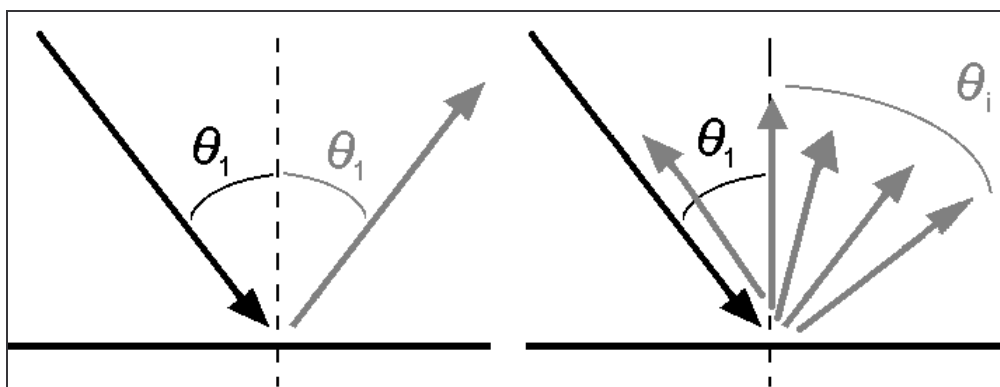


Figure 45. Réflexion spéculaire (à gauche) et diffuse (à droite)

La variation angulaire de la réflectance des feuilles est intermédiaire entre ce qui est observé pour une surface diffuse et pour une surface spéculaire. En effet, le rayonnement sortant de la feuille est composé d'une fraction diffusée par les tissus internes et variant en fonction de la longueur d'onde, et d'une fraction due à la réflexion spéculaire à la surface de la feuille et qui ne varie pas spectralement.

Pour minimiser la réflexion spéculaire et considérer un rayonnement réfléchi diffus, on utilise soit une configuration optique désaxée à l'aide de miroirs elliptiques, soit la somme des rayonnements réfléchis par l'intermédiaire d'une sphère d'intégration.

Dans notre cas nous utilisons une **sphère d'intégration externe** LI-1800-12 reliée au spectroradiomètre par une fibre optique (EUROSEP Instruments, 2001). La sphère se caractérise par une forte sensibilité, des étalonnages robustes et des mesures bien reproductibles d'échantillon à échantillon, notamment dans le cas d'échantillons hétérogènes. L'intérieur est recouvert d'une couche de sulfate de baryum (BaSO_4), matériau permettant une réflectance et une diffusion maximales de la lumière. Nous précisons toutefois que le BaSO_4 a tendance à s'humidifier en captant la vapeur d'eau de l'atmosphère, nécessitant des corrections supplémentaires.

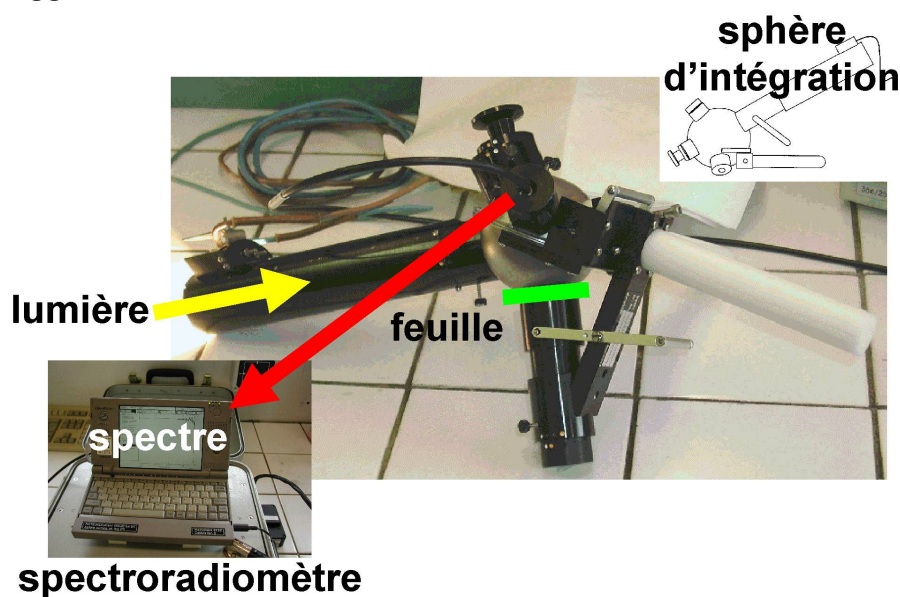


Figure 46. Protocole expérimental : sphère d'intégration couplée au spectroradiomètre

Pour la mesure, chaque feuille est placée à l'extérieur de la sphère. Les différents composants de la sphère sont placés selon deux configurations pour mesurer soit la réflectance (capteur et lampe du même côté), soit la transmittance de l'échantillon (lampe et capteur situés de part et d'autre de l'échantillon).

3.2.3.3. AUTRES MATÉRIELS

Pour mesurer la surface des feuilles nous utilisons un planimètre laser (CI-203 *Portable Laser Area Meter*). La surface de chaque feuille correspond à la moyenne de deux mesures. La précision de l'appareil est de l'ordre de 0,1 mm². Étant donnée la faible masse des échantillons (<0,2 g), nous utilisons une balance de précision à 10⁻⁴ g pour mesurer les masses fraîches et sèches de nos échantillons.

3.2.3.4. ERREURS ET INCERTITUDES

3.2.3.4.1 ÉTALONNAGE ET CORRECTION DES MESURES DE TRANSMITTANCE

Selon la loi de Kirschhoff la somme de Réflectance+Absorptance+Transmittance est égale à 1. Néanmoins la répartition de ces trois composantes de la lumière incidente est variable selon la longueur d'onde. L'absorptance est majoritaire dans la partie visible de la lumière (400-700 nm) ; la réflectance et la transmittance sont majoritaires dans le proche infrarouge (750-1300 nm).

En 2001, les spectres obtenus présentent des incohérences. La somme de la réflectance et de la transmittance pour une face de feuille donnée est souvent supérieure à 1, notamment dans les gammes de longueurs d'onde de 800 à 1200 nm ! L'étalonnage de l'appareil est nécessaire car la sphère comporte des petites imperfections en elle-même et n'est donc pas parfaitement diffuse et réfléchissante.

Dans le cas de la mesure de la réflectance, la valeur relevée est étalonnée aux bornes de la plage de mesure, avec une référence blanche $\rho = 1$ (pastille de sulfate de baryum) et une référence noire $\rho = 0$ (bouchon noir). Attention : le sulfate de baryum est loin de réfléchir 100% de la lumière, en particulier dans le proche et moyen infrarouge. De même, il est difficile de fabriquer des échantillons absorbant entièrement la lumière (cônes peints en noir ou lames de rasoir en piège optique) . En ce qui concerne notre protocole, l'appareil est étalonné en réflectance tous les 20 échantillons.

Dans le cas de la mesure de la transmittance, la feuille échantillon est éclairée à l'extérieur de la sphère et la lumière la traversant (rayonnement transmis) est réfléchi et intégrée par la surface interne blanche de la sphère. Ce rayonnement transmis est mesuré par le spectroradiomètre en un point de la sphère. On remarque qu'il n'y a pas d'étalonnage disponible avec l'appareil. De plus, lors de la mesure de la transmittance, la configuration de la sphère pose problème car un bouchon noir (absorbant) ferme un orifice de la sphère, laquelle n'est donc plus totalement réfléchissante.

Pour mesurer l'effet de ce bouchon, Verney-Carron (2002) caractérise un échantillon-étalon de calque en transmittance diffuse pour le matériel employé. Elle commence par déterminer les propriétés optiques du calque par l'intermédiaire du modèle de Stokes en le superposant sur fond standard (blanc, gris ou noir). Elle mesure ensuite au spectroradiomètre la réflectance puis la transmittance. Elle montre alors que pour la partie non bruitée du spectre (entre 350 et 1800 nm), la valeur mesurée est supérieure à la valeur théorique. L'erreur sur la réflectance est minime (1,6% en moyenne) alors que celle sur la transmittance n'est pas négligeable (11,2% en moyenne) (Figure 47). La courbe de correction des transmittances est donc appliquée à l'ensemble des spectres pour les redresser.

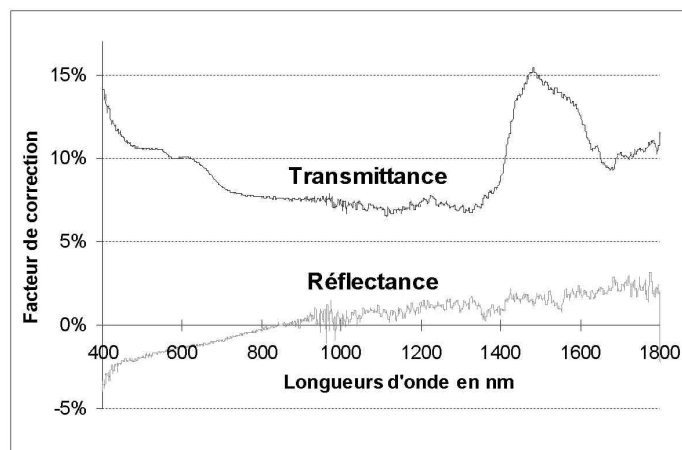


Figure 47. Facteur de correction des spectres en réflectance et transmittance de 400 à 1800 nm (d'après Verney-Carron, 2002)

3.2.3.4.2 COMPOURTEMENT DE L'ÉCHANTILLON AU COURS DE LA MESURE

La manipulation consiste à effectuer 10 opérations dans un temps minime.

Liste chronologique des tâches :

- choisir et détacher une feuille de la branche prélevée en garrigue
- peser la feuille (poids humide 1)
- mesurer la réflectance de la face supérieure
- mesurer la réflectance de la face inférieure
- changer la configuration de la sphère pour permettre la mesure de la transmittance
- mesurer la transmittance de la face inférieure
- mesurer la transmittance de la face supérieure
- peser la feuille à nouveau (poids humide 2)
- mesurer la surface de la feuille (2 fois)
- stocker dans un sachet et étiqueter

L'échantillon manipulé est soumis à un éclairage puissant (50 watts) produisant un dessèchement rapide de l'échantillon pendant la mesure. La différence entre la masse de l'échantillon en début et en fin d'expérience est significative : l'échantillon perd en moyenne 1,5% de sa masse. Par rapport à la variation annuelle de l'état hydrique de la feuille, c'est énorme : près de 10% de la variation annuelle obtenue en quelques minutes de manipulation ! Ainsi seule la réflectance de la face supérieure des feuilles est comparée aux indices d'état hydrique calculé (FMC et EWT). Cette mesure de réflectance est consécutive à la pesée, limitant ainsi le dessèchement et les erreurs. Le spectre obtenu correspond bien à l'état hydrique de la feuille lors de la pesée. En revanche cela n'est pas le cas pour les autres mesures spectrales redondantes et moins précises.

3.2.3.4.3 PRÉCISION DES MESURES SPECTRALES

Il est difficile de calculer une précision des mesures spectrales. Elles dépendent du réglage et de la qualité des appareils de mesure, des conditions d'expérience. Certaines conditions sont restées relativement constantes pendant les mesures : laboratoire climatisé, échantillons à température stable. Les phases de calibrage des capteurs ont été réalisées en suivant les instructions des fabricants. La précision des longueurs d'onde est de 1 nm et la résolution spectrale de 3 à 10 nm interpolée au pas de 1 nm (Tableau 24).

3.2.3.4.4 PRÉCISION DES INDICES DE TENEUR EN EAU

Nous calculons les deux indices FMC et EWT pour décrire l'état hydrique des feuilles. La précision de ces indices dépend de la propre précision du matériel utilisé (balance, planimètre) et de la variabilité du paramètre à observer (Figure 48).



Figure 48. Balance électronique et planimètre laser

Dans le cadre général du suivi spatio-temporel de l'état hydrique de la végétation, présenté au chapitre 2, nous prélevons pour chaque échantillon un grand nombre de feuilles (20 grammes par boîte) et la précision de la mesure est bonne ($\pm 1,2 \cdot 10^{-3}$ en moyenne pour l'indice FMC).

En revanche pour le calcul de l'indice FMC d'une seule feuille, même avec une balance de bonne précision, l'erreur de mesure est plus forte ($\pm 3,2 \cdot 10^{-3}$) (Tableau 25).

Tableau 25. Indices de teneur en eau et précision

Indices	Δ_1 : erreur max. moyenne	Application numérique	Δ_2 : variations annuelles	Δ_2 / Δ_1
FMC	$\pm 3,2 \cdot 10^{-3}$	si FMC=0,85 alors $0,8468 < \text{FMC} < 0,8532$	$\pm 4 \cdot 10^{-1}$	125
EWT	$\pm 4,2 \cdot 10^{-5}$	si EWT=0,0135 alors $0,013458 < \text{EWT} < 0,013542$	$\pm 6 \cdot 10^{-3}$	143

Il est important de comparer la précision des mesures à la variabilité annuelle des indices pour une même espèce. Dans ce cas, l'erreur de calcul des indices FMC et EWT est très acceptable car plus de cent fois inférieure à la variation annuelle de l'indice.

3.3. RÉSULTATS

3.3.1. RÉFLECTANCE, ABSORPTANCE ET TRANSMITTANCE DE FEUILLES TYPES

La mesure des propriétés optiques des feuilles de deux chênes par spectroradiométrie de laboratoire nous permet d'observer les différences de comportement des deux faces des feuilles sur un large spectre (400 à 2400 nm). La Figure 49 représente la répartition R-A-T moyenne pour chaque espèce.

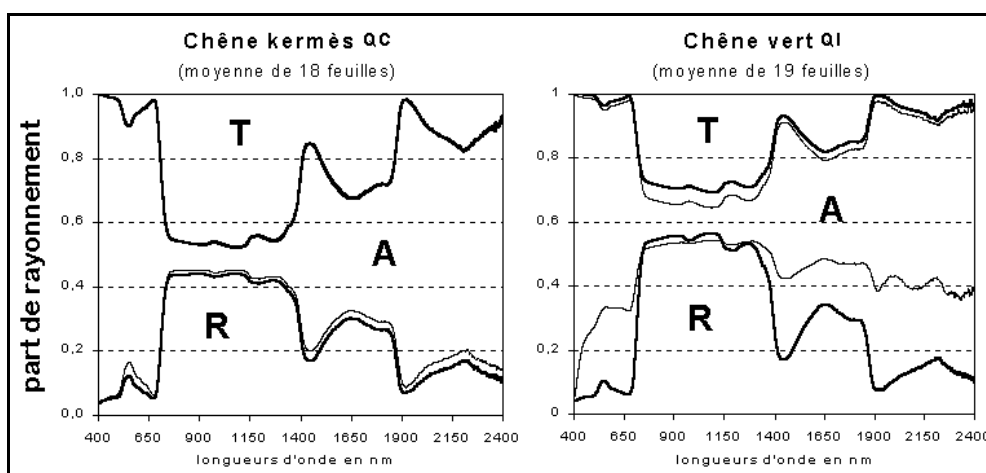


Figure 49. Propriétés optiques moyennes des feuilles de chêne kermès QC et de chêne vert QI (face supérieure : trait épais, face inférieure : trait fin)

Pour le chêne kermès QC, la différence de réflectance entre les deux faces des feuilles est faible et la transmittance quasi-identique.

Pour le chêne vert QI en revanche, la face inférieure est beaucoup plus réfléchissante, dans la partie visible (400-700 nm) et moyen infrarouge (1400-2400 nm) du spectre, et plus transmittante dans le proche infrarouge (800-1300 nm). Ceci s'explique par la présence de poils absorbants microscopiques sur la face inférieure plus claire des feuilles de chêne vert (Roussel, 1961).

L'étude des spectres met aussi en évidence une différence des réflectances des feuilles selon leur teneur en eau (Figure 50).

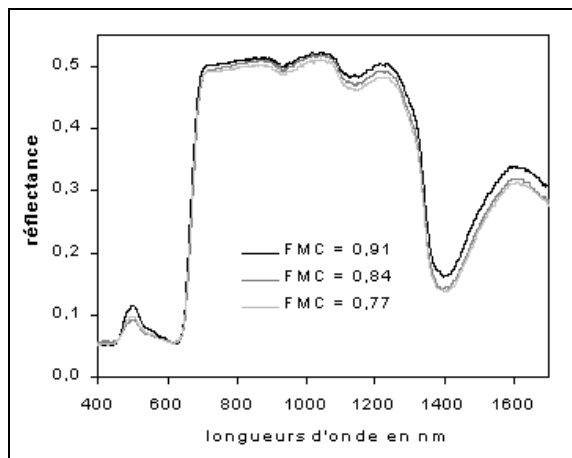


Figure 50. Exemple de spectre de réflectance de la face supérieure de feuilles de chêne vert QI pour trois valeurs de FMC

La zone 1200-1700 nm du spectre présente des différences de valeurs de réflectance (de 1 à 4%). Ces variations observées sont vraisemblablement provoquées par les différences d'état hydrique des feuilles. Les autres paramètres décrivant les feuilles (espèce, stade phénologique, teneur en chlorophylle, structure anatomique) n'interviennent pas ici. Cette zone du spectre « fin proche infrarouge - début moyen infrarouge » serait donc plus sensible au contenu en eau des feuilles que le visible ou le début du proche infrarouge. Il est à noter que cette partie du spectre (1200-1700 nm) est rarement mesurée par les satellites d'observation de la Terre (chapitres 5 et 6).

3.3.2. MODÉLISATION DES SPECTRES DE RÉFLECTANCE POUR ESTIMER L'ÉTAT HYDRIQUE DES FEUILLES

3.3.2.1. *DONNÉES INITIALES*

Nous mesurons en laboratoire le spectre de réflectance de 100 feuilles de trois espèces AU, QC et QI. Nous calculons également les indices d'état hydrique FMC et EWT pour chaque feuille (Figure 51).

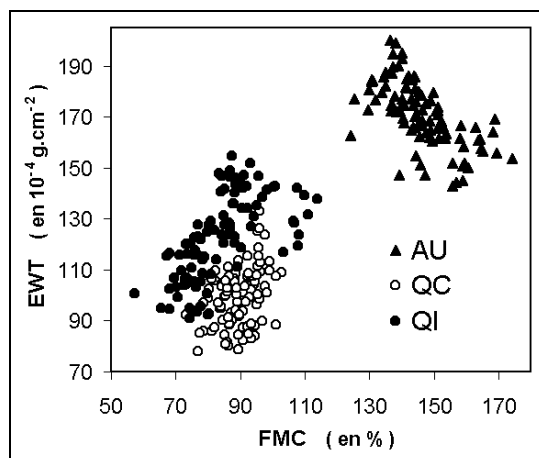


Figure 51. Répartition des échantillons selon les indices FMC et EWT

L'observation des distributions des individus (Figure 51) met en évidence la continuité des valeurs d'EWT et de FMC avec deux groupes distincts (QC-QI et AU).

Six échantillons sont éliminés du fait d'erreurs de mesure (pesées aberrantes, mesure de la surface foliaire erronée). On a ainsi 294 échantillons (Tableau 26).

Tableau 26. Description des échantillons prélevés sur le terrain (FMC en % et EWT en 10^{-4} g.cm $^{-2}$)

Espèce	Effectif	Amplitude		Moyenne		Écart-type	
		FMC	EWT	FMC	EWT	FMC	EWT
AU	97	124 - 174	143 - 200	146,3	170,8	10,3	12,7
QC	99	73 - 103	78-133	89,4	99,0	6,3	11,3
QI	98	57 - 114	91-155	84,4	123,1	11,4	16,5
Toutes	294	57 - 174	78 - 200	106,4	130,6	29,7	32,8

Pour la phase de chimiométrie (traitement statistique des spectres), nous disposons d'un total de 294 spectres, de 2 indices (FMC et EWT) et de 2001 valeurs de réflectance (de 400 à 2400 nm au pas de 1 nm).

L'analyse en composantes principales (ACP) des spectres met en évidence une bonne distinction des trois espèces suivies (Figure 52). Le spectre de réflectance d'une feuille est donc un critère de différenciation de l'espèce.

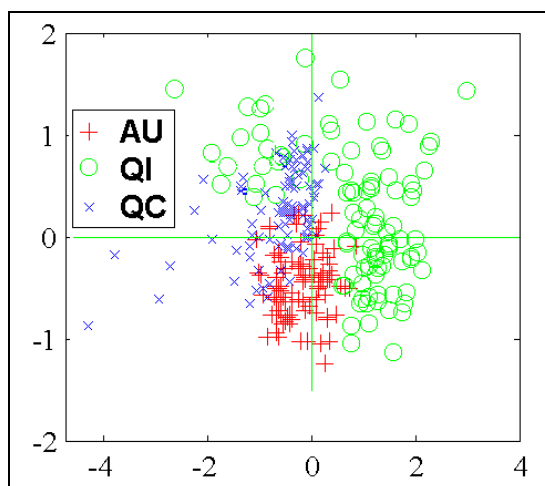


Figure 52. ACP des spectres de réflectance selon l'espèce

3.3.2.2. CORRÉLATION DES SPECTRES AUX INDICES D'ÉTAT HYDRIQUE

D'un point de vue global, les spectres sont reliés aux deux paramètres (FMC et EWT) de façon hétérogène selon les longueurs d'onde et l'espèce (Figure 53).

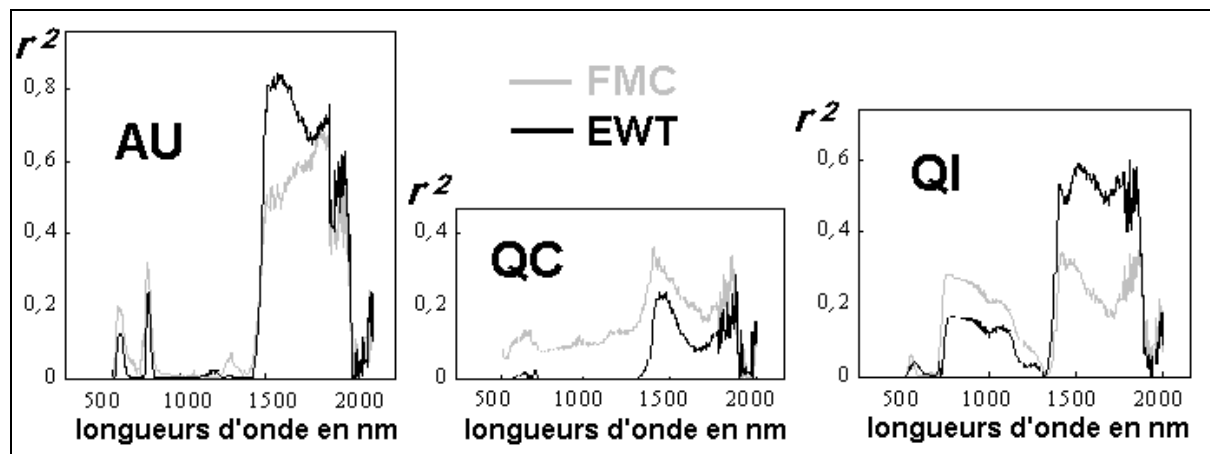


Figure 53. Corrélation moyenne r^2 entre la réflectance des feuilles de 400 à 2000 nm et les indices FMC et EWT pour trois espèces AU, QC et QI

Les corrélations sont faibles pour le chêne kermès QC, moyennes pour le chêne vert QI et fortes pour l'arbousier AU.

Dans le cas des trois espèces regroupées (Figure 54), les résultats sont intéressants, mettant en évidence des longueurs d'ondes (1450 nm, 1880 nm, 2030 nm...) fortement reliées à l'état hydrique des feuilles.

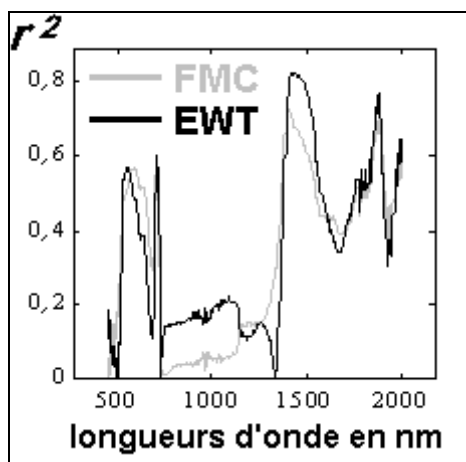


Figure 54. Corrélation moyenne r^2 entre la réflectance des feuilles de 400 à 2050 nm et les indices FMC et EWT pour les trois espèces confondues AU, QC et QI

On remarque que la longueur d'onde 1450 nm est déjà connue comme étant un lieu privilégié d'absorption de la molécule d'eau (transitions vibrationnelles $\nu_1 + \nu_3$). L'indice EWT présente en général un meilleur coefficient de détermination r^2 que l'indice FMC. En d'autres termes, au niveau d'une feuille, la réflectance mesurée dépend d'abord de l'état hydrique surfacique plutôt que d'une humidité intrinsèque de cette feuille. L'indice EWT équivaut à la représentation d'une lame d'eau sur la feuille interférant sur le rayonnement incident. Nous précisons donc qu'à partir de ce point, **les traitements qui suivront porteront exclusivement sur l'indice EWT.**

3.3.2.3. PRÉ-TRAITEMENT DES SPECTRES

La Figure 53 et la Figure 54 précédentes mettent en évidence des phénomènes d'oscillation des spectres dès 1800 nm. Cette fluctuation est due à la technologie employée par le spectroradiomètre, à savoir une barrette InGaAs normalement prévue pour des longueurs d'onde de 1000 à 1800 nm et étendue jusqu'à 2500 nm (Tableau 24). La précision des mesures est donc moins bonne au-delà de 1800 nm et un bruit apparaît. Les barrettes satellitaires au-delà de 1200 nm utilisent souvent la technologie HgCdTe²⁹, comme le capteur MODIS.

Les spectres bruts sont donc recalculés à partir de fonctions mathématiques pour enlever une partie du bruit. La méthode employée dans notre étude est la fonction dite de Savitsky et Golay qui comporte trois paramètres d'ajustement (a , b , c) : a représente la taille de la fenêtre de travail et est impair, b le degré du polynôme ajusté sur la fenêtre et c l'ordre de la dérivée (1^{ère} ou 2^{nde}) du spectre sur la fenêtre.

3.3.2.4. MÉTHODE D'ÉTALONNAGE-VALIDATION RETENUE

Après pré-traitement des 294 spectres, l'ensemble des tests statistiques réalisés s'applique à l'indice EWT. Deux méthodes d'étalonnage de l'EWT sont comparées :

- la régression PLS (*partial least square*) sur tout le spectre,
- la régression linéaire multiple pas à pas ascendante (*ascending stepwise multiple linear regression* MLR) sur des longueurs d'onde sélectionnées.

Pour la phase de validation-croisée de ces modèles d'étalonnage, on utilisera des ensembles (*blocks*) d'environ 10 spectres chacun (soit 294 spectres divisés en 30 ensembles).

Les modèles d'étalonnage par PLS donnent d'assez mauvais résultats dans l'ensemble. Pour l'arbousier par exemple, le modèle PLS est peu précis comparé au modèle MLR (Tableau 27).

Tableau 27. Qualité des modèles PLS et MLR pour l'arbousier

	PLS	MLR
r^2	0,55	0,88
Facteurs	3	4
SECV	0,07	0,04
SD/SECV	1,52	2,89

Aussi, pour les trois espèces mélangées, on obtient en sélectionnant les deux longueurs d'onde les plus contributives, un r^2 de 73% pour la PLS et de 83% pour la MLR. Cette dernière semble moins sensible au bruit que la PLS.

²⁹Symbole chimique de Mercure Cadmium Tellure

3.3.2.5. RÉSULTATS DES MODÈLES D'ÉTALONNAGE MLR

Le modèle d'étalonnage MLR donne de meilleurs résultats et est donc testé pour chaque espèce puis pour toutes les espèces confondues, en sélectionnant plusieurs longueurs d'onde (Tableau 28).

Tableau 28. Résultats des étalonnages MLR par espèce pour l'indice EWT

Espèce	n	r^2	Facteurs	Longueurs d'ondes sélectionnées	SD/SECV
AU	97	0,88	4	1466 - 1633 - 1543 - 544	2,86
QC	99	< 0,4	7	modèle peu fiable	
QI	98	0,81	4	1810 - 450 - 1506 - 1774	2,27
Toutes	294	0,83	2	1440 - 427	nd
		0,85	3	1440 - 427 - 598	nd
		0,86	4	1440 - 427 - 598 - 1580	2,70
		0,90	7	1440 - 427 - 598 - 1580 - 1398 - 494 - 1717	3,13

Pour AU et QI, les résultats sont corrects ($r^2 > 80\%$). Pour QC le modèle est mauvais ($r^2 < 40\%$) en raison de spectres aberrants et d'une faible variabilité des feuilles de l'échantillon (état hydrique du lot assez homogène).

Le modèle prenant en compte les trois espèces mélangées et sept longueurs d'onde sélectionnées est le meilleur avec un r^2 de 90% (Figure 55).

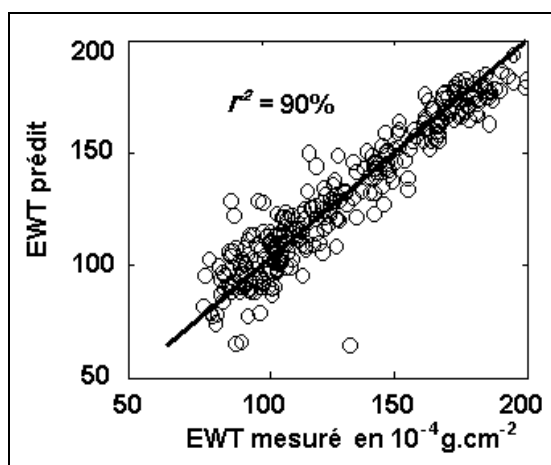


Figure 55. EWT mesuré et prédit par le modèle global d'étalonnage MLR

Plus le nombre de facteurs (longueurs d'onde) utilisés dans le modèle est important, meilleure sera l'estimation. En revanche même si l'écart-type SECV tend à diminuer, le SEC lui, après avoir atteint un minimum (7 facteurs dans notre cas) augmente au-delà. Pour notre étude, le meilleur compromis entre la qualité du modèle d'étalonnage (SEC) et la qualité de la prédiction (SECV) est l'emploi de 7 facteurs.

3.3.2.6. CONCLUSION

Le modèle d'étalonnage global regroupant les trois espèces est meilleur que les modèles spécifiques. Il semblerait que le fait d'introduire du bruit en mélangeant les trois espèces améliore la robustesse du système. Nous ne faisons pas qu'une simple optimisation

numérique. On sélectionne surtout les longueurs d'ondes liées à l'état hydrique des feuilles, indépendantes de l'espèce.

La méthode d'étalonnage MLR consiste à sélectionner les bandes adaptées à la prédiction de l'EWT quelle que soit l'espèce et non les bandes liées à une espèce. L'avantage de la MLR réside dans sa fidélité aux données initiales (spectres bruts). Contrairement à la PLS où les spectres sont transformés en facteurs, la MLR choisit directement les bandes les plus contributives à l'état hydrique des feuilles. Ainsi, ce genre d'étude ouvre directement la voie à de plus amples expériences sur d'autres espèces.

On pourrait aussi imaginer développer des capteurs (de terrain) qui, à partir de la mesure de la réflectance des feuilles pour quelques longueurs d'onde (les 3 ou 4 premières sélectionnées par MLR), permettraient d'estimer de façon fiable le contenu en eau de la végétation. Ce genre de matériel a été développé dans l'agriculture céréalière avec la technologie infrarouge thermique. Pour l'instant la technologie proche infrarouge n'a pas encore été utilisée à cette fin. En revanche depuis quelques années la spectroscopie proche infrarouge est en plein essor car elle permet de suivre la qualité des produits en agro-alimentaire et leur traçabilité. De nouvelles applications en physiologie végétale (stress hydrique, attaques parasitaires...) sont donc à considérer.

3.3.3. SIMULATION DES CAPTEURS SATELLITAIRES À PARTIR DES SPECTRES DE RÉFLECTANCE

3.3.3.1. CARACTÉRISTIQUES DES CAPTEURS SATELLITAIRES

Comme précisé au *chapitre 1*, on décrit chaque capteur satellitaire par sa triple résolution « spectro-spatio-temporelle ».

Dans le cas de notre problématique de suivi de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne, une des premières contraintes est liée à la résolution temporelle des images. Il est en effet impératif de travailler en dessous d'une échelle hebdomadaire, puisque la variabilité temporelle de la teneur en eau des plantes est inférieure à 8 jours (toutes conditions confondues) pendant la période de risque d'incendie.

D'un point de vue de la résolution spectrale, les bandes qui composent les capteurs sont assez différentes, couvrant généralement les parties visible et proche infrarouge du spectre, et moins souvent le moyen infrarouge et l'infrarouge thermique.

D'un point de vue spatial, la meilleure résolution sera toujours recherchée pour décrire au mieux un peuplement et ses hétérogénéités, en sachant que les résolutions spatiale et temporelle sont généralement inverses (images kilométriques prises plusieurs fois par jour et images métriques prises quelques fois par an).

Il existe de multiples capteurs sur un parc important de satellites d'observation de la Terre. En faire une liste exhaustive serait fastidieux et difficile car chaque année de nouveaux capteurs sont opérationnels et d'anciens s'éteignent ou retombent. Nous nous sommes restreints aux huit capteurs et aux six satellites lancés dans les cinq dernières années, les plus utilisés par la communauté scientifique pour répondre aux problèmes liés à l'environnement et au climat (Tableau 29).

Tableau 29. Caractéristiques techniques des capteurs retenus pour l'étude

Capteurs	Satellites	Année de lancement	Résolution temporelle	Résolution spatiale	Bandes
AVHRR/3	NOAA 14, 16 et 17	1994, 2000 et 2001	6 par jour	1000 m	3
AATSR	ERS 2	1997	1 par jour	1000 m	4
VEGETATION	SPOT 4 et 5	1998 et 2002	1 par jour	1000 m	4
MODIS	TERRA et AQUA	2000 et 2002	4 par jour	500 m	7
MERIS	ENVISAT	2003	1 par jour	300 m	15
ASTER	TERRA	2000	de 4 à 16 jours	15, 30 et 90 m	9
HRVIR	SPOT 4	1998	de 4 à 26 jours	20 m	4
ETM+	LANDSAT 7	1998	de 4 à 16 jours	30 et 60 m	6

3.3.3.2. SPECTRES MOYENS

Notre premier travail va consister à transformer chaque spectre de réflectance initial composé de plus de 2000 valeurs en un spectre simplifié de 3 à 15 valeurs selon le capteur considéré (Figure 56).

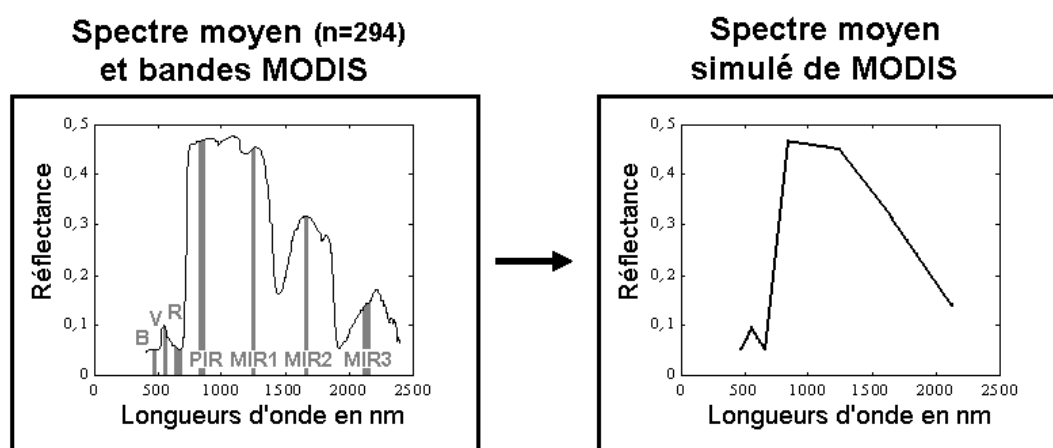


Figure 56. Exemple du spectre de réflectance moyen simplifié pour le capteur MODIS

La simulation consiste à intégrer chaque spectre initial selon les caractéristiques des bandes spectrales réelles du capteur (longueur d'onde centrale et largeur à mi-hauteur).

Ainsi selon le capteur étudié on aura une représentation plus ou moins simplifiée de l'information initiale (de 3 bandes pour AVHRR à 15 bandes pour MERIS), sur tout le spectre du bleu au moyen infrarouge (MODIS) ou une partie seulement (VEGETATION, MERIS...).

3.3.3.3. PRÉDICTION AVEC L'ENSEMBLE DES BANDES

Nous utilisons comme support d'expérience l'ensemble des spectres mesurés en laboratoire pour les trois espèces (n=294). Ces spectres sont donc filtrés en bandes, de 3 à 15 selon le capteur.

Dans le *Tableau 30* suivant, nous représentons les coefficients de détermination r^2 reliant la teneur en eau des plantes (EWT) à la réflectance simulée des bandes des capteurs.

Tableau 30. Résultats des modèles réalisés à partir de bandes simulées de différents capteurs satellitaires (n=294)

Satellites	Capteurs	Nbre de bandes du capteur	Nbre de bandes pour le modèle	Ordre des bandes du modèle	r^2
NOAA	AVHRR/3	3	3	-	0,36
ERS	AATSR	4	4	-	0,56
SPOT	VEGETATION	4	4	-	0,67
TERRA	MODIS	7	4	7 2 1 3	0,70
TERRA	MODIS	7	7	7 2 1 3 5 6 4	0,77
ENVISAT	MERIS	15	9	5 10 8 3 11 15 9 7 12	0,75
LANDSAT	ETM+	6	3	6 2 1	0,65
LANDSAT	ETM+	6	6	6 2 1 4 5 3	0,70
SPOT	HRVIR	4	4	-	0,53
TERRA	ASTER	9	5	5 1 2 3 4	0,55

Les capteurs ETM+, VEGETATION, MODIS et MERIS donnent les meilleurs résultats de modélisation avec un r^2 maximal de 77% pour les sept bandes de MODIS (*Figure 57*).

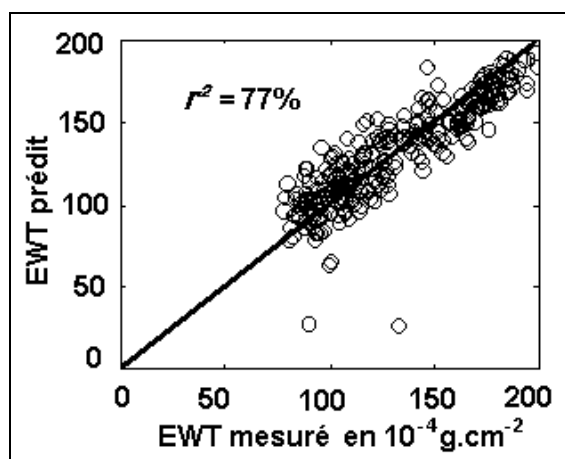


Figure 57. EWT mesuré et prédit à partir du spectre simplifié pour le capteur MODIS

Ce modèle s'écrit : $EWT = 0,2965\rho_R + 0,0115\rho_{PIR} - 0,0957\rho_{Bleu} - 0,0164\rho_{Vert} + 0,0648\rho_{MIR1} - 0,0561\rho_{MIR2} + 0,0020\rho_{MIR3} + 0,1860$

Les quatre points les plus éloignés sont conservés car aucun critère ne les différencie (EWT mesuré normal, feuilles de taille moyenne, espèces différentes...).

On pourrait penser que le capteur MODIS dispose des bandes spectrales les mieux adaptées à notre objectif et qu'une simple combinaison linéaire de ses canaux suffit à calculer la teneur en eau de n'importe quelle végétation. On en est encore loin du fait qu'on simule le rayonnement au niveau du satellite par des mesures de laboratoire réalisées sur des feuilles : le changement d'échelle est énorme !

De plus, dans notre simulation, l'ensemble de l'atmosphère et de ses perturbations est omis volontairement dans le calcul. Ces perturbations sont loin d'être négligeables. Il faut surtout noter que les bandes dans les zones Bleu et Vert du spectre électromagnétique sont les plus sujettes aux perturbations par l'ozone, les nuages, les poussières... Nous renouvelons donc les tests en enlevant les bandes Bleu et Vert des capteurs.

3.3.3.4. PRÉDICTION SANS LES CANAUX VERT ET BLEU

De manière générale, les résultats sont moins bons (Tableau 31).

Tableau 31. Résultats des modèles réalisés à partir de bandes simulées de différents capteurs satellitaires, sans les canaux Bleu et Vert (n=294)

Satellites	Capteurs	Nbre de bandes	Nbre de bandes pour le modèle	Ordre des bandes*	r^2
NOAA	AVHRR/3	3	3	-	0,28
ERS	AATSR	3	3	-	0,57
SPOT	VEGETATION	3	3	-	0,28
TERRA	MODIS	5	4	5 6 4 3	0,55
ENVISAT	MERIS	10	8	9 10 11 15 8 7 12 14	0,74
LANDSAT	ETM+	4	3	6 5 4	0,38
SPOT	HRVIR	3	2	4 3	0,27
TERRA	ASTER	8	6	5 6 3 2 7 4	0,36

*Pour la colonne de l'ordre des bandes les numéros correspondent aux numéros des bandes initiales du satellites, Bleu et Vert compris.

Seul le modèle créé avec 8 bandes du capteur MERIS est correct (r^2 de 74%) . Ce nouveau capteur superspectral a la particularité de comporter 15 bandes très étroites (< 25 nm) entre le bleu et le proche infrarouge (400-900 nm). Même si une grande partie du spectre n'est pas couverte (900 à 2400 nm), il semble que certaines bandes spectrales du capteur entre 650 et 900 nm soient adaptées au suivi de l'état hydrique de la végétation, du moins de l'EWT simulé à partir de spectrométrie de feuilles en laboratoire.

3.4. DISCUSSION

Dans cette partie, nous avons tout d'abord testé l'aptitude de la spectroscopie proche infrarouge pour caractériser les propriétés optiques des feuilles de deux chênes méditerranéens QC et QI. Le partage des composantes du rayonnement (Réflectance - Absorptance - Transmittance) est variable selon la longueur d'onde et la face des feuilles. Les zones du proche et moyen infrarouge (1200-2000 nm) du spectre semblent être sensibles à la teneur en eau de l'échantillon.

Un second travail a consisté à développer des modèles pour estimer l'état hydrique des feuilles de trois espèces méditerranéennes (QC, QI et AU) à partir de leur spectre de réflectance entre 400 et 2400 nm.

La sélection des bandes spectrales les plus contributives par la méthode MLR permet de prédire l'indice EWT avec une bonne précision (r^2 de 90% et SD/SECV supérieur à 3). Ce résultat est très encourageant d'autant plus qu'on a pu préciser les parties du spectre les plus impliquées dans la relation. Le moyen infrarouge est bien la zone du spectre porteuse d'information pour estimer l'état hydrique des feuilles. Toutefois dans notre étude, la partie visible du spectre (400-600 nm) intervient aussi dans les modèles, alors que l'eau n'est en théorie aucunement impliquée à ces longueurs d'onde. Il semblerait que la couleur des feuilles et donc la teneur en chlorophylle est reliée à la teneur en eau des feuilles échantillonnées.

Nous avons envisagé par la suite de tester l'adéquation des capteurs satellitaires actuels pour évaluer l'état hydrique foliaire. Le spectre initial a été simplifié en bandes et nous avons recherché le meilleur modèle prédisant l'EWT mesuré en laboratoire. Pour l'ensemble des bandes, les capteurs VEGETATION, ETM+, MERIS et MODIS estiment l'EWT avec une précision correcte ($65\% < r^2 < 77\%$). Si l'on retire les bandes *Bleu* et *Vert* des simulations, sensibles aux perturbations atmosphériques, les modèles sont alors peu précis ($27\% < r^2 < 57\%$) et seul MERIS obtient une prédiction correcte (r^2 de 74%).

Ainsi, la simple combinaison linéaire d'une partie des bandes des capteurs satellitaires actuels, permet d'estimer correctement l'indice de teneur en eau des plantes EWT. Ceci ouvre la voie à de plus amples investigations avec des images réellement acquises sur des zones où l'on connaît par mesure directe l'état hydrique de la végétation. Cette prochaine étape du travail sera abordée dans le *chapitre 4*.

Il ne faut toutefois pas oublier que les tests de modélisation du signal, réalisés pour plusieurs capteurs satellitaires, sont basés sur des mesures spectrales à l'échelle de la feuille. Il est évident que le pixel de l'image acquise par le capteur, aussi fin soit-il (moins de 1 m² pour les meilleurs), ne voit pas une feuille mais un couvert végétal composé de feuilles et également d'autres éléments (sol, ombres, branches, autres végétaux). Les modèles présentés ne sont en aucune manière transférables à une image satellitaire réelle.

Également, les modèles développés ici pour chaque capteur représentent le comportement d'un seul pixel. Dans la réalité chaque pixel est interdépendant de ses voisins, notamment dans le cas de couvert forestier. Il serait donc intéressant d'avoir une approche spatiale plutôt que d'utiliser les spectres et les pixels de manière indépendante. Les résultats en seraient probablement nettement améliorés dans le cas de la cartographie de l'état hydrique de la végétation.

4. SPECTROSCOPIE PROCHE INFRAROUGE DES FEUILLES SÈCHES DE VÉGÉTATION MÉDITERRANÉENNE

Cette partie a fait l'objet d'une publication présentée en *annexe 5*.

4.1. ÉTAT DE L'ART

Nous avons vu dans le *chapitre 1* que la **teneur en eau du combustible** est le paramètre qui gouverne majoritairement l'aléa d'incendie de forêt. Le contenu en eau de la végétation est mesuré sur le terrain le plus souvent à travers un réseau de surveillance, limité dans le temps (quelques mois dans l'année) et dans l'espace (quelques sites de moins de 5000 m²). Dans la *partie 3* précédente, nous avons montré la relation entre la réflectance d'une feuille fraîche et son état hydrique. Nous avons testé par la suite l'intérêt des capteurs satellitaires actuels pour estimer ce contenu en eau. En effet, la télédétection satellitaire pourrait être un outil de choix pour suivre l'état hydrique des plantes sur de grandes surfaces. La possibilité d'estimer avec précision la teneur en eau de la végétation, à partir de la mesure du spectre électromagnétique de réflectance, est donc un réel apport pour la recherche en télédétection et notamment pour améliorer les modèles de transfert radiatif au sein du couvert.

Dans cette seconde étude de spectroscopie, nous utilisons également des feuilles d'espèces méditerranéennes sujettes au stress hydrique, en condition réelle et non forcée en laboratoire. Nous avons vu dans le protocole précédent que l'usage de feuilles fraîches demande certaines précautions, comme la mesure du spectre de réflectance rapidement après la cueillette des échantillons sur le terrain, pour éviter trop de changements physiologiques et biochimiques dans l'échantillon. De plus, chaque échantillon est fragile car composé d'une seule feuille. Les étapes de pesées et de mesure du spectre sont méticuleuses ! Pour cette nouvelle étude, nous souhaitons nous affranchir des contraintes de temps et mesurer les propriétés spectrales des feuilles en une seule fois. Les échantillons sont composés de plusieurs feuilles (environ 20 grammes) prélevées à plusieurs dates, séchées en laboratoire et conservées au sec. Leur teneur en eau (FMC) est calculée par la même occasion. Dans ce nouveau protocole on étudiera alors les **relations entre les propriétés spectrales des feuilles séchées et leur état hydrique initial**.

La première application analytique de la spectroscopie proche infrarouge a été développée en 1962 par Karl Norris qui travaillait comme ingénieur au ministère de l'agriculture des États-Unis (Hart *et al.*, 1962). Dans cette première étude, les auteurs décrivent une méthode permettant de mesurer la teneur en eau d'échantillons de céréales. La NIRS d'échantillons broyés et secs a depuis été largement utilisée dans la recherche agro-alimentaire, dans un premier temps entre 1100 et 2500 nm (Williams et Norris, 1990) d'où son nom, et par la suite sur un spectre plus large couvrant des longueurs d'onde de 400 à 2500 nm. Dans cette gamme de longueurs d'onde, la lumière réfléchiée par la matière organique présente une signature unique, comportant des informations biochimiques du caractère et du nombre de groupes fonctionnels, comme les ponts chimiques -CH, -OH et -NH. La chimiométrie rend possible l'étude des spectres pour calibrer le signal, c'est-à-dire relier les spectres aux paramètres mesurés.

La NIRS n'est plus désormais réservée à la détermination de composés biochimiques au sein d'un échantillon, mais plus largement à de **nouvelles applications écologiques** (Lacaze et Joffre 1994, Foley *et al.* 1998). Ainsi, elle a permis d'évaluer directement des paramètres comme l'épaisseur des tissus foliaires et leur masse surfacique (Ourcival *et al.*, 1999), l'âge du feuillage (Meuret *et al.*, 1993), la valeur calorifique du combustible forestier (Gillon *et al.*, 1997), la qualité des litières (Gillon *et al.* 1999, Joffre *et al.* 2001) et leur degré de décomposition (Gillon *et al.* 1993, Bouchard *et al.* 2003)... Chaque paramètre est supposé lié à la composition chimique de l'échantillon, elle-même définie par un spectre. On peut donc le modéliser. Dans ce cas, on fait l'hypothèse que le stress hydrique d'une feuille est lié au changement de ses composés biochimiques et donc de ses propriétés spectrales. La NIRS n'a encore jamais été utilisée pour évaluer le contenu en eau d'une feuille fraîche à partir de la mesure spectrale de cette même feuille broyée et séchée !

4.2. PROTOCOLES ET MATÉRIELS

Les données initiales se composent des teneurs en eau mesurées (FMC) pour huit espèces méditerranéennes suivies pendant les étés 2001 et 2002, au niveau de plusieurs sites près de Montpellier et dans le massif des Maures. Les analyses de spectrométrie sont réalisées sur les échantillons secs. Nous essayons de trouver les meilleurs modèles (par espèce et pour les huit espèces confondues) permettant de prédire la FMC d'un échantillon à partir de la mesure de son spectre de réflectance entre 400 et 2500 nm.

4.2.1. ÉTAT HYDRIQUE FOLIAIRE DE TERRAIN

Les échantillons correspondent à 8 espèces méditerranéennes d'arbres et arbustes (*Tableau 32*).

Tableau 32. Espèces suivies

Abréviation	Nom latin	Nom commun
AU	<i>Arbutus unedo</i>	Arbousier commun
CA	<i>Cistus albidus</i>	Ciste cotonneux
EA	<i>Erica arborea</i>	Bruyère arborescente
JO	<i>Juniperus oxycedrus</i>	Genévrier oxycèdre
QC	<i>Quercus coccifera</i>	Chêne kermès
QI	<i>Quercus ilex</i>	Chêne vert
QP	<i>Quercus pubescens</i>	Chêne blanc
SJ	<i>Spartium junceum</i>	Genêt d'Espagne

La collecte des feuilles s'est effectuée une à deux fois par semaine, pendant les étés 2001 et 2002 pour sept espèces, uniquement en 2002 pour le chêne blanc QP. Parmi les feuillages prélevés on trouve des feuilles caduques (QP), persistantes (AU, CA, EA, JO, QC, QI, SJ), larges (AU, CA, QC, QI, QP) et fines (EA, JO, SJ). Selon l'année ou l'espèce, la période de collecte débute en juin ou juillet et s'achève en septembre ou octobre. AU et EA ont été prélevés en trois sites différents localisés dans le massif des Maures (43°13'N, 6°22'E, 620 m, 35 km au nord-est de Toulon). Les 6 autres espèces ont été prélevées en différents sites sur le Causse d'Aumelas (43°33'N, 3°39'E, 290 m, 12 km à l'Ouest de Montpellier).

Les missions de terrain s'organisent entre 14 et 16h et consistent à prélever majoritairement des feuilles (environ 20 grammes) et à les stocker dans des boîtes hermétiques, rapidement amenées au laboratoire. On calcule leur FMC par la méthode d'étuvage classique (masse sèche atteinte après 24 h dans une étuve ventilée à 60°C). En l'absence de mesure de la surface des échantillons, l'indice EWT n'est pas calculé.

A chaque date et pour chaque site, on réalise 5 ou 7 échantillons (répétitions) représentatifs du couvert végétal (voir protocole INRA-ONF en annexe 4) (Tableau 33).

Tableau 33. Nombre de répétitions de chaque prélèvement (une date et un site) selon l'année et l'espèce

Espèces	Année 2001	Année 2002
AU	7	5
CA	5	5
EA	7	5
JO	5	5
QC	5	5
QI	pieds individuels	5
QP	-	pieds individuels
SJ	5	5

Pour chaque espèce (excepté QI en 2001 et QP en 2002) et pour toutes les espèces confondues, on calcule l'écart-type moyen des répétitions de FMC. Cet écart-type est noté **RME** (*reference method error*) (Williams, 1990).

4.2.2. SPECTROMÉTRIE PROCHE INFRAROUGE

La spectrométrie porte sur un total de 416 échantillons appartenant à 7 espèces en 2001 et 448 échantillons pour les 7 espèces plus QP en 2002 (Tableau 34).

Tableau 34. Statistiques descriptives des FMC des échantillons prélevés sur le terrain

Espèces	Effectifs		Amplitude de FMC		FMC moyen en %		Écart-type		RME	
	2001	2002	2001	2002	2001	2002	2001	2002	2001	2002
AU	76	75	62-146	104-161	106,55	124,86	22,02	11,46	3,26	2,59
CA	53	60	60-128	64-143	91,23	84,40	19,52	18,48	2,12	3,57
EA	76	75	38-119	75-124	73,37	93,86	22,70	13,04	1,89	1,80
JO	52	49	68-120	66-121	88,17	87,74	11,75	11,35	2,84	4,73
QC	53	49	63-109	73-99	82,47	85,68	10,04	5,89	3,26	1,76
QI	54	51	56-78	63-96	67,07	75,15	5,00	6,63	-	1,47
QP	-	39	-	84-126	-	99,38	-	8,66	-	-
SJ	52	50	89-133	103-149	110,36	118,21	12,69	11,69	3,44	3,13
Toutes	416	448	38-146	63-161	88,52	97,29	22,53	20,51	2,78	2,62
Toutes	864		38-161		93,07		21,94		2,72	

Les mesures spectrales sont conduites sur tous les échantillons prélevés de CA, JO, QC, QI, QP et SJ. Comme les espèces AU et EA sont sur-représentées (75 au lieu de 50), pour réaliser les tests statistiques on sélectionnera au hasard 50 échantillons de chaque espèce couvrant l'amplitude de variation des valeurs de FMC.

Les 864 échantillons secs sont broyés et tamisés au *Cyclotec* (maille de 1 mm) pour obtenir une poudre constituée de particules de tailles homogènes. Cette poudre est ensuite scannée au spectroradiomètre à monochromateur *NIRSystems 6500* (Silver Spring, MD, États-Unis).

En pratique, cette poudre est introduite dans des cellules de mesure (cuvettes cylindriques composées d'un couvercle transparent en quartz et d'un fond amovible opaque). Chaque cellule est illuminée par une lampe halogène-tungstène et la lumière est sélectionnée à différentes longueurs d'onde par un monochromateur à réseau holographique (Bertrand, 2002). Une partie des radiations est absorbée par la poudre et une autre réfléchiée. Les radiations lumineuses réfléchies par la surface de l'échantillon aux différentes longueurs d'onde sont détectées et quantifiées en unités de réflectance.

Pour chaque échantillon, nous mesurons 32 spectres et nous conservons le spectre moyen de réflectance au pas de 2 nm sur un intervalle de 400 à 2500 nm (1050 valeurs de réflectance par spectre). Grâce à une référence standard en céramique, un logiciel interne au spectroradiomètre évalue le spectre apparent de réflectance R . Les données spectrales enregistrées sont traitées et transformées en unités d'absorbance A par la relation :

Équation 23.
$$A = \log\left(\frac{1}{R}\right).$$

Toute la chimiométrie est conduite à l'aide du logiciel ISI (Shenk et Westerhaus, 1991a).

4.2.3. PHASES D'ÉTALONNAGE ET PRÉ-TRAITEMENTS

Deux méthodes d'étalonnage de l'indice FMC sont comparées pour les échantillons de l'année 2001 (Gillon *et al.*, 2002) :

- la régression pas à pas (*stepwise*) sur des longueurs d'onde sélectionnées,
- la régression PLS sur tout le spectre.

Pour notre étude, la PLS donne de meilleurs résultats, comme le montraient déjà pour d'autres expériences Joffre *et al.* (1992), Bolster *et al.* (1996), Grossman *et al.* (1996) et Ourcival *et al.* (1999). De plus, après comparaison des différentes régressions PLS, le modèle semble plus précis quand le spectre entier est considéré plutôt que les parties visible ou infrarouge seules, et quand les spectres bruts ont subi des pré-traitements (dérivées, lissage...). La méthode d'étalonnage PLS est donc préférée à la *stepwise* et testée sur les 864 échantillons.

Deux méthodes de **pré-traitement** des données sont utilisées :

- la transformation SNV (*standard normal variate*),
- la correction de la tendance (*de-trending*).

Le broyage des échantillons, aussi consciencieux qu'il puisse l'être, peut créer des poudres de différentes granulométries. L'effet de la granulométrie sur le spectre peut être corrigé par l'utilisation de la méthode de transformation SNV qui centre chaque spectre par rapport à un spectre moyen. On a alors des spectres centrés réduits d'écart-type unitaire.

Une des caractéristiques des spectres est l'augmentation de la densité optique sur la gamme des longueurs d'onde allant de 1100 à 2500 nm, correspondant à une élévation de l'absorption lorsque les longueurs d'onde approchent des vibrations fondamentales (Ibrahima, 1995). Cette tendance, généralement linéaire, devient curvilinéaire pour les spectres des échantillons en poudre dense. Barnes *et al.* (1989) ont proposé d'enlever les dérives linéaire et curvilinéaire de chaque spectre à l'aide d'une régression par un polynôme du second degré.

4.2.4. INTERPRÉTATION STATISTIQUE DE LA QUALITÉ DE LA MODÉLISATION

Les étalonnages par régression PLS sont réalisés sur les dérivées (1^{ère} et 2^{nde}) du spectre entier après un pré-traitement (SNV et *de-trending*).

Deux types de modèles d'étalonnage sont testés :

- **15 modèles spécifiques** pour chaque espèce et chaque année,
- **3 modèles globaux** considérés pour toutes les espèces par année ou pour les deux années.

Dans le cas d'étalonnages spécifiques, le nombre d'échantillons est faible (39 à 76). Les étalonnages portent donc sur l'ensemble des données et le même jeu servira à la validation des équations. A l'inverse, dans le cas des étalonnages globaux, on distingue deux jeux de données (50% étalonnage et 50% validation).

Pour l'ensemble des modèles, la **validation croisée** permet de déterminer le nombre optimal de facteurs dans les équations d'étalonnage. Cette méthode consiste à sélectionner trois quarts des données du jeu d'étalonnage pour développer le modèle et un quart pour l'appliquer. L'algorithme est répété quatre fois et les résidus moyens des quatre prédictions permettent de calculer l'indice de qualité SECV. **Le SECV minimal détermine le nombre de facteurs à garder.** Le modèle final est ensuite recalculé avec tous les échantillons d'étalonnage. La qualité de ce modèle est donnée par son écart-type SEC. A chaque étape de création d'un modèle, on combine **6 traitements mathématiques** (pour chaque dérivée 1^{ère} et 2^{nde}, une fenêtre glissante de 4, 8 et 12 valeurs). Ainsi, l'équation d'étalonnage finale choisie sera celle qui donnera le meilleur résultat en terme de SECV.

Au final, les modèles d'étalonnage (spécifiques et globaux) sont appliqués au jeu de spectres de validation et on calcule l'écart-type de prédiction SEP.

Nous comparons également le **SECV au RME des échantillons de terrain** (écart-type des données de FMC de 5 ou 7 répétitions prélevées sur un même site et à une même date). Il nous paraît intéressant de **quantifier la perte de précision** entre la mesure de la FMC par étuvage et pesées (méthode de référence RME) et l'estimation de l'indice FMC par spectroscopie des feuilles séchées et broyées.

4.3. RÉSULTATS

4.3.1. TENEUR EN EAU FMC

Les conditions climatiques estivales de l'étude sont très différentes. En effet, le cumul des précipitations des mois de juin, juillet, août atteint :

pour le site près de Montpellier, un total de 100 mm en 2001 et de 216 mm en 2002,

- pour le site près de Toulon, un total de 19 mm en 2001 et de 178 mm en 2002.

L'amplitude de variation de l'indice FMC varie beaucoup selon l'espèce considérée et l'année de suivi :

- en 2001, elle est faible pour le QI (22%), moyenne pour le CA, JO, QC et SJ (de 44 à 68%) et forte pour AU et EA (plus de 80%) ;
- en 2002, elle est faible pour les chênes (de 26 à 42%) et moyenne pour les autres espèces (de 46 à 79%).

4.3.2. RELATION ENTRE L'INDICE FMC ET LES SPECTRES

Nous observons de nombreux liens entre l'indice FMC et les spectres mesurés, toutes espèces confondues (Figure 58).

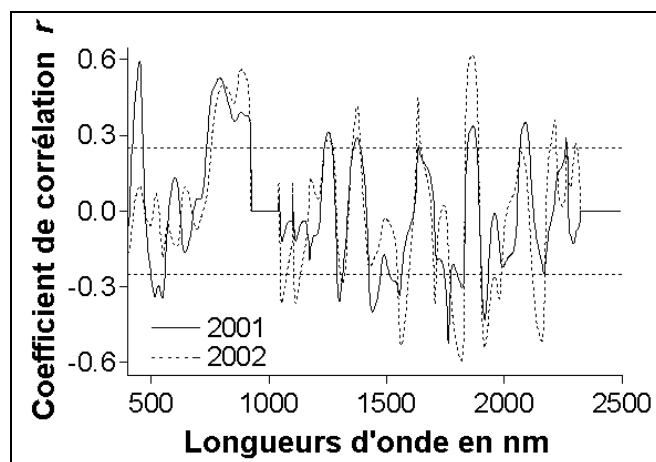


Figure 58. Coefficient de corrélation r entre l'indice FMC et le spectre d'absorbance (dérivée seconde) entre 400 et 2500 nm pour les échantillons prélevés en 2001 et en 2002

Ainsi, plusieurs parties du spectre, à la fois dans le visible, proche et moyen infrarouge, sont sensiblement corrélées à la teneur en eau (FMC), pour les deux années.

4.3.3. ÉTALONNAGE PLS PAR ESPÈCE

Les résultats des modèles d'étalonnage réalisés par espèce et par année sont présentés dans le *Tableau 35*.

Tableau 35. Résultats des étalonnages PLS spécifiques de l'indice FMC

Espèces	n	FMC moyen	SD	r^2	SEC	SECV	SD/SECV	SECV/RME	Param. Transf.
Année 2001									
AU	73	106,21	22,40	0,96	4,25	5,69	3,94	1,75	1,4,4
CA	50	90,29	18,45	0,98	2,43	5,19	3,55	2,44	2,4,4
EA	73	73,10	23,12	0,99	2,70	3,95	5,84	2,09	1,4,4
JO	47	87,36	10,99	0,98	1,44	2,02	5,44	0,71	2,12,8
QC	50	81,75	9,80	0,98	1,41	3,41	2,87	1,05	2,4,4
QI	53	67,07	5,05	0,85	1,95	2,72	1,86	-	1,8,4
SJ	50	109,88	12,55	0,93	3,28	3,78	3,32	1,10	1,12,8
Année 2002									
AU	72	124,04	10,63	0,93	2,84	4,00	2,66	1,54	1,12,4
CA	58	83,21	17,10	0,96	3,22	6,58	2,60	1,84	2,8,4
EA	72	93,62	12,75	0,97	2,05	3,45	3,70	1,92	2,8,8
JO	46	87,04	9,66	0,99	1,09	2,47	3,91	0,52	2,4,4
QC	49	85,68	5,89	0,55	3,95	5,53	1,07	3,14	1,12,8
QI	47	73,92	5,17	0,71	2,78	2,90	1,79	1,97	1,8,8
QP	39	99,38	8,66	0,95	1,90	3,73	2,32	-	2,4,4
SJ	48	118,04	11,57	0,98	1,45	3,80	3,04	1,21	2,4,4

Param. Transf. : paramètres de la transformation mathématique du spectre. Le premier nombre représente la degré de dérivation (1 ou 2), le second nombre la longueur du segment sur lequel la dérivée est appliquée (4, 8 ou 12 points), le troisième nombre la longueur du segment sur lequel le filtre d'atténuation est appliqué.

Les modèles d'étalonnage spécifique pour le chêne vert QI en 2001 et 2002 et le chêne kermès QC en 2002 sont médiocres (r^2 de 55 à 85%) par rapport aux autres espèces. Pour ces trois cas, l'écart-type de l'indice FMC est inférieur à 6%. Ceci s'explique, d'une part par l'adaptation physiologique record du chêne vert dont la teneur en eau des feuilles varie faiblement même en période de sécheresse, et d'autre part par un faible stress observé pour le chêne kermès en 2002.

Pour tous les autres cas, les modèles d'étalonnage spécifique prédisent bien la teneur en eau à partir du spectre. Le coefficient de détermination r^2 entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites varie de **93 à 99%** pour un **SECV de 2 à 6,6%**. Ce SECV prend des valeurs **2,3 à 5,8 fois plus basses que l'écart-type** des valeurs mesurées (SD). Le ratio SECV/RME varie de 0,5 à 2,4.

4.3.4. ÉTALONNAGE PLS TOUTES ESPÈCES CONFONDUES

Les résultats des modèles d'étalonnage réalisés pour toutes les espèces confondues et par année sont présentés dans le *Tableau 36*.

Tableau 36. Résultats des étalonnages PLS globaux de l'indice FMC

	n	FMC moyen	SD	r^2	SEC	SECV	SEP	Biais	SD/SECV SD/SEP	SECV/RME SEP/RME	Param. Transf.
Année 2001											
Étalonnage	200	87,48	22,46	0,94	5,43	6,63	-	-	3,39	2,38	2,12,12
Validation	200	88,49	22,19	0,90	-	-	7,15	0,09	3,10	2,57	-
Année 2002											
Étalonnage	213	96,97	20,39	0,95	4,78	6,54	-	-	3,12	2,50	1,4,4
Validation	214	95,85	19,58	0,89	-	-	6,47	0,01	3,03	2,47	-
Années 2001 et 2002											
Étalonnage	412	92,04	21,66	0,92	6,29	7,06	-	-	3,07	2,60	1,4,4
Validation	414	92,30	21,18	0,89	-	-	7,11	0,48	2,98	2,61	-

Param. Transf. : cf. *Tableau 35*

Les modèles annuels d'étalonnage, réalisés sur la moitié des échantillons, sont très corrects : r^2 de 94 et 95%, SECV de 6,5 et 6,6% et rapport SD/SECV supérieur à 3. En utilisant ces équations pour prédire la teneur en eau FMC sur l'autre moitié des échantillons, on obtient un r^2 de 89 et 90%, un SEP de 6,5 et 7,2%, un biais proche de zéro et un rapport SD/SEP supérieur à 3.

Le modèle d'étalonnage réalisé pour toutes les espèces sur les deux années de suivi donne des résultats similaires (étalonnage : r^2 de 92%, SECV de 7,1% ; validation : r^2 de 89%, SEP de 7,1% et SD/SEP proche de 3) (*Figure 59*).

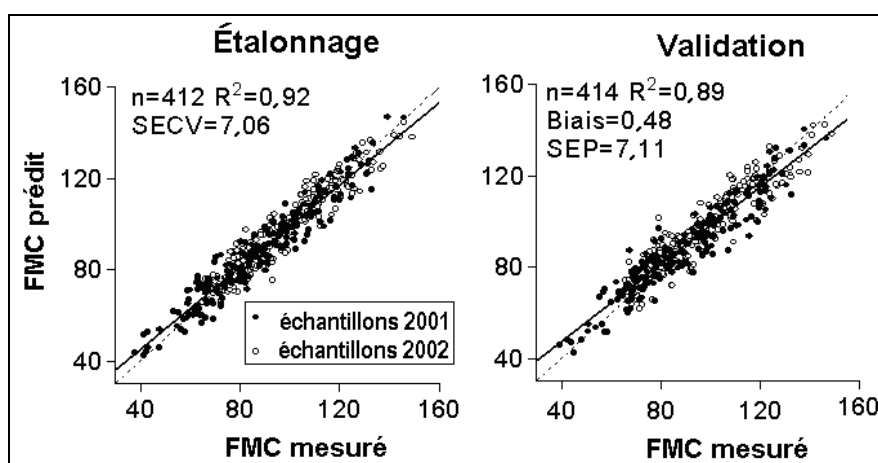


Figure 59. FMC mesuré et prédit par les modèles en étalonnage et validation

Dans toutes les études de spectroscopie, les données initiales sont séparées en deux jeux (étalonnage et validation). Il faut garder à l'esprit que cette démarche peut conduire à une surestimation de la qualité des prédictions. En effet, dans le jeu de données servant à la validation du modèle, les valeurs de SEP sont en général plus grandes que les valeurs du SECV de l'étalonnage.

De même, le r^2 de validation est plus faible que celui d'étalonnage. Ceci est commun aux études de spectroscopie car les échantillons aux forts résidus de validation croisée sont écartés pendant la phase d'étalonnage alors que tous les échantillons de validation sont utilisés pour la prédiction et le calcul du SEP et du r^2 .

Dans le *Tableau 36* précédent, les indices SECV et SEP des trois étalonnages globaux sont 2,4 à 2,6 fois plus grands que l'indice de référence RME. On peut ainsi annoncer que **les modèles développés dans cette étude**, pour prédire l'état hydrique de la végétation par spectroradiométrie proche infrarouge des feuilles séchées et broyées, **sont 2,4 à 2,6 fois moins précis que l'estimation de l'indice FMC par la méthode classique d'étuvage**.

4.3.5. COMPARAISON DES TROIS ÉQUATIONS GLOBALES D'ÉTALONNAGE

Les trois équations globales d'étalonnage calculées pour chacune des années 2001, 2002, et pour le cumul des deux années, sont appliquées à un jeu de données indépendantes pour chaque année (*Tableau 37*).

Tableau 37. Prédiction de l'indice FMC avec les équations globales d'étalonnage

Équation d'étalonnage globale	Données de validation	n	r^2	SEP	biais
Établie pour l'année 2001	2001	200	0,90	7,15	0,09
	2002	214	0,74	10,98	0,62
Établie pour l'année 2002	2001	200	0,68	12,78	-1,94
	2002	214	0,89	6,47	0,01
Établie pour les deux années	2001	200	0,90	7,14	-0,89
	2002	214	0,87	7,09	-0,10

L'estimation de l'indice FMC d'une année, à partir du modèle établi avec les données de cette même année, est relativement précise (r^2 de 90% pour 2001 et 89% pour 2002, biais et SEP faibles). A l'inverse, l'estimation de la FMC d'une année, à partir du modèle établi avec les données d'une autre année est peu précise (r^2 de 68% pour 2001 prédit par 2002 et de 74% pour 2002 prédit par 2001, biais importants, SEP élevé). Cela semble jusque là assez logique !

En revanche, si l'on utilise le modèle d'étalonnage global (toutes espèces confondues sur deux années de suivi) pour prédire l'indice FMC de spectres de 2001 ou de 2002, les résultats sont très proches de ceux obtenus avec les modèles annuels. Ainsi, on a un r^2 de 90% pour 2001 et 87% pour 2002, des biais faibles (<1%), des SEP faibles (7,1%) et un SD/SEP de 3. L'état hydrique des feuilles d'une année peut donc être estimé en utilisant un modèle d'étalonnage réalisé à partir de données de plusieurs années. Le modèle gagne alors en robustesse.

4.4. DISCUSSION

4.4.1. RELATION ENTRE LA TENEUR EN EAU D'UNE FEUILLE ET SES PROPRIÉTÉS SPECTRALES À L'ÉTAT SEC

L'étude de huit espèces méditerranéennes nous a permis de prendre en considération une grande variabilité de conditions : plusieurs types de feuillage (5 familles d'arbres et arbustes), de milieu naturel (garrigue et maquis), de condition climatique (été 2001 drastique et 2002 pluvieux). Ainsi, les teneurs en eau mesurées (FMC) varient de 0,38 à 1,61 (*Tableau 34*).

Pour toutes les espèces confondues, l'absorbance mesurée dans toutes les régions du spectre électromagnétique est fortement liée à l'indice FMC, ceci pour les deux années de suivi. L'état hydrique initial des feuilles fraîches est donc relié à leurs caractéristiques spectrales à l'état sec.

Les modèles d'étalonnage PLS, développés par espèce et par année ou pour toutes les espèces sur les deux années, fournissent une estimation de l'indice FMC suffisamment précise dans tous les cas. Cela signifie donc que, pour les différentes espèces considérées, les caractéristiques spectrales des feuilles sèches varient dans le même sens que leur état hydrique.

Dans la majorité des cas, les valeurs de FMC décroissent au cours du temps pendant l'été. On pourrait donc penser que le modèle d'étalonnage créé prend en compte les caractéristiques spectrales des feuilles subissant un processus de vieillissement. Le modèle ne prédirait pas un état hydrique (FMC) mais le stade phénologique (ou l'âge) des feuilles.

Ce n'est pas exactement le cas : considérons par exemple les échantillons de feuilles de la bruyère arborescente (EA) récoltées pendant l'été 2001. L'indice FMC diminue régulièrement en juillet et août (été sec) alors qu'à la fin du mois de septembre, en réponse aux précipitations, l'indice FMC augmente sans que de nouvelles pousses de feuilles n'aient lieu. Le modèle d'étalonnage (2001 ou 2001+2002) prédit sans problème cette réhydratation de la plante en fin de saison (*Figure 60*).

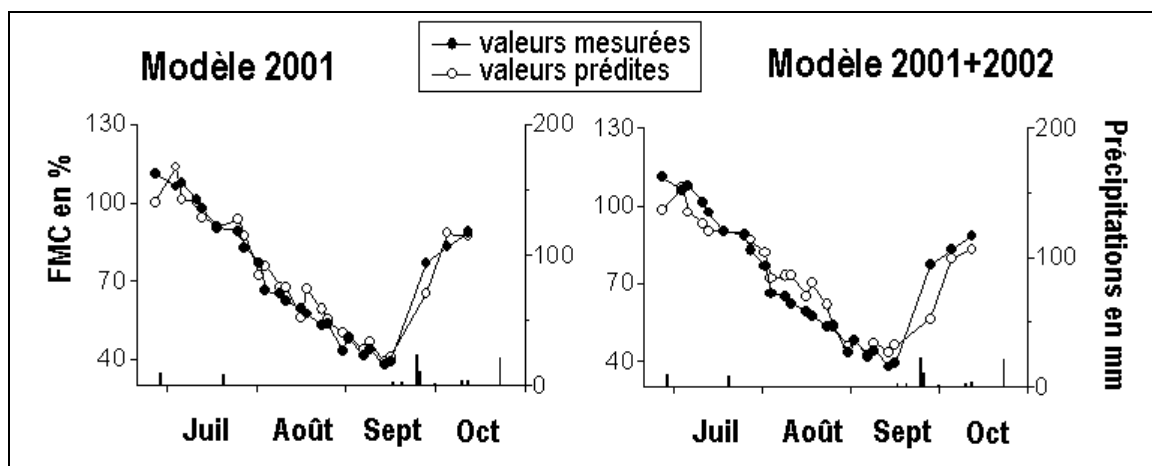


Figure 60. Indice FMC mesuré et prédit par le modèle d'étalonnage (2001 et 2001-2002) de la bruyère arborescente EA du site B du massif des Maures pendant l'été 2001

On observe également un léger délai de réponse du modèle comme si la restauration des caractéristiques spectrales des feuilles après la première pluie était plus lente que l'entrée de l'eau dans les tissus foliaires. Ces résultats montrent qu'il est donc possible d'évaluer l'état hydrique initial des feuilles à partir de leur spectroradiométrie à l'état sec, et ceci quelle que soit l'espèce. Enfin, la variabilité de l'estimation de l'indice FMC par spectroscopie est 2,5 fois plus forte que l'hétérogénéité de l'état hydrique mesuré sur le terrain. Les relations observées entre l'indice FMC et le spectre des feuilles signifient que certaines propriétés biochimiques des feuilles varient dans le même sens que leur contenu en eau et ceci pour différentes espèces méditerranéennes.

4.4.2. DIFFÉRENCES SPECTRALES INTER-ANNUELLES DU FEUILLAGE

Le spectre moyen de toutes les espèces combinées est sensiblement différent d'une année sur l'autre. Pendant l'été 2001, l'absorbance mesurée est plus basse pour toutes les longueurs d'onde comparée à celle de l'été 2002. Les composants biochimiques des feuilles ont donc changé entre les deux années. La raison peut être les différences de conditions climatiques et de réserve en eau du sol entre 2001 et 2002, mais ce changement peut aussi être dû aux conditions climatiques avant la période estivale déterminantes pour la croissance des plantes et les processus phénologiques et biochimiques associés. Il est désormais bien établi que les caractéristiques spectrales du feuillage suivent si bien les stades phénologiques des feuilles qu'il est possible de calibrer l'âge des feuilles par spectroscopie proche infrarouge (Meuret *et al.*, 1993). De ce fait, tout modèle d'étalonnage réalisé à partir des données d'une année permet de prédire avec précision l'indice FMC d'autres échantillons de cette même année mais est mal adapté pour prédire l'indice FMC d'échantillons d'autres années.

A l'opposé, le modèle créé à partir des données de deux années prend en compte les différences spectrales inter-annuelles et surtout sélectionne les couples « FMC – spectre lié » communs à tous les échantillons des deux années. Ce modèle permet ensuite de prédire avec une bonne précision l'indice FMC des échantillons de chaque année.

4.4.3. PERSPECTIVES

Plusieurs études (Lawlor et Cornic, 2002) ont montré que les plantes, subissant un stress hydrique, mettent en place des ajustements métaboliques pour maintenir une turgescence positive, tandis que leur contenu en eau (cellulaire et foliaire) diminue. Cet ajustement osmotique implique en général une augmentation active du nombre de molécules solubles dans la cellule. Nous avons vu que pour huit espèces étudiées la même information spectrale est reliée aux mêmes niveaux de FMC. Cela signifie que plusieurs molécules solubles, impliquées dans les ajustements osmotiques, sont présentes dans toutes les espèces suivies. Les sucres et les acides aminés sont les principaux constituants de la régulation osmotique foliaire pour beaucoup d'espèces. Les variations de teneurs en sucres et en acides aminés sont également liées aux variations en potassium (Morgan, 1984).

D'autres investigations sont donc nécessaires pour identifier pour plusieurs espèces les composés chimiques impliqués dans les modifications spectrales des feuilles, en lien avec leur état hydrique.

Nous espérons aussi que le modèle de spectroscopie proche infrarouge, réalisé pour deux années contrastées, pourra permettre de prédire l'état hydrique des feuilles d'une année avec des conditions climatiques intermédiaires à 2001 et 2002. Pour obtenir une nouvelle équation d'étalonnage précise pour chaque nouvelle année, il sera nécessaire de réintroduire de nouveaux échantillons (spectres et FMC de référence) dans le jeu d'étalonnage afin de réaliser un nouveau modèle.

5. SYNTHÈSE

Après avoir défini dans les premières parties du chapitre la technique de spectroscopie proche infrarouge et les méthodes de traitements des spectres (chimométrie), nous avons présenté deux protocoles de suivi de l'état hydrique des feuilles (Tableau 38).

Tableau 38. Caractéristiques des deux protocoles pour estimer la teneur en eau par spectroscopie proche infrarouge

Critères	Protocole 1 : spectroscopie feuilles fraîches	Protocole 2 : spectroscopie feuilles sèches
Type d'échantillon	la feuille	le mélange d'environ 20 grammes de feuilles
Conditionnement	feuille vivante prélevée juste avant la mesure	feuilles séchées et broyées finement
Campagne	Été 2002	Étés 2001 et 2002
Nombre d'espèces	3 : AU, QC et QI	8 : AU, CA, EA, JO, QC, QI, QP et SJ
Effectif total	294	864
Indice d'état hydrique	FMC et EWT	FMC seulement
Chimométrie	MLR meilleure	PLS meilleure
Meilleur modèle global	$r^2 = 90\%$ étalonnage	$r^2 = 92\%$ étalonnage et 89% validation

La première étude a consisté à mesurer le rayonnement réfléchi, par la surface de feuilles fraîches, au moyen d'un spectroradiomètre couplé à une sphère d'intégration. Chaque feuille prélevée sur le terrain présente des niveaux de stress hydrique différents (indices FMC et EWT calculés).

La seconde étude a porté sur les feuilles de huit espèces méditerranéennes prélevées pendant deux étés, présentant des conditions hydriques variables. Les échantillons sont composés d'une poudre de feuilles séchées et broyées. On mesure la réflectance de cette poudre par un spectroradiomètre et on recherche le meilleur modèle reliant le spectre et la teneur en eau initiale de l'échantillon (indice FMC calculé).

Dans les deux cas, la spectroscopie permet de prédire l'état hydrique des feuilles de manière précise. Le premier protocole est moins destructif que le second ; les modèles développés pour ce dernier sont plus robustes (créés pour deux étés très différents et indépendamment des huit espèces).

Afin de compléter notre étude sur le comportement spectral des feuilles en condition de stress hydrique, nous décidons d'utiliser les échantillons du premier protocole (294 feuilles de 3 espèces) et de leur faire subir le second protocole.

Les échantillons sont composés de poudre homogène de feuilles séchées et broyées. Cette poudre est recueillie dans des petites cellules cylindriques hermétiques, elles-même scannées au spectroradiomètre NIRSystem 6500. Une quantité minimale de poudre est nécessaire pour remplir chaque cellule, correspondant à plusieurs feuilles (de 3 à 8 selon l'espèce). On ne peut donc pas utiliser une seule feuille par cellule !

Un premier travail consiste donc à regrouper les 294 feuilles initiales, par espèce et par teneur en eau EWT équivalentes (Tableau 39).

Tableau 39. Échantillons servant à la nouvelle étude

Espèce	Nombre initial de feuilles	Nombre final de groupes de feuilles
AU	97	34
QC	99	13
QI	98	30
Toutes	294	77

Pour chaque nouveau groupe, nous recalculons les indices EWT et FMC, à savoir la moyenne des EWT et FMC individuels (Tableau 40).

Tableau 40. Description des échantillons initiaux (avant) et regroupés (après) (EWT en 10^{-4} g.cm $^{-2}$)

Espèce	Effectif		Amplitude EWT		Moyenne EWT		Écart-type EWT	
	avant	après	avant	après	avant	après	avant	après
AU	97	34	143 - 200	145 - 198	170,8	172,1	12,7	12,5
QC	99	13	78-133	81-124	99,0	100,1	11,3	11,8
QI	98	30	91-155	93-153	123,1	126,3	16,5	16,6
Toutes	294	77	78 - 200	81 - 198	130,6	142,1	32,8	31,6

La chimiométrie des données est réalisée avec le logiciel WinISI et le meilleur modèle d'étalonnage par régression PLS est construit pour les trois espèces confondues. Le modèle créé pour les 77 groupes de feuilles est très précis : r^2 de 97%, SEC de 4%, SECV de 6% et SD/SECV de 5,3. Les valeurs prédites et estimées par le modèle s'ajustent quasiment sur une droite (Figure 61).

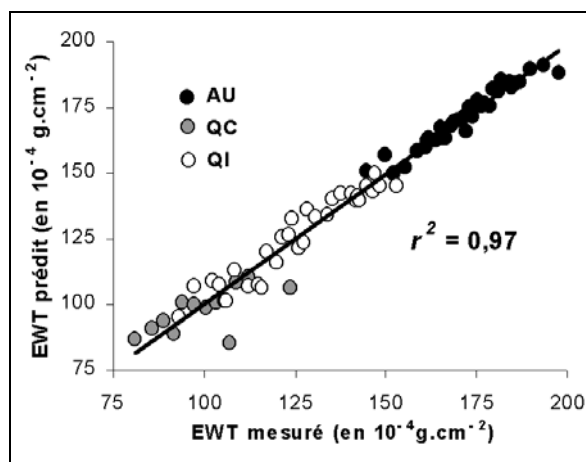


Figure 61. Indice EWT mesuré et prédit par le modèle d'étalonnage PLS

Il apparaît clairement que la méthode de spectroscopie des feuilles sèches est plus précise que celle des feuilles fraîches pour le paramètre suivi.

Dans ce chapitre, les travaux de recherche ont porté sur des échantillons de feuilles dissociés des individus et encore plus du peuplement. Dans le prochain chapitre, nous changeons d'échelle d'observation à l'aide d'images de télédétection à haute résolution, à partir desquelles on estimera l'état hydrique du couvert.

CHAPITRE 4

TÉLÉDÉTECTION À HAUTE RÉOLUTION DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION

« Ce qu'on voulait faire, c'est en le faisant qu'on le découvre »
Emile Chartier dit Alain, écrivain (1385-1433)

Nous avons vu dans les chapitres précédents comment le risque de feu de forêt était prédit et de quelle manière, à la fois sur le terrain et en laboratoire, on pouvait mesurer et estimer l'état hydrique des plantes.

A présent, nous allons nous éloigner un peu du terrain et des sujets analysés -la végétation en l'occurrence- pour les observer à distance. Cette technique est appelée la **télédétection**. Selon la précision avec laquelle on peut examiner des objets de plus en plus petits, on parle de télédétection :

- à basse résolution spatiale (BRS) (supérieure à 100 mètres),
- à haute résolution spatiale (HRS) (entre 10 et 100 mètres),
- et à très haute résolution spatiale (THRS) (inférieure à 10 mètres).

Les trois domaines ont été étudiés dans le cadre de cette thèse à travers plusieurs sources de données :

- BRS : images des capteurs NOAA-AVHRR, TERRA-MODIS et SPOT-VEGETATION (résolution de 500 à 1000 mètres) ;
- HRS : images du capteur SPOT-HRVIR (résolution de 20 mètres) ;
- THRS : images aériennes d'avion et de drone télécommandé (résolution de 5 à 50 centimètres).

Dans ce chapitre, nous comparons les mesures de terrain (présentées au *chapitre 2*) aux images du satellite SPOT-HRVIR d'une résolution de 20 mètres. Après une rapide présentation du contexte, nous précisons l'intérêt des images HRS pour le suivi de l'état hydrique de la végétation. Un dernier protocole permet ensuite d'identifier la résolution spatiale réelle du pixel SPOT-HRVIR pour notre site d'étude.

1. ÉTAT DE L'ART

La lutte contre les feux de forêt est devenue une véritable gageure lors des dernières décennies pour beaucoup de pays. Chaque année, la forêt méditerranéenne est frappée de nombreux feux, difficiles à prévoir et à localiser. Le besoin de chercher de nouveaux outils de lutte contre les feux de forêt incite à plus de compréhension du phénomène « incendie » en recherchant ses causes. Pour comprendre les processus de combustion, il faut simuler les paramètres rentrant en jeu, comme les variables météorologiques, la quantité de biomasse et la teneur en eau de la végétation (Ceccato *et al.*, 2001). Cet état hydrique de la végétation est l'un des facteurs principaux régissant les phases d'allumage et de propagation du feu, et est ainsi intégré dans plusieurs modèles de comportement du feu (Rothermel *et al.* 1986, Chuvieco *et al.* 2002). Les techniques de télédétection présentent l'avantage de suivre la végétation sur de grandes surfaces et plusieurs fois sur la saison (Fourty et Baret, 1998). Ses potentialités sont réelles pour fournir des informations sur la probabilité du risque de feu ou sur les processus de combustion à des échelles locales comme globales (Ceccato *et al.*, 2002b). De plus, l'intérêt des méthodes de suivi du stress hydrique des plantes par satellite est réel car elles peuvent être employées pour différents couverts avec des ajustements locaux (Jackson 1982, Hunt *et al.* 1987).

Les biomasses foliaires représentent les principales surfaces observées par les capteurs satellitaires ou aéroportés. En outre, comme l'ont démontré Fourty et Baret (1998), la teneur en eau et la teneur en matière sèche sont les seuls constituants d'une feuille facilement détectables par les mesures de réflectance ou de transmittance. Fourty (1996) montre de bonnes prédictions de ces éléments à l'aide d'inversions de modèles. Jacquemoud et Baret (1990), utilisant le modèle de propriétés optiques des feuilles *Prospect*, concluent également que le contenu en eau peut être évalué avec une bonne précision à partir du spectre de réflectance d'une feuille fraîche. La précision de la prédiction est très sensible à la résolution radiométrique du capteur utilisé pour la mesure. Ainsi, les feuilles sont les organes végétaux les plus appropriés pour corrélérer leur teneur en eau aux informations satellitaires.

De nos jours, les satellites d'observation de la Terre explorent l'environnement avec des précisions spatiale, spectrale et temporelle toujours meilleures. Les paramètres physiologiques des plantes sont étudiés pour les parties visible et infrarouge du spectre électromagnétique. Le but de notre étude est d'améliorer la localisation du risque d'incendie, en intégrant au système actuel de prévention des incendies des informations issues des images satellitaires, à savoir des cartes de teneur en eau prédites par télédétection. Nous souhaitons ainsi spatialiser l'état hydrique de la végétation méditerranéenne par télédétection pour prévenir le risque de feu de forêt.

A une échelle locale, très peu d'études ont utilisé des capteurs à haute résolution spatiale pour suivre l'état hydrique de la végétation et aucune concernant le capteur HRV ou HRVIR des satellites SPOT. Les causes sont multiples : faible intérêt du domaine d'étude au regard des besoins en cartographie d'occupation du sol, nécessité d'acquérir des séries temporelles d'images de bonne qualité, échantillonnage de terrain laborieux...

Récemment, Chuvieco et al. (2002) ont étudié des séries temporelles d'images du capteur *Thematic Mapper* TM du satellite LANDSAT pour évaluer l'indice FMC. Ce premier travail, basé sur 6 sites au centre de l'Espagne en zones de prairies et de garrigue, met en évidence de bonnes relations empiriques entre la teneur en eau de la végétation et les indices satellitaires dérivés des bandes de réflectance du capteur TM. L'étude met également en exergue l'intérêt de la zone du **moyen infrarouge** du spectre pour estimer la FMC. Même si les données du capteur TM ne sont pas adaptées pour l'estimation opérationnelle du risque de feu (une image tous les 16 jours au mieux), ce premier travail révèle l'intérêt du moyen infrarouge et donc l'intérêt des capteurs à basse résolution comme SPOT-VEGETATION et TERRA-MODIS, qui présentent respectivement 1 et 3 canaux dans cette région du spectre.

2. CARTOGRAPHIE ET ESTIMATION DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION PAR SPOT-HRVIR

2.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Dans le cadre de la prévention des feux de forêt, l'état hydrique des plantes est un facteur clé, inversement relié à l'inflammabilité des végétaux (Viegas *et al.*, 1992). Il est possible d'étudier les relations entre le contenu en eau des plantes et les données satellitaires dans la mesure où les deux sources d'informations sont disponibles et de qualité. L'estimation du contenu hydrique de la végétation est souvent difficile lorsque l'échelle spatiale d'étude dépasse l'individu ou le bouquet, et lorsque l'objectif est de suivre spatialement et temporellement de grandes zones (Lawrence, 1988).

En général, la teneur en eau de la végétation est évaluée à partir d'indices de risque météorologique, basés sur des paramètres comme la température, l'humidité de l'air, la pluie et la vitesse du vent (*chapitre 1*). Cette approche présente deux limites principales :

- La comparaison entre les conditions climatiques et l'état hydrique des plantes est supposée indépendante de l'espèce, alors qu'en réalité l'adaptation des plantes aux conditions climatiques est très variable et dépend surtout de l'espèce (Chuvieco *et al.*, 2001) ;
- Il est difficile d'appliquer les indices à de grandes surfaces de par la forte dispersion géographique des stations météorologiques de mesure.

En comparaison, la mesure directe du contenu en eau des plantes est précise mais nécessite des moyens importants en temps et en personnel. Les mesures sur le terrain ne sont souvent représentatives de l'état hydrique que d'une zone limitée et le suivi de grandes surfaces est impossible.

De ce fait, la télédétection est un outil potentiel pour suivre sur de grandes surfaces les conditions physiologiques de la végétation. La difficulté réside dans l'établissement de modèles simples et robustes reliant l'information satellitaire à l'état hydrique des plantes.

Dans un premier temps, l'objectif de notre travail consiste à cartographier les différents comportements hydriques de la végétation pour une garrigue type à partir d'images satellitaires. Nous souhaitons **identifier les zones où les variations d'humidité sont prépondérantes**. La méthodologie employée est généralisable à n'importe quel site.

Dans un second temps, nous souhaitons proposer un modèle simple reliant les mesures de réflectance du capteur SPOT-HRVIR à la teneur en eau mesurée sur le terrain pour une garrigue près de Montpellier.

Un travail préliminaire à l'aide d'un radiomètre CIMEL, présenté en *annexe 7*, a permis d'étudier les propriétés spectrales d'une garrigue selon ses composants. Le site d'étude est localisé près de Montpellier sur une zone de 2x2 km² (coordonnées du centre : 43°35'N-3°39'E) sur un plateau calcaire (cause d'Aumelas) de 300 mètres d'altitude. Cette zone a également été cartographiée de manière très précise (5-10 cm) à l'aide d'un aéronef télécommandé, le drone Pixy® (*annexe 8*).

2.2. DONNÉES

2.2.1. TENEUR EN EAU DE RÉFÉRENCE

La teneur en eau de la végétation (indice FMC) est calculée par la méthode classique d'étuvage décrite dans le *chapitre 2*. Ainsi entre 14 et 16h, on prélève environ 20 grammes de feuilles (de lumière et de l'année) de deux espèces (chêne kermès QC et chêne vert QI).

Notre but premier est de relier cette teneur en eau aux données du pixel satellitaire. Pour éviter de prélever la végétation en un seul site ponctuel, nous préférons organiser les prélèvements sous la forme d'une croix de 28 mètres de côté (*Figure 62*).

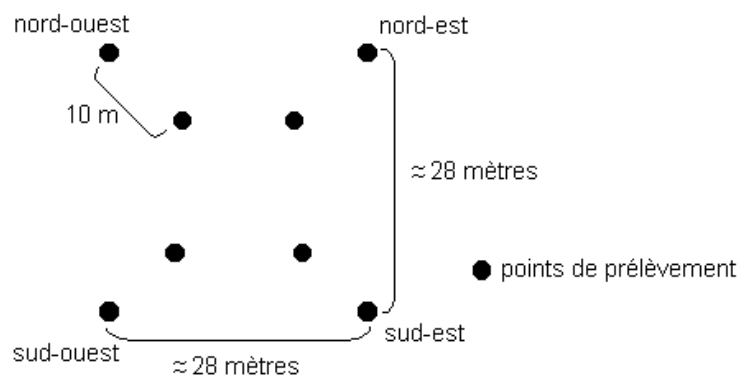


Figure 62. Protocole d'échantillonnage en croix

Pour prendre en compte les variations locales de l'indice FMC, à chaque passage du satellite **huit prélèvements** sont réalisés sur une croix orientée NO-SE-NE-SO. Sur chaque branche de la croix, deux échantillons sont prélevés à 10 mètres d'intervalle. Leurs positions sont repérées à l'aide d'un GPS différentiel ; les précisions en latitude et longitude sont inférieures au mètre. La taille de la croix est adaptée à la résolution des images satellitaires pour y inclure au moins un pixel SPOT-HRVIR (20 x 20 m). Dans le cas où plusieurs pixels sont à cheval sur la croix, on choisit le pixel majoritaire.

En conséquence on peut relier les réflectances du pixel choisi à la moyenne des indices FMC des huit prélèvements.

2.2.2. IMAGES SPOT-HRVIR

Le premier satellite SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) a été lancé en 1986 (Tableau 41).

Tableau 41. Historique des satellites SPOT

Satellite	Date de mise en orbite	État
SPOT 1	22 février 1986	N'est plus utilisé
SPOT 2	22 janvier 1990	Opérationnel
SPOT 3	26 septembre 1993	En panne depuis novembre 1996
SPOT 4	24 mars 1998	Opérationnel
SPOT 5	4 mai 2002	Opérationnel

Ses résolutions, tant spatiale que radiométrique, justifient son emploi dans de nombreuses études environnementales (Girard et Girard 1999, Clandillon *et al.* 1999).

L'orbite de SPOT est quasi-polaire, faiblement excentrée et héliosynchrone (altitude moyenne de 822 km, inclinaison de 98,7 grades et période de 1h41mn24s). On parle d'orbite phasée puisque SPOT repasse sur la même trace (projection de la trajectoire sur le sol) tous les 26 jours après 369 révolutions. Au niveau de la longitude de la France, le satellite croise l'équateur du Nord vers le Sud entre 10h et 12h locale.

Nous disposons de sept images de l'été 2001 des capteurs HRVIR 1 ou 2 (*Haute Résolution Visible et Infra Rouge*) du satellite SPOT 4, couvrant chacune une zone d'environ 60 x 60 km près de Montpellier (coordonnées K047-J262) (Tableau 42).

Tableau 42. Caractéristiques des images SPOT-HRVIR utilisées

Dates	Heures locales	Satellite et capteur	Angle de visée
14-juin-01	11h02'19"	SPOT 4 HRV2	19,9°
17-juil-01	10h27'26"	SPOT 4 HRV2	-29,3°
27-juil-01	10h35'11"	SPOT 4 HRV1	-19,3°
21-août-01	10h54'22"	SPOT 4 HRV2	9°
27-août-01	10h37'52"	SPOT 4 HRV2	-14,1°
27-sept-01	10h42'44"	SPOT 4 HRV2	-8°
12-oct-01	10h54'20"	SPOT 4 HRV1	9,3°

Les images correspondent au produit Ortho® (corrections radiométriques et géométriques à l'aide d'un modèle numérique de terrain) fourni par la société SPOT IMAGE®.

Les capteurs HRVIR comportent quatre bandes spectrales (Figure 63) :

- B1(Vert) : 500 à 590 nm,
- B2 (Rouge) : 610 à 680 nm,
- B3 (Proche infrarouge) : 790 à 890 nm,
- B4 (Moyen infrarouge) : 1580 à 1750 nm.

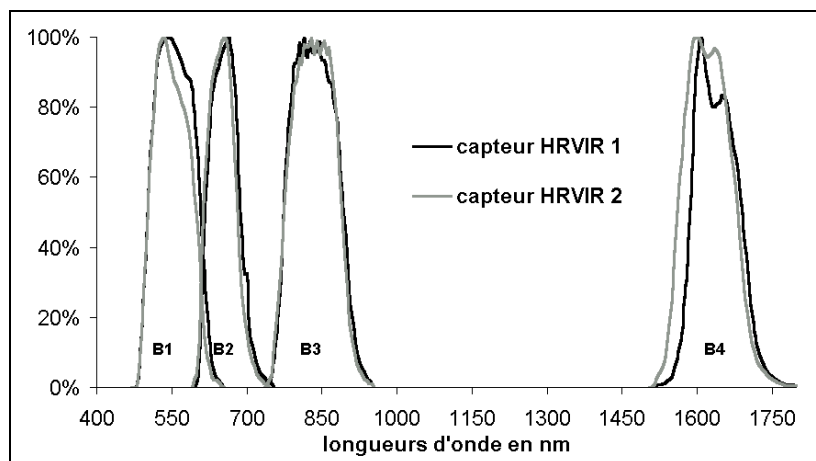


Figure 63. Sensibilités spectrales de SPOT-HRVIR 1 et 2

Pour visualiser les images on attribue trois bandes (parmi quatre) aux couleurs Bleu Vert Rouge (système RVB) accessibles à l'œil humain (Figure 64) :

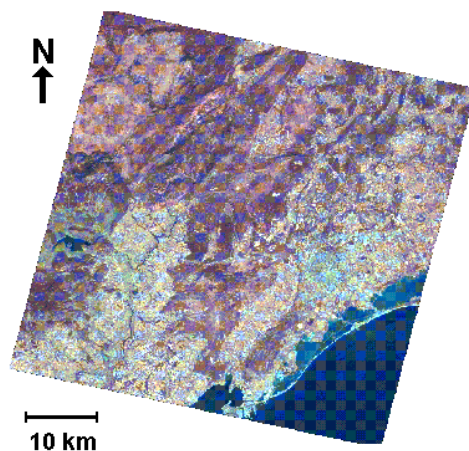


Figure 64. Exemple d'une image SPOT-HRVIR du 27 août 2001 près de Montpellier en fausse couleur (canal Rouge en bleu, canal PIR en vert et canal MIR en rouge)

2.3. TRAITEMENTS DES IMAGES

L'ensemble des opérations de traitement des images est réalisé à l'aide du logiciel Erdas® Imagine®. Ces traitements consistent à simplifier et homogénéiser l'information satellitaire initiale.

2.3.1. SÉLECTION DES ZONES À RISQUE PAR L'INTERMÉDIAIRE DES DONNÉES CORINE LAND COVER

Nous souhaitons simplifier les images satellitaires et ne conserver que les pixels correspondant aux zones de couverts végétaux à risque d'incendie (forêts et milieux naturels). Pour ce faire, nous utilisons la base de données d'occupation du sol *CORINE Land Cover* (CLC) réalisée en 1992 en Europe. Cette base de donnée consiste à regrouper une information géographique homogène de l'occupation du sol des pays de l'Union Européenne sous forme de cartes, distribuées par l'Agence Européenne de l'Environnement. En France, l'Institut Français de l'Environnement (IFEN) en fut le maître d'œuvre (cf. <http://www.ifen.fr/pages/3corin.htm>), en collaboration avec le CNES, le Ministère de l'écologie et du développement durable ainsi que divers organismes et institutions (BRGM, IFN, IGN...). L'inventaire CLC fut réalisé par l'IGN sur le tiers Sud de la France (5 régions) et par l'IFEN pour le reste du pays (17 régions).

La base de données classe l'occupation du sol en cinq groupes (Figure 65) :

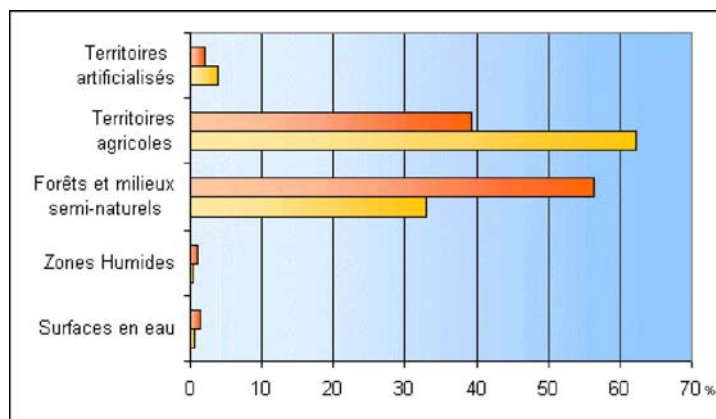


Figure 65. Répartition des types d'occupation du sol de la base de données CORINE Land Cover pour la région Languedoc-Roussillon (en orange) et la France (en jaune) (d'après http://www.ifen.fr/corine/clc_stat.htm#Languedoc-Roussillon)

L'unité de surface minimale cartographiée est de 5 hectares et la carte a été réalisée à l'aide d'enquêtes de terrain et d'images satellitaires : 42 images LANDSAT-MSS et 250 images SPOT-HRV. Concernant la zone méditerranéenne française, la carte CLC est basée sur des images satellitaires acquises entre juin et septembre des années 1987 et 1988, autant dire que l'information date un peu aujourd'hui !

On compte parmi les 5 groupes un total de 44 classes que nous regroupons, pour cette étude, en 2 classes distinctes : zones végétales à risque d'incendie (forêts...) et zones sans risque (territoires agricoles, zones urbaines, plans d'eau...) (Figure 66).

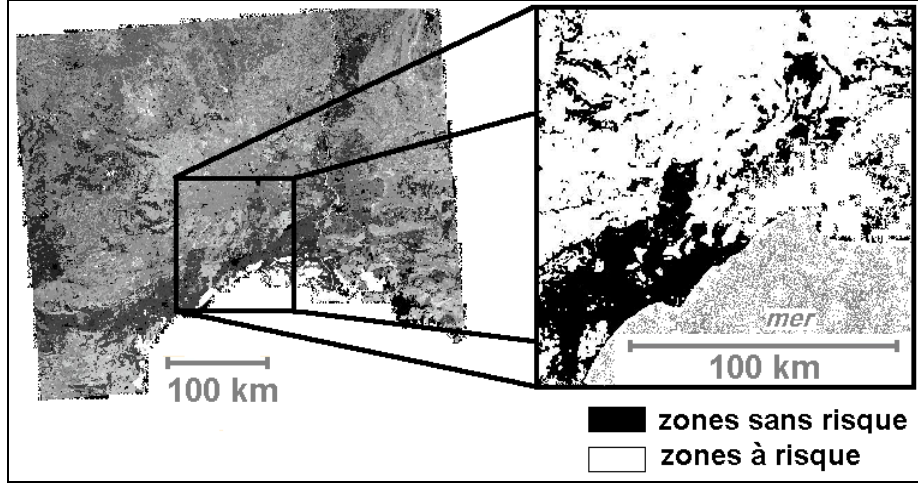


Figure 66. Transformation de la carte CLC de 44 classes initiales en 2 classes d'exposition au risque

Cette nouvelle carte est ainsi appliquée comme masque à chaque image satellitaire pour ne conserver que les pixels de végétation à risque d'incendie.

2.3.2. TRANSFORMATION DES LUMINANCES EN RÉFLECTANCES

Les images satellitaires présentent 4 canaux codés chacun sur 8 bits (de 0 à 255). Ces données correspondent à des mesures de luminance pour certaines conditions de réglage du capteur. En effet, la calibration des canaux diffère selon la version du capteur (HRVIR 1 ou 2), le canal et la période de l'année. Afin de comparer les images entre-elles, nous transformons les luminances initiales, aussi appelées **comptes numériques CN** (ou DN *Digital Number*) en valeurs de réflectance pour chaque canal à l'aide de l'équation suivante (Begni, 1988) :

Équation 24.
$$\rho_x = \frac{\pi d^2 C_x}{E_{sun x} K_x \cos \theta_s} ,$$

avec ρ_x la réflectance de la bande x ($0 < \rho_x < 1$),

d la distance du soleil à la Terre ($0,9833 < d < 1,0167$ en Unité Astronomique UA) variable selon le jour,

C_x le compte numérique de la bande x (codé sur 8 bits, $0 < C < 255$),

$E_{sun x}$ le rayonnement solaire pour la bande x du capteur,

K_x le coefficient de calibration (*gain*) de la bande x ,

θ_s l'angle zénithal solaire (en radians).

E_{sunx} et K_x sont donnés par le fournisseur des données pour les quatre bandes du capteur. Le calcul de la distance d du soleil à la Terre est disponible sur le site <http://perso.club-internet.fr/mzumelzu/index.html>. On peut aussi calculer une valeur approchée par la formule suivante :

Équation 25.
$$d = 1 + 0,0167 \left(\sin \left(\frac{2\pi(J - 93,5)}{365} \right) \right),$$
 avec J le numéro du jour de l'année.

L'angle zénithal solaire θ_s varie pour nos images de $67,7^\circ$ le 14 juin à $38,6^\circ$ le 12 octobre 2001.

Ainsi **nous disposons pour chaque pixel de quatre valeurs de réflectance** (une par bande). On parle de **réflectance exo-atmosphérique** puisque l'Équation 24 ne prend en compte que les paramètres liés aux conditions de prise de vue et au capteur, sans tenir compte de l'effet de l'atmosphère.

2.3.3. CORRECTIONS ATMOSPHÉRIQUES

Pour un site donné, les mesures de réflectance réalisées par le capteur à bord d'un satellite sont séparées du sol par plus de 800 kilomètres et subissent les perturbations des composants de l'atmosphère.

2.3.3.1. **ABSORPTION ET DIFFUSION DU RAYONNEMENT PAR L'ATMOSPHÈRE**

Ainsi les gaz en présence peuvent **absorber une partie du rayonnement** solaire : l'ozone et l'oxygène provoquent une faible atténuation du signal pour les bandes 1 2 et 3 du capteur HRVIR ; la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone sont responsables de l'absorption dans les bandes 3 et 4.

L'atmosphère **diffuse également une partie de l'énergie solaire reçue**. Ce phénomène correspond à l'action des molécules et des particules sur les ondes électromagnétiques. Il est fonction de la longueur d'onde du rayonnement et de la taille des éléments présents dans l'atmosphère : on parle de la **diffusion de Rayleigh** liée aux molécules gazeuses, de la **diffusion de Mie** due aux aérosols en suspension dans l'air.

L'atmosphère diffuse aussi une partie du rayonnement solaire reçu. Cette énergie réfléchie, en s'additionnant à celle répercutée par la surface terrestre, augmente la valeur du flux mesurée par le capteur et biaise son appréciation des objets.

2.3.3.2. **QUALITÉ DES IMAGES**

La plupart des images sont issues de programmation spécifique avec un niveau de qualité supérieur (moins de 10% de nuages). Pour notre zone d'étude du Causse d'Aumelas, les sept images sont exemptes de nuages. Nous ne disposons pas de mesure précise des composants de l'atmosphère aux heures de prise de vue pour notre site d'étude (station la plus proche à Avignon).

En revanche, Météo-France met à disposition sur quelques stations les données de visibilité horizontale, de rayonnement global et de température (*Tableau 43*).

Tableau 43. Conditions atmosphériques des images SPOT-HRVIR

Dates	Visibilité horizontale	Rapport RT*	Produit MOD04
14 juin 2001	50 km	14,5	-
17 juillet 2001	50 km	10,8	22%
27 juillet 2001	11 km	9,9	78%
21 août 2001	70 km	12,7	9%
27 août 2001	30 km	9,7	36%
27 septembre 2001	50 km	13,1	26%
12 octobre 2001	35 km	10,6	-

*Rayonnement global / Température moyenne de l'air

- Les conditions de visibilité sont relevées à l'heure du passage du satellite à la station Météo-France de Mauguio.
- Le rayonnement global quotidien et la température moyenne de l'air sont issus de la station de Gignac la plus proche du site d'étude.
- Le produit MOD04 correspond à une estimation de la qualité de l'atmosphère à partir des bandes visibles du capteur MODIS de la NASA. Ces données, comprises entre 0 et 1, sont acquises à 12h30 locale et correspondent au pixel de 10 x 10 km² de notre zone d'étude (43°41'15"N et 3°36'35"E).

Il est difficile de juger de la pertinence des observations du *Tableau 43* puisque le site d'étude se situe à 30 kilomètres à l'intérieur des terres alors que la station de Mauguio est localisée à l'aéroport international de Montpellier sur le littoral. Dans ces conditions maritimes, la nébulosité du ciel varie beaucoup sur de courtes distances. La station de Gignac proche du causse d'Aumelas ne dispose pas de données de visibilité. En revanche on peut calculer sur une journée le rapport entre le rayonnement global solaire et la température moyenne de l'air pour identifier les images pour lesquelles l'atmosphère est la plus perturbatrice.

L'estimation de ces perturbations est aussi réalisée par le capteur satellitaire MODIS qui propose une source supplémentaire d'informations. En conclusion, sur les sept images, deux semblent plus voilées : 27 juillet et 27 août 2001.

2.3.3.3. MÉTHODES DE CORRECTION

Il existe plusieurs méthodes pour corriger les effets de l'atmosphère sur la réflectance des images satellitaires. L'Équation 24 reste valable pour tous les modèles mais par rigueur de notation les comptes numériques initiaux C_x sont transformés en comptes numériques corrigés $\tilde{C}_x$.

2.3.3.3.1. MODÈLES GLOBAUX

Pour quantifier précisément les perturbations du signal causées par l'atmosphère, certains modèles globaux de correction se basent sur des données externes multisources décrivant la composition de l'atmosphère. On fait alors appel aux satellites géostationnaires et aux modèles météorologiques pour décrire la composition en trois dimensions de l'atmosphère (teneurs en vapeur d'eau, ozone, aérosols...) à partir de mesures directes et d'estimations plus ou moins précises.

On distingue ainsi les modèles de transfert radiatif 6S (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*) (Vermote et al., 1995 et 1997) et LOWTRAN (Kneizys et al., 1988) qui intègrent beaucoup de paramètres pour estimer les propriétés optiques de l'atmosphère (et ses effets sur la perturbation).

Les données à basse résolution du capteur VEGETATION du satellite SPOT (capteur proche d'HRVIR) sont quant à elles corrigées en routine par le modèle global SMAC (*Simplified Method for Atmospheric Correction*) développé par Rahman et Dedieu (1994).

Ces modèles globaux de correction réduisent grandement les perturbations du signal mais nécessitent toujours des données complémentaires issues de mesures, de base de données ou d'autres modèles. La précision est d'autant plus grande que la composition de l'atmosphère est connue.

2.3.3.3.2. MÉTHODE DARK OBJECT SUBTRACTION DOS

Cette méthode, discutée par de nombreux auteurs (Vincent 1972, Chavez 1975, 1988, 1989), consiste en un réétalonnage des comptes numériques pour chaque bande des images. On se base sur l'observation d'objets noirs (*Dark Object*) pour corriger les comptes numériques initiaux, selon la relation :

Équation 26.
$$\tilde{C}_x = \frac{C_x - C_{\min}}{\tau_z} ,$$

avec C_x le compte numérique de la bande x ,

$C_{\min}$ le compte numérique minimal de la bande x d'une image, correspondant à un objet noir,

τ_z la transmissivité de l'atmosphère.

Dans la plupart des modèles, τ_z est négligé. Ainsi l'Équation 26 se simplifie et on a :

Équation 27.
$$\tilde{C}_x = C_x - C_{\min} ,$$

avec C_x le compte numérique de la bande x ,

$C_{\min}$ le compte numérique minimal de la bande x d'une image, correspondant à un objet noir.

La méthode DOS a l'avantage de se baser uniquement sur des données de télédétection et ne nécessite aucune mesure complémentaire sur le terrain. Par contre pour des réflectances supérieures à 15%, la précision du modèle est moins bonne. La détermination sur l'image des comptes numériques minimaux est délicate et peut influencer sensiblement le résultat (Chavez, 1996).

2.3.3.3.3. MÉTHODE COST

Selon Chavez (1996), dans la méthode DOS τ_z est difficile à déterminer sans mesure précise. Il propose donc une approximation de τ_z en l'exprimant comme le cosinus de l'angle zénithal solaire, d'où le nom de la **méthode COST** (cosinus de tau). Dans ce cas, Chuvieco et al. (2002) et Huang et al. (2002) remarquent que τ_z peut être surestimé lorsque le ciel est très limpide (τ_z petit), le soleil haut sur l'horizon ($> 60^\circ$) et pour des grandes latitudes ($> 60^\circ\text{N}$).

2.3.3.3.4. MÉTHODE RETENUE

En l'absence de données complémentaires sur la composition de l'atmosphère, nous utilisons la méthode la plus simple basée sur l'image, soit le modèle DOS simplifié de l'Équation 27. Pour chaque image et chacune des 4 bandes du capteur HRVIR nous identifions les valeurs minimales des comptes numériques. Ce sont des invariants.

La correction moyenne des valeurs de réflectance des sept images SPOT est importante dans le visible et faible dans l'infrarouge : 21% pour le canal *Vert*, 9% pour le canal *Rouge* et moins de 1% pour les canaux *proche* et *moyen infrarouge*. Les perturbations atmosphériques sont en effet majoritaires dans le visible.

2.3.4. CALCUL DES INDICES SATELLITAIRES

Pour chaque pixel nous disposons des valeurs de réflectance, corrigées pour partie des effets de l'atmosphère. Il subsiste encore des perturbations, non prises en compte par le modèle de corrections atmosphériques, ainsi que des effets radiométriques directionnels de la surface terrestre. En effet on remarque que les images SPOT-HRVIR utilisées ont des angles de prises de vue très différents (de $-29,3^\circ$ à $+19,9^\circ$, *Tableau 42* précédent). Le dépointage du capteur sur la zone d'étude modifie l'angle d'observation du rayonnement. Enfin, on peut aussi observer des perturbations des réflectances de par la présence de sols nus sur nos images.

Pour s'affranchir de certains problèmes et surtout tirer partie au mieux de l'information portée par bande du capteur satellitaire, une multitude d'**indices satellitaires** (appelés aussi **néocanaux** ou **indices de végétation**) est proposée dans la littérature, associant 2 à 4 canaux dans des rapports plus ou moins complexes, ajustés ou non par des coefficients.

Ainsi pour chaque image et chaque pixel du capteur HRVIR, nous calculons 20 indices (*Tableau 44*) :

Tableau 44. Indices satellitaires testés

Caractéristiques	Indices
2 bandes : Vert et PIR	GNDVI
2 bandes : Rouge et PIR	CTVI, DVI, GEMI, IPVI, MSAVI2, NDVI, RVI, SAVI, TVI
2 bandes : PIR et MIR	GVMi, NDII, PIR / MIR
3 bandes : Rouge, PIR et MIR	SLAVI
bandes + coefficient de la droite des sols	PVI, TSAVI, MSAVI, WdVI
bandes + information sur la végétation	LCWI, RGRE

Après avoir corrigé les valeurs de réflectance et calculé 20 néocanaux en plus des 4 bandes initiales, nous regroupons les sept images pour ne conserver que la zone commune aux sept dates (surface d'environ 1000 km²) et les pixels qui correspondent seulement aux zones à risque d'incendie de forêt.

2.4. RÉSULTATS

Deux résultats sont présentés :

- Tout d'abord, de manière globale sur la zone commune aux images SPOT-HRVIR, nous cartographions indirectement pour l'année 2001 la variation de l'état hydrique de la végétation, et pouvons ainsi identifier les lieux probables de plus forte amplitude ;
- Ensuite, de manière spécifique sur un site d'étude de sept hectares, nous comparons pour chaque pixel les mesures de FMC de référence aux valeurs de réflectance (canaux et néocanaux).

2.4.1. CARTOGRAPHIE DE LA VARIATION DE L'ÉTAT HYDRIQUE

Après correction des réflectances par la méthode DOS simplifiée, nous choisissons de simplifier les données initiales au moyen d'un indice satellitaire. Ainsi, pour chaque image et chaque pixel la combinaison des bandes B3 et B4 permet de calculer la valeur de l'indice NDII (*Normalized Difference Infrared Index*) (Hunt et Rock, 1989) défini par :

Équation 28.
$$NDII = \frac{\rho_{IRC} - \rho_{IRM}}{\rho_{IRC} + \rho_{IRM}}$$

ρ_{IRC} : réflectance dans le proche infrarouge,
 ρ_{IRM} : réflectance dans le moyen infrarouge.

Cet indice est souvent employé pour suivre l'évolution de l'état hydrique de la végétation. Nous disposons donc pour chaque pixel de 7 valeurs correspondant aux indices NDII des 7 dates.

Comme premier essai, nous choisissons de regrouper les pixels en classes de comportement voisin. Ce regroupement s'effectue par la méthode de **classification non supervisée** en nuées dynamiques. Nous choisissons arbitrairement 20 classes. Après vérification des résultats à l'aide de mesures sur le terrain, la classification obtenue ne paraît pas très pertinente.

Un second essai consiste alors à considérer pour chaque pixel non plus les 7 valeurs de l'indice NDII (travail en absolu) mais plutôt l'amplitude de variation de l'indice sur la période d'étude (travail en relatif). La classification automatique en 20 classes permet de représenter finement les variations de l'indice. Pour rester à une échelle globale, ces 20 classes sont regroupées pour ne garder que **5 classes** jugées d'une précision suffisante (Roldan *et al.*, 2003). Afin de créer une carte « propre », nous appliquons un filtre morphologique (valeur majoritaire sur une fenêtre de 5 x 5 pixels) pour éliminer les pixels isolés.

Lors de cette étape de lissage, la perte de précision est minime puisque moins de 10% des pixels changent de classe et la majorité de ceux-ci (trois quarts) passent d'une classe à sa voisine.

Nous obtenons la carte représentée sur la Figure 67 :

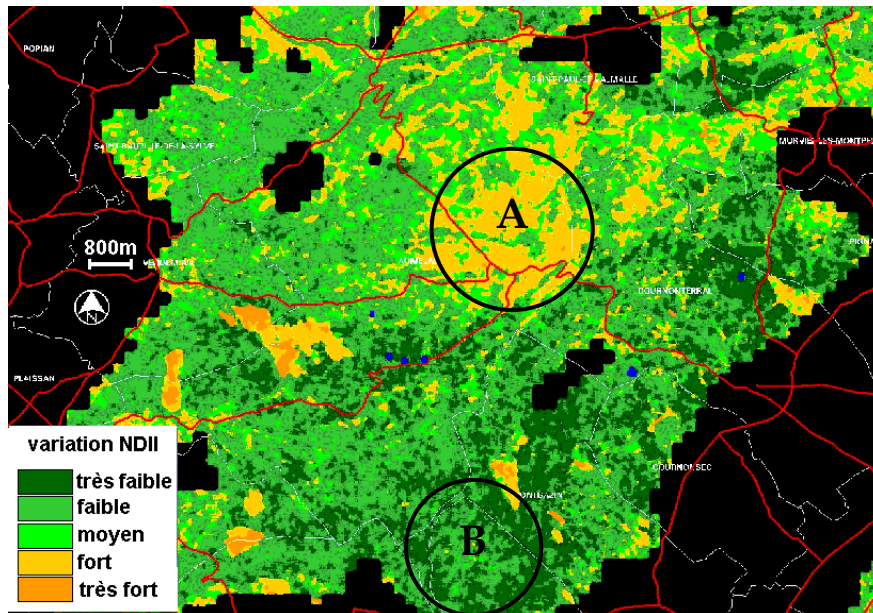


Figure 67. Carte de variation de l'indice NDII près de Montpellier
(traits rouge : routes, traits blanc : limites communales)

Les cinq classes composant la carte finale reflètent bien les différents niveaux de variations d'humidité de la végétation pour la période considérée (juin à octobre 2001). En conséquence, les sites d'échantillonnage pour les prochains étés doivent réunir les caractéristiques suivantes :

- Forte variation de teneur en eau (classes 4 ou 5 de couleur orange sur la Figure 67),
- Présence des deux espèces de chêne QC et QI,
- Proximité d'un axe routier.

Les zones à très forte variation de l'indice NDII sont en réalité des zones ayant subi un incendie pendant l'été. Les zones à forte variation (cercle A) correspondent essentiellement à des surfaces de garrigue basse à chêne kermès. A l'inverse les zones à faible variation de l'indice (cercle B) correspondent plutôt à des forêts de chêne vert où le stress hydrique est moins marqué.

2.4.2. ESTIMATION DE L'ÉTAT HYDRIQUE À PARTIR DES RÉFLECTANCES SPOT-HRVIR

Nous restreignons l'étude aux seuls pixels satellitaires où la teneur en eau a été mesurée. Pour chaque pixel les valeurs de réflectance dans les 4 bandes ainsi que les 20 indices calculés sont comparés à l'indice FMC moyen de la végétation.

Pour les pixels suivis, nous remarquons que les bandes sont fortement corrélées entre elles (Tableau 45), en particulier les bandes *Vert* et *Rouge* ainsi que PIR et MIR :

Tableau 45. Matrice de corrélation des bandes

r^2	V	R	PIR	MIR
V	1,00	0,94	0,82	0,86
R	0,94	1,00	0,83	0,88
PIR	0,82	0,83	1,00	0,94
MIR	0,86	0,88	0,94	1,00

Ainsi il y a de grandes chances que des indices basés sur des bandes différentes donnent des résultats équivalents.

2.4.2.1. INDICE FMC DE RÉFÉRENCE

Les mesures de teneur en eau des feuilles (FMC) sont réalisées pour les deux espèces en cinq sites pendant l'été 2001 une à deux fois par semaine (Tableau 46) :

Tableau 46. Caractéristiques des prélèvements

Espèce	Numéro du site	Nombre de jours de prélèvement	Nombre d'échantillons	FMC		
				amplitude	moyenne	écart-type
Chêne kermès QC	1	19	166	0,64 – 1,04	0,78	0,10
Chêne kermès QC	2	19	148	0,63 – 0,92	0,77	0,08
Chêne kermès QC	3	19	150	0,60 – 0,89	0,76	0,08
Chêne vert QI	4	18	162	0,64 – 0,88	0,78	0,06
Chêne kermès QC	5	23	151	0,71 – 1,05	0,81	0,10
Chêne kermès QC	4 sites	23	615	0,60 – 1,05	0,78	0,09
Chêne vert QI	1 site	18	162	0,64 – 0,88	0,78	0,06

On considère les mesures de FMC correspondant au jour d'acquisition des images satellitaires. Lorsque la teneur en eau des plantes n'est pas mesurée exactement le même jour, on calcule une FMC théorique en supposant son évolution linéaire entre deux dates.

Au niveau des images satellitaires, on ne garde pour chaque image que les valeurs radiométriques des 5 pixels (4 sites de chêne kermès et 1 site de chêne vert).

Au total nous disposons de **30 pixels** pour calculer les relations et développer d'éventuels modèles.

2.4.2.2. RELATION ENTRE LA FMC ET LES INDICES SATELLITAIRES

Nous obtenons les relations linéaires figurant dans le *Tableau 47* :

Tableau 47. Relation entre l'indice FMC et les données satellitaires

Critères		Chêne kermès	Chêne vert	Les deux
effectifs		25	5	30
Meilleure bande	bande	PIR	PIR	Vert
	coeff. de détermination r^2	22%	60%	14%
	seuil de signification	< 2%	> 10%	< 5%
Meilleur indice	indice	MSAVI	MSAVI	GVMi
	coeff. de détermination r^2	28%	85%	9%
	seuil de signification	< 1%	< 5%	> 10%

Il est hasardeux de calculer des coefficients de détermination r^2 pour des effectifs aussi faibles. Un minimum de 30 individus est souvent recommandé en statistique. Pour de faibles effectifs, on utilise une table spécifique permettant de décrire le niveau de risque accepté (*annexe 10*). Pour les six tests réalisés, un test est acceptable à moins de 1%, un à moins de 2% et deux à moins de 5%. Les deux derniers (chêne vert et bande, les deux chênes et indices) ne sont pas acceptables au risque de 10%.

Seul l'indice MSAVI pour le chêne vert semble relié à l'indice FMC (r^2 de 85% pour 5 pixels). De façon générale, les 20 indices satellitaires testés ne sont pas satisfaisants et **aucune relation simple** entre l'état hydrique de la végétation et les données SPOT-HRVIR n'apparaît.

L'analyse en régression multiple peut permettre d'améliorer les relations.

2.4.2.3. RÉGRESSION MULTIPLE ENTRE L'INDICE FMC ET LES BANDES SPECTRALES DE SPOT-HRVIR

A partir des indices satellitaires et des bandes spectrales, nous calculons par régression multiple le meilleur modèle (*Tableau 48*) :

Tableau 48. Relation entre la FMC et la combinaison linéaire des bandes

Espèce	Effectif	r^2	Seuil	Meilleur modèle
Les deux chênes	30	27%	< 1%	FMC = 3,229 V - 2,548 R - 0,433 PIR + 0,782 MIR + 0,711

Si l'on considère l'ensemble des données (n=30), le modèle linéaire combinant les quatre bandes de HRVIR est médiocre même si la corrélation double (le r^2 passe de 14 à 27%).

On peut différencier les données selon quatre critères :

- **FMC de qualité** : l'écart-type des valeurs de FMC est supérieur lors du premier jour de mesure (14 juin) à cause d'une méconnaissance du milieu et du protocole de prélèvement. Pour le dernier jour du passage du satellite (12 octobre), les mesures de FMC sur le terrain les plus proches datent du 18 septembre et du 17 octobre et de nombreuses pluies ont eu lieu entre ces deux dates. L'indice FMC théorique du jour de l'image satellitaire, calculé par interpolation linéaire entre les deux dates, paraît peu fiable.

- **Atmosphère de qualité** : on a précisé dans le *Tableau 43* que les jours du 27 juillet et du 27 août présentent un voile nuageux, pouvant rendre les images satellitaires impropres à l'analyse, en dépit du modèle de correction des effets atmosphériques appliqué aux données.
- **Rayonnement de qualité** : l'angle de visée du capteur est très variable pour les sept images (de $-29,3^\circ$ à $+19,9^\circ$, *Tableau 42* précédent) et seules trois images (21 août, 27 septembre et 12 octobre) sont proches de la verticale avec respectivement $+9^\circ$, -8° et $+9,3^\circ$, limitant ainsi les perturbations radiométriques du signal. L'angle de visée du capteur introduit des distorsions du signal qui sont dues au fait que les surfaces visées ne sont pas lambertiennes (phénomène de *hot spot* très marqué de la végétation).
- **Période de sécheresse** : la perception du contenu en eau de la végétation par le satellite est peut-être plus adaptée en période de stress hydrique important. L'été 2001 a été marqué par une sécheresse de deux mois (absence de pluies entre le 16 juillet et le 21 septembre). Nous considérons donc les quatre images correspondant à cette période.

Pour les quatre critères, les corrélations sont nettement meilleures (*Tableau 49*).

Tableau 49. Relation entre la FMC et la combinaison linéaire des bandes

Espèce	Critère	Images	n	r^2	Seuil	Meilleur modèle
Les deux chênes	FMC de qualité	5 dates : 17 et 27 juillet, 21 et 27 août, 27 septembre	23	56%	< 1%	FMC = 0,595 V + 1,374 R - 1,078 PIR + 1,155 MIR + 0,631
	Atmosphère de qualité	5 dates : 14 juin, 17 juillet, 21 août, 27 septembre, 12 octobre	20	58%	< 1%	FMC = 1,023 V - 4,761 R - 1,562 PIR + 3,620 MIR + 0,678
	Rayonnement de qualité	3 dates : 21 août, 27 septembre, 12 octobre	11	61%	< 2%	FMC = 5,736 V - 7,058 R - 0,054 PIR + 1,256 MIR + 0,677
	Période de sécheresse	4 dates : 17 et 27 juillet, 21 et 27 août	18	78%	< 1%	FMC = 2,236 V + 0,465 R - 1,010 PIR + 0,894 MIR + 0,646

Le meilleur modèle agit de façon équivalente et logique : lorsque l'état hydrique de la plante (FMC) diminue, la réflectance dans les canaux *Vert* et *Moyen infrarouge* diminue alors que la réflectance dans le canal *Proche infrarouge* augmente. Les coefficients de détermination obtenus sont tous acceptables au seuil de 2%.

Pour chaque critère, le nombre de pixels à comparer aux teneurs en eau de terrain se restreint. Ce changement d'effectif joue certainement un rôle dans l'amélioration des résultats. Néanmoins, si l'on sélectionne des **données initiales de qualité** (FMC de terrain comme images de télédétection), on augmente significativement les corrélations : le r^2 passe respectivement de 27 à 56, 58 et 61%. Dans le cas où l'on se limite aux données de FMC pour la période de sécheresse de l'été 2001, le modèle basé sur la combinaison linéaire des bandes de SPOT-HRVIR devient très correct (r^2 de 78%).

Pour ce modèle, on obtient l'ajustement des données présenté sur la Figure 68 :

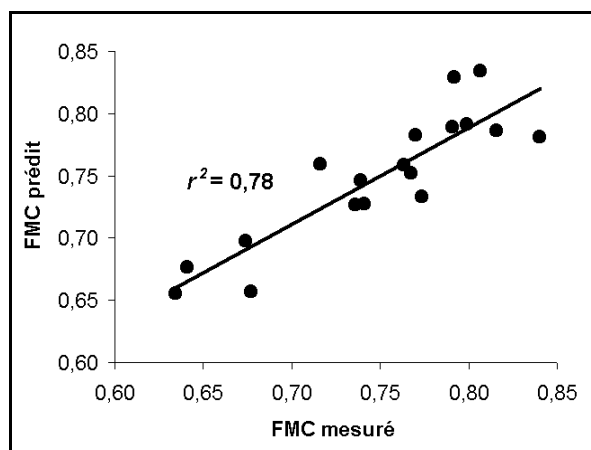


Figure 68. Indice FMC estimé et prédit par le modèle pour la période de sécheresse

Pour cette série de données de la période de sécheresse, on peut toujours ajuster un meilleur modèle si l'on considère les indices satellitaires (Tableau 50) :

Tableau 50. Relation entre l'indice FMC et la combinaison linéaire ou non des bandes et indices satellitaires

Méthode	r^2	Seuil	Meilleur modèle
Régression linéaire avec les 4 bandes	54%	< 1%	Canal Vert
Régression non linéaire avec le canal Vert	67%	< 1%	$FMC = 9,876 V - 62,027 V2 + 109,375 V3 + 0,324$
Régression linéaire avec les 20 indices satellitaires	69%	< 1%	Indice GNDVI
Régression non linéaire avec l'indice GNDVI	75%	< 1%	$FMC = 0,656 + 0,127 / [1 + (GNDVI / 0,710) \exp 78,909]$
Régression multiple avec les 4 bandes	78%	< 1%	$FMC = 2,236 V + 0,465 R - 1,010 PIR + 0,894 MIR + 0,646$
Régression multiple avec les 4 bandes et 10 indices	92%	< 1%	Très compliqué et sans intérêt

Ainsi on passe de 54% (régression avec le canal Vert seul) à plus de 92% si on ajoute un modèle complexe composé de l'ensemble des données spectrales (canaux et néocanaux). L'amélioration de la corrélation se fait alors au détriment de la simplicité du modèle.

2.5. DISCUSSION

2.5.1. CARTOGRAPHIE DES ZONES DE FORTE VARIATION DE L'ÉTAT HYDRIQUE

A partir de sept images du capteur HRVIR de SPOT 4, on réalise une carte de variation de l'indice NDII pour rendre compte des différences de comportement de la végétation de juin à octobre 2001. De manière générale, la classification obtenue aide à **distinguer les couverts végétaux entre eux** (espèce, densité, stade phénologique...) mais ne permet pas forcément de préciser les différences de comportement hydrique à l'intérieur de chaque espèce.

On ne fait que confirmer les différentes études sur le cas de l'Aumelas (Dauriac *et al.* 2001, Iglesias 2003, Roldan 2003) selon lesquelles, pour une saison donnée, l'amplitude hydrique du chêne kermès QC (strate arbustive) est beaucoup plus grande que celle du chêne vert QI (strate arborescente). La carte obtenue doit être affinée par des mesures de terrain complémentaires.

On peut aussi penser que l'indice NDII choisi n'est pas le mieux adapté au contexte et donc tester des classifications à partir d'autres indices basés sur les bandes proche et moyen infrarouge du capteur (indice SAVI de Huete 1988, indice GVMI de Ceccato *et al.* 2001), puis comparer les nouvelles cartes.

2.5.2. ESTIMATION DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION À PARTIR DES RÉFLECTANCES DE SPOT-HRVIR

En ce qui concerne l'estimation de l'état hydrique de la végétation par SPOT-HRVIR, les données initiales utilisées sont conséquentes : sept images satellitaires pendant quatre mois sur la même zone et quatre mois de mesures de FMC de terrain à l'échelle du pixel HRVIR par l'intermédiaire d'une croix d'échantillonnage.

Malgré ces efforts méthodologiques, les effectifs totaux sont faibles (30 pixels) et les données s'y rapportant de forte hétérogénéité : deux espèces suivies, conditions atmosphériques variables, angles de prise de vue du capteur différents, périodes de sécheresse et de pluie...

En considérant l'ensemble des données, les modèles sont mauvais. En revanche si l'on ne garde qu'une partie des données (11 à 23 pixels), selon différents critères de qualité, on améliore fortement les relations (r^2 de 56 à 78%). Le meilleur modèle est basé sur les données des deux mois de sécheresse de l'été 2001 et combine linéairement les quatre bandes du capteur (r^2 de 78% pour 18 pixels).

On peut toutefois discuter de la pertinence de ces résultats. En effet, deux points restent à éclaircir :

- Au niveau de la végétation, le chêne vert observe une très faible variation de son contenu en eau, même lors de sécheresses extrêmes et le chêne kermès a une faible biomasse. Il semble donc important de choisir un meilleur site pour lequel l'espèce choisie aura une variation importante de teneur en eau pendant l'année et une biomasse importante. On peut penser par exemple à l'arbousier et à la bruyère arborescente.
- Au niveau des données satellitaires, il est important de prendre en compte de façon plus fine :
 - les perturbations causées par l'atmosphère : des équipements de terrain supplémentaires permettent de mesurer les paramètres d'éclairement (direct et diffus), en complément des bases de données Météo-France sur les composants de l'atmosphère ;
 - les effets radiométriques d'arrière plan : le site d'étude choisi présentait en 2001 une proportion de sol nu de 11% composé d'affleurements rocheux calcaires très réfléchissants, augmentant fortement les valeurs de réflectance. Il est important de choisir des sites où la végétation est la plus homogène possible et couvre en totalité le sol ;
 - les effets radiométriques de l'angle de prise de vue peuvent être réduits en choisissant des images proches du nadir³⁰ et/ou en corrigeant les effets par des modèles de réflectance bidirectionnelle.

³⁰ proches de la verticale

3. RÉOLUTION SPATIALE RÉELLE D'UN PIXEL SPOT-HRVIR À PARTIR D'IMAGES DU DRONE PIXY®

Un pixel du capteur HRVIR de SPOT est un carré de 20 x 20 mètres qui comporte 4 valeurs de luminance codées sur 8 bits chacune. Après traitement, ces comptes numériques sont transformés en valeurs de réflectance (détail au *paragraphe 2.3.2*). Dans le cas de la zone d'étude de garrigue près de Montpellier, l'occupation du sol à l'intérieur du pixel de 400 m² est **très hétérogène**. On distingue en proportion variable la strate arbustive (chêne kermès principalement), la strate herbacée (brachypode rameux, thym, graminées diverses) et le sol nu (affleurement de roches calcaires).

L'objectif de notre travail est de préciser la résolution spatiale réelle d'un pixel SPOT-HRVIR à partir des valeurs de réflectance mesurées par le capteur et de l'occupation du sol identifiée sur le terrain.

3.1. DONNÉES

Nous utilisons deux sources de données de référence : les mesures radiométriques de terrain et l'image de référence THRS du drone.

Pendant l'été 2001, tandis que le satellite SPOT acquiert les données de la zone d'étude, nous mesurons au radiomètre CIMEL la réflectance des différents types d'occupation du sol. Ces mesures permettent d'identifier des ordres de grandeurs (*Tableau 51*) :

Tableau 51. Type d'occupation du sol et valeurs de réflectance associées dans le Rouge R et Proche infrarouge PIR

Composants	Réflectance	
	R	PIR
Chêne kermès	< 8%	< 35%
Surface en herbe	de 8 à 17%	< 35%
Sol nu, cailloux	> 17%	> 35%

Dans la suite de l'étude nous restreignons la zone d'investigation à une surface de 7 hectares pour laquelle nous connaissons l'occupation du sol avec précision.

Prenons l'exemple d'une image acquise par SPOT-HRVIR le 27 juillet 2001. Pour le site d'étude, les valeurs de réflectance des pixels varient de 8 à 17% dans le *Rouge* et de 23 à 53% dans le *Proche infrarouge*. Ainsi, d'après le *Tableau 51*, aucun pixel n'est « pur » mais un mélange des trois composants chêne, herbe, cailloux. On parle alors de **pixel mixte**.

3.2. MÉTHODES

Nous comparons pour chaque pixel ses quatre valeurs de réflectance à l'occupation du sol réelle (carte de référence réalisée à l'aide de photographies aériennes prises par le drone Pixy®) (Figure 69).

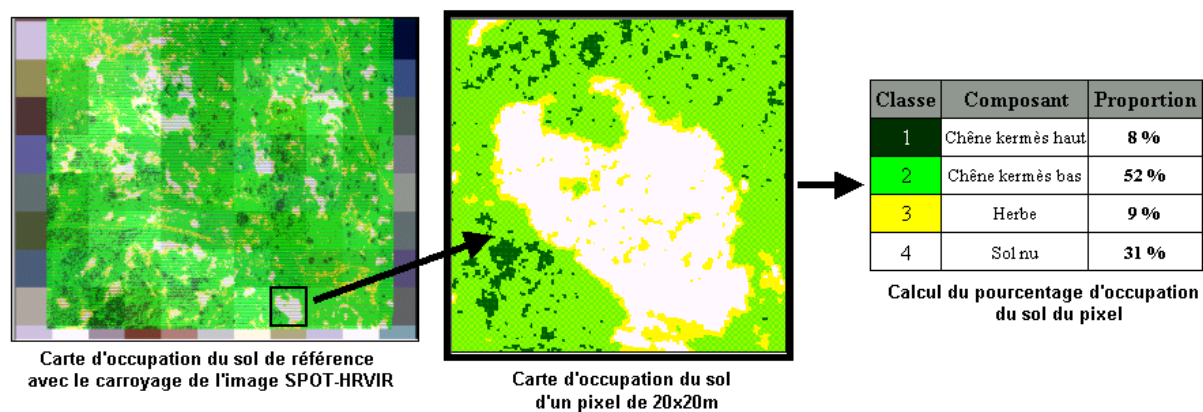


Figure 69. Comparaison pour chaque pixel des réflectances HRVIR et de l'occupation du sol THRS

Certains pixels ont des valeurs de réflectance identiques (à moins de 0,1% près) pour 2 ou 3 bandes alors que l'occupation du sol est différente (Figure 70).

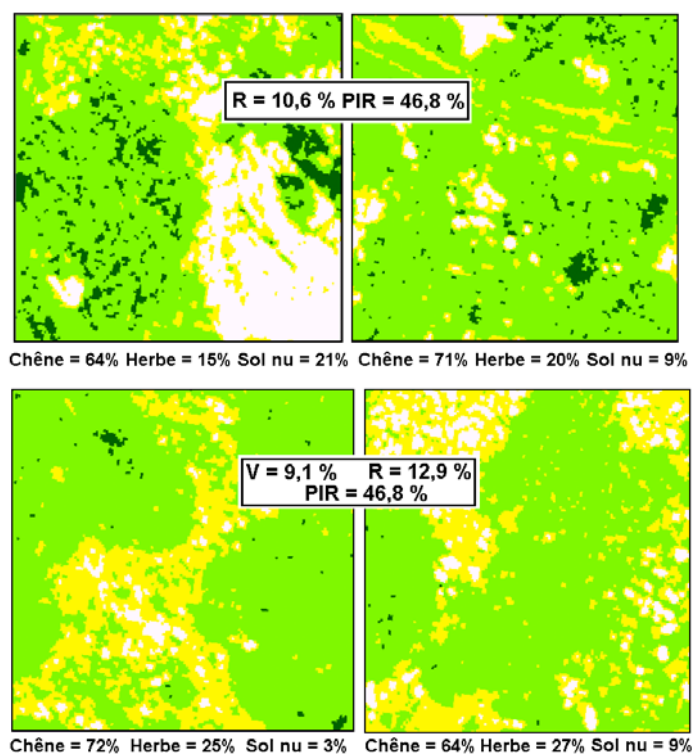


Figure 70. Exemples de pixels à réflectances identiques et occupations du sol différentes

Selon Curran et Williamson (1985 et 1986), les valeurs de réflectance d'un pixel sont fortement influencées par les pixels voisins (Figure 71).

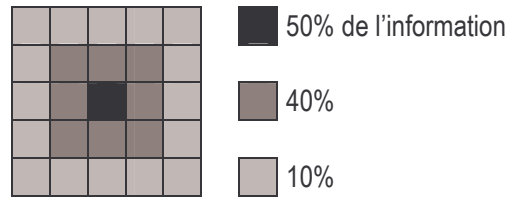


Figure 71. Zones d'influence des pixels voisins

En conséquence, pour les pixels de la zone d'étude ayant les mêmes valeurs de réflectance dans plusieurs bandes, nous calculons la proportion d'occupation du sol à différentes distances :

- pixel central de 400 m² (100% de l'information) ;
- fenêtre de 3 x 3 pixels soit 3.600 m² (50% de l'information au centre et 50% pour les 8 autres pixels) ;
- fenêtre de 5 x 5 pixels soit 1 ha (50% de l'information au centre, 40% pour les 8 pixels voisins et 10% pour les 16 pixels périphériques).

3.3. RÉSULTATS

Prenons l'exemple de deux pixels pour lesquels les valeurs de réflectance dans trois bandes (R, PIR et MIR) sont identiques (Figure 72) :

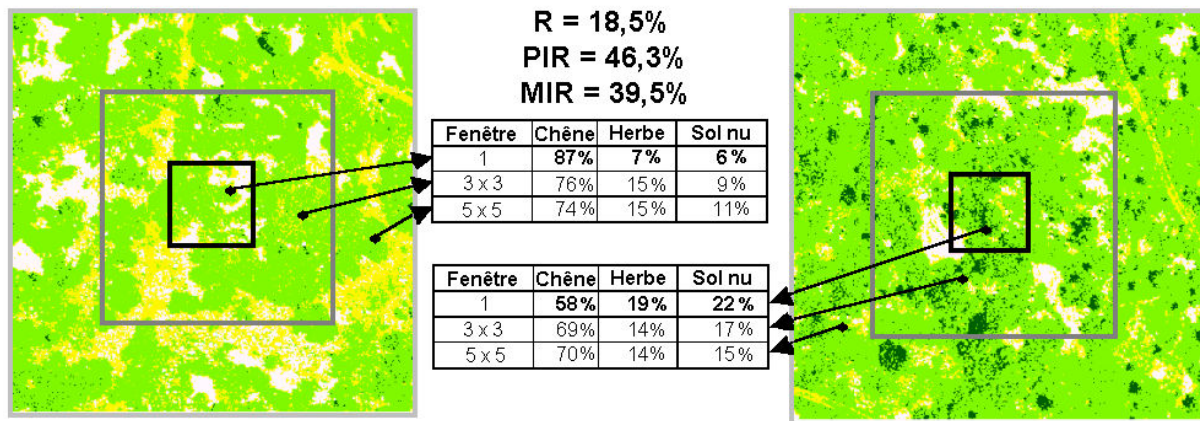


Figure 72. Exemple d'évolution de l'occupation du sol selon l'échelle d'observation (d'après Iglesias, 2003)

Les deux pixels centraux ont une occupation du sol très différente (87 et 58% de chêne), alors que si l'on considère les pixels environnants et leur contribution dégressive, on retrouve des proportions équivalentes (74 et 70% de chêne). Les réflectances similaires dans les trois bandes correspondent donc à une occupation du sol au-delà de la limite du pixel central.

Au total 15% des pixels de l'image (24/165) présentent des réflectances équivalentes dans 2 ou 3 bandes. Pour ces pixels, les proportions d'occupation du sol sont très différentes. Si l'on considère une fenêtre d'un hectare (5 x 5 pixels) avec une contribution dégressive selon la distance, on observe des occupations du sol proches pour les pixels ayant une même signature spectrale.

3.4. DISCUSSION

L'intérêt de disposer d'une carte précise de l'occupation du sol à partir des images du drone Pixy® permet d'étudier la résolution réelle d'un pixel SPOT-HRVIR. Tout pixel carré d'un capteur satellitaire subit des perturbations géométriques et radiométriques à divers niveaux :

- dimension et orientation variables des pixels bruts (de 20 à 27 mètres selon l'orbite et le dépointage du capteur³¹) et rééchantillonnage à 20 mètres des pixels au moyen d'outils statistiques (Marquaille, 1999),
- positionnement des pixels dans un système de projection adéquat (nouveau rééchantillonnage),
- précision géographique du produit final de l'ordre d'un demi pixel (± 10 mètres)³²,
- correction géométrique du relief non toujours prise en compte (corrigé dans notre étude avec le produit Ortho®),
- influence du type de couvert (homogène ou non, réflectance forte ou faible...).

Dans le cas du site d'étude suivi près de Montpellier, on observe une influence de l'occupation du sol environnant à une distance moyenne de deux pixels (40 mètres). Bien que les affleurements rocheux calcaires ne représentent qu'une faible proportion de la zone de garrigue étudiée (8% en moyenne), ils perturbent fortement le signal en **augmentant artificiellement les valeurs de réflectance** des pixels. Cette modification radiométrique est équivalente à l'effet d'un voile nuageux blanc sur les images, à la différence près que les zones caillouteuses sont réparties irrégulièrement sur le terrain.

Ainsi, dans le cas de couverts très homogènes et de grandes tailles (> 10 ha), comme par exemple les grandes parcelles de cultures céréalières, les forêts denses et monospécifiques, on peut penser que les valeurs de réflectance d'un pixel SPOT-HRVIR sont représentatives de la situation physiologique du couvert d'une surface inférieure à 1000 m².

En revanche dans le cas de couverts hétérogènes, comme par exemple un parcellaire agricole très morcelé (< 1 ha), des zones de garrigue peu denses ou des roches apparentes, les valeurs de réflectance d'un pixel SPOT-HRVIR correspondent à l'occupation du sol d'une zone d'environ 1 hectare. Ainsi la présence d'une carrière, d'un habitat, de sols nus clairs, perturbe la réflectance à une distance de quelques pixels.

³¹ SPOT peut effectuer des visées obliques jusqu'à 27°, faisant varier la dimension au sol d'une ligne de pixels de 60 à 80 km.

³² d'après le fournisseur des données

Enfin, une autre source d'incertitude, s'ajoutant aux effets de bord, est la précision géographique des pixels. Pour améliorer cette localisation, on a souvent recours à des protocoles supplémentaires basés sur des cibles géoréférencées positionnées sur le terrain et ensuite repérées sur les images.

Les études de télédétection à haute et très haute résolution (longueur du pixel de 1 à 50 mètres) négligent souvent la résolution réelle des pixels et ne précisent pas toujours les différentes sources de perturbation du signal pour leur site d'étude.

Dans le prochain chapitre, nous changeons de domaine d'observation, en abordant la télédétection à basse résolution et son intérêt pour suivre l'état hydrique de la végétation, de façon quotidienne et pour de grandes surfaces.

CHAPITRE 5

TÉLÉDÉTECTION À BASSE RÉOLUTION DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION

« Tout problème authentique est justiciable d'une technique et toute technique consiste à résoudre des problèmes d'un type déterminé »

Gabriel Marcel, philosophe (1889-1973)

Nous avons vu dans le chapitre précédent comment des images à haute résolution de SPOT-HRVIR pouvaient suivre de manière précise le contenu en eau de la végétation d'une petite zone géographique.

Dans ce nouveau chapitre, nous changeons d'échelle de travail avec des images de la taille d'un pays entier prises à une fréquence quotidienne. Notre principal objectif est de tester plusieurs capteurs satellitaires à basse résolution (capteur AVHRR de NOAA 16, VEGETATION de SPOT 4 et MODIS de TERRA) pour suivre l'état hydrique de la végétation mesuré sur le terrain.

L'originalité du travail réside dans l'utilisation :

- de données de terrain de FMC provenant de protocoles étendus dans l'espace ;
- d'images satellitaires spectralement améliorées pour pouvoir discriminer les bandes d'absorption de l'eau.

Nous traiterons dans cette partie le contexte de l'étude, le matériel et les méthodes employés, puis nous présenterons les résultats pour chaque capteur satellitaire afin d'en discuter les conséquences pour de futures applications.

Il est important de préciser que ce travail reste une démarche prospective de recherche, ayant pour but de percevoir par un capteur satellitaire le processus physiologique de stress hydrique des plantes.

1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

1.1. DES ÉTUDES SPÉCIFIQUES ET DE NOMBREUX INDICES

Les images satellitaires permettent de couvrir la surface de la Terre à de multiples échelles spatiales et temporelles. Jusqu'à aujourd'hui, les études basées sur le suivi de la végétation ont généralement relié de manière empirique la teneur en eau de la végétation et la réflectance d'une ou plusieurs bandes spectrales combinées dans un indice satellitaire. Paltridge et Barber (1988) sont peut-être les premiers à essayer de prédire l'état hydrique des plantes par des données de réflectance. Ils utilisent une version modifiée de l'indice NDVI pour estimer l'état hydrique de prairies australiennes à partir d'images du capteur AVHRR du satellite NOAA. Plus tard, leur travail est amélioré (Paltridge et Mitchell, 1990) pour prendre en compte plus explicitement les effets de l'atmosphère et de la réflectance bidirectionnelle des données de la bande *Rouge*, en considérant la variabilité des angles zénithaux de visée et du soleil. En zone méditerranéenne de garrigue, Peñuelas *et al.* (1993) et Piñol *et al.* (1998) trouvent des corrélations convenables entre l'indice FMC et le rapport des réflectances à 900 et 970 nm d'un radiomètre hyperspectral de terrain. Chuvieco *et al.* (2002) montrent également que de bonnes corrélations peuvent être établies entre l'indice FMC et les données de réflectance dans le cas de couverts végétaux spécifiques. Si le type de végétation n'est pas connu, alors une relation plus globale doit être utilisée donnant des résultats moins précis.

Aussi, par le biais de données de réflectance simulées par modélisation, Dawson *et al.* (1999) rapportent des corrélations entre la FMC et deux indices hyperspectraux de l'eau : le WI de Peñuelas *et al.* (1997) et le NDWI de Gao (1996).

Pour l'ensemble des études, les relations empiriques exposées ne sont jamais testées à grande échelle (plusieurs sites et types de végétation) ; l'estimation de l'état hydrique des plantes à partir de données de réflectance a été **peu généralisée**. De bons résultats peuvent être obtenus pour des écosystèmes spécifiques, comme les prairies, alors que pour la plupart des couverts les relations sont faibles. Même dans le cas d'un travail de terrain minutieux, les relations obtenues entre l'indice FMC et les données de réflectance ne sont jamais entièrement prouvées ou validées. En effet, ces mesures ne représentent souvent qu'une partie de l'amplitude de variation de la teneur en eau de la végétation subissant un stress hydrique (Piñol *et al.*, 1998). Également, quelques indices hyperspectraux de laboratoire, apparemment prometteurs pour le suivi de l'indice FMC, restent encore non vérifiés. Ceci risque d'évoluer avec la venue de nouveaux capteurs des satellites TERRA et ENVISAT.

Enfin, on remarque l'influence mêlée des différences de réflectance du sol, du *Leaf Area Index*, des angles solaires et de vue du capteur. Ces variabilités rendent souvent l'approche empirique adaptée à un seul site. La validité de la relation FMC-réflectance est donc limitée au site pour lequel la relation a été établie ! Nous l'avons notamment vu dans le *chapitre 4* avec des images à haute résolution SPOT sur un site près de Montpellier. La classification des différents types de végétaux sur l'ensemble de la zone méditerranéenne apparaît nécessaire à une bonne estimation de leur teneur en eau. Ceci est lié aux méthodes statistiques qui sont souvent très sensibles au type de végétation.

1.2. INTÉRÊT DE NOAA-AVHRR POUR LE SUIVI DE LA VÉGÉTATION

1.2.1. LE CAPTEUR

Le capteur AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) est présent sur les satellites NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) depuis 1979.

En 2003, on compte trois capteurs AVHRR en activité :

- AVHRR/2 embarqué sur NOAA 14 (lancé en décembre 1994),
- AVHRR/3 embarqué sur NOAA 16 et 17 (lancés en février 2001 et en juin 2002).

Pour la zone française du pourtour méditerranéen, NOAA 14 passe à 5h et 17h, NOAA 17 à 7h et 19h. NOAA 16 est plus intéressant car il acquiert des images à 3h et surtout 15h, correspondant au moment de la journée où l'état hydrique des plantes est minimal.

Tableau 52. Caractéristiques techniques du capteur AVHRR/3 de NOAA16

Orbite	héliosynchrone à 833 km d'altitude – 9 jours passage à 15h sur la France
Dimensions de l'image	2399 km de large (le long de la trace)
Format des données	10 bits
Résolution	1100 x 1100m au nadir à 6240 x 2300m en bord de fauchée pour 5 bandes

AVHRR comporte cinq bandes spectrales : deux bandes dans la partie réfléchie du spectre (*Rouge* et *Proche infrarouge*, Figure 73) et trois bandes dans la partie émise du spectre (*Moyen infrarouge* 3,55-3,93 μm , *Infrarouge thermique* 10,3-11,3 μm et 11,5-12,5 μm).

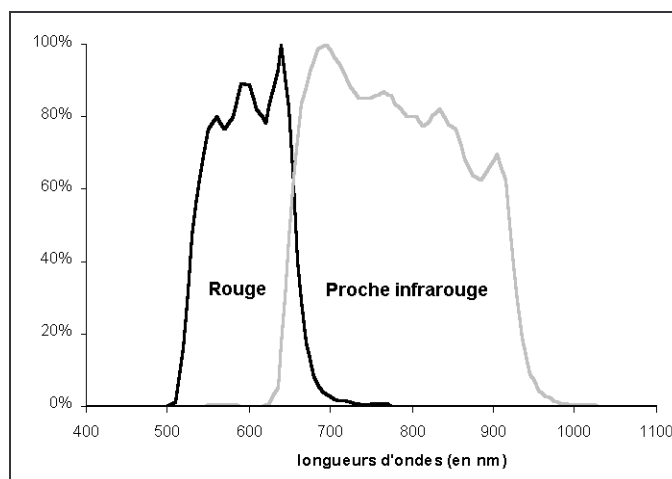


Figure 73. Sensibilité des bandes spectrales R et PIR du capteur AVHRR de NOAA

Dans le cadre de notre étude, nous utilisons les images basées sur la réflectance et la température de la surface de la Terre (Tableau 53).

Tableau 53. Produits AVHRR utilisés

Produit	Intitulé	Bandes	Résolution		Qualité
			spatiale*	temporelle	
R et PIR	Réflectance de surface	2	1000 m	1 jour	géoréférencé (précision < 1 pixel) et étalonné radiométriquement
TS	Température de surface	1	1000 m	1 jour	

* après rééchantillonnage

1.2.2. LES ÉTUDES

Plusieurs études montrent de bonnes relations entre les indices satellitaires de végétation et les variables physiologiques des plantes. Chuvieco et Martin (1994) indiquent que l'humidité de la végétation est un paramètre particulièrement difficile à estimer car il intervient faiblement dans la variation du spectre comparé à d'autres facteurs environnementaux.

Toutefois, la détermination spectrale du stress hydrique de la végétation est possible si des profils temporels sont dérivés. Ainsi, le stress hydrique de la végétation est souvent analysé à partir de séries temporelles de l'indice NDVI (Lopez *et al.* 1991, Prosper-Laget *et al.* 1994, Vidal *et al.* 1994, Illera *et al.* 1996, Gonzalez *et al.* 1997, Aguado *et al.* 1998, Chuvieco *et al.* 2001).

Une approche alternative à celle-ci est de suivre la dynamique thermique du couvert végétal (Bartholic *et al.*, 1972). A partir de données NOAA-AVHRR, Alonso *et al.* (1996) ont créé le **rapport** $\frac{NDVI}{TS}$ pour suivre la variation temporelle de la FMC. Deshayes *et al.* (1998) montrent que le stress hydrique des plantes peut être suivi par ce même rapport (r^2 de 79% en zones de prairies). En Espagne, Casanova *et al.* (1998) calculent des cartes journalières d'aléa d'incendie avec un modèle basé sur les états de dégradation de la végétation et la relation entre le NDVI et la température de surface TS. Malgré tout, ce rapport consiste à estimer le stress hydrique des plantes et non à évaluer un bilan hydrique précis.

1.3. INTÉRÊT DE SPOT-VEGETATION POUR LE SUIVI DE LA VÉGÉTATION

1.3.1. LES CAPTEURS

Il existe deux capteurs VEGETATION, notés souvent VGT1 et VGT2. VGT1 est embarqué sur la plate-forme SPOT 4 lancée en mars 1998 et VGT2 sur SPOT 5 lancée en mai 2002 (Tableau 54).

Tableau 54. Caractéristiques techniques des capteurs VEGETATION

Orbite	héliosynchrone à 860 km d'altitude – 26 jours passage à 10h30 (VGT1), 10h et 11h40 (VGT2) sur la France ³³
Dimensions de l'image	1200 km de large (le long de la trace)
Format des données	8 bits
Résolution	1150m au nadir à 1700m en bord de fauchée pour 4 bandes

³³ Pour VGT2, passage à 10h (couverture de la France moins le grand Ouest) et à 11h40 (France moins l'extrême Sud-Est)

Rapidement plusieurs produits ont été proposés **gratuitement** pour l'observation des terres et des mers.

Les capteurs VGT fournissent des données radiométriques dans **4 bandes** spectrales : *Bleu*, *Rouge*, *Proche infrarouge* et *Moyen infrarouge réflectif*, les trois dernières étant très proches du capteur HRVIR de SPOT à haute résolution (Figure 74).

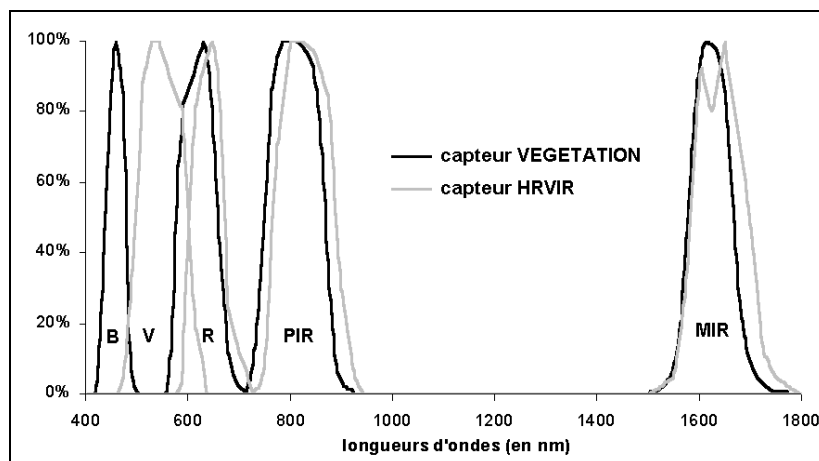


Figure 74. Comparaison des sensibilités des bandes spectrales des capteurs VEGETATION et HRVIR de SPOT

1.3.2. LES PRODUITS

Le centre belge du VITO (*Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek*), en charge de la distribution des images VEGETATION, propose plusieurs produits destinés à la communauté scientifique. Dans le cadre de notre étude, nous utilisons les images basées sur la réflectance de la surface de la Terre (produits P quotidiens et les synthèses D10 à 10 jours) (Tableau 55).

Tableau 55. Produits VEGETATION utilisés

Produit	Intitulé	Bandes	Résolution		Qualité
			spatiale*	temporelle	
P	Réflectance de surface	4	1000 m	1 jour	brut
D10 (ancien S10)	Réflectance de surface	4	1000 m	10 jours	élaboré

* après rééchantillonnage

Depuis le 1^{er} février 2003, le capteur VGT 1 sur SPOT 4 a cessé d'acquérir des images sur l'ensemble des continents, VGT 2 sur SPOT 5 prenant le relais. VGT 1 se focalise alors sur des programmations spéciales et l'observation des océans.

1.3.2.1. **LES IMAGES JOURNALIÈRES : PRODUIT P**

Le produit P (*Physical*) est adapté aux applications scientifiques nécessitant une grande précision des mesures physiques. Les données sont corrigées des erreurs liées au système d'acquisition (erreurs d'enregistrement des bandes spectrales, étalonnage des détecteurs) et rééchantillonnées selon un système de projection géographique choisi par l'utilisateur (pixel d'environ 1 km²).

Le compte numérique de brillance du pixel correspond à la réflectance apparente au sol du pixel, réflectance dite en haut de l'atmosphère TOA (*Top Of Atmosphere*) car ne prenant pas en compte ses perturbations. Chaque utilisateur doit donc corriger les images à partir de données supplémentaires et d'algorithmes adaptés.

1.3.2.2. LES SYNTHÈSES À 10 JOURS : PRODUITS S10 ET D10

Les produits élaborés proposés regroupent des données acquises pendant 10 jours consécutifs sur une grande partie du globe (latitudes de 56° Sud à 75° Nord). Pour chaque pixel, on ne conserve que la « meilleure » valeur de réflectance.

Les synthèses à 10 jours ont été dans un premier temps produites par un algorithme basé sur le maximum de l'indice NDVI (**produit S10**). Depuis 2002, les synthèses (**produit D10**) ont été améliorées par de nouveaux algorithmes (Duchemin *et al.*, 2000), basés sur un modèle de correction de l'effet bidirectionnel produisant une réflectance normalisée au nadir (*Figure 75*).

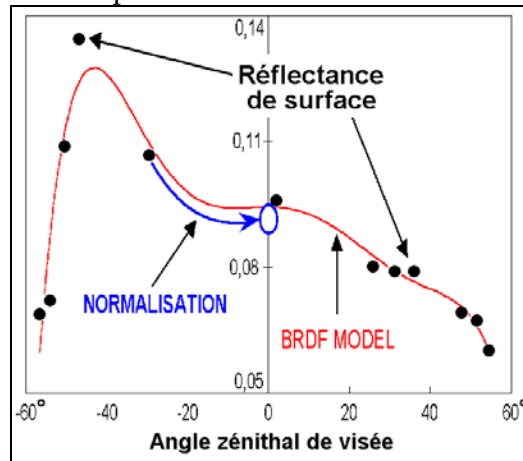


Figure 75. Principe de normalisation au nadir des données

L'amélioration entre les synthèses S10 et D10 est importante, notamment pour la détection des nuages, bien meilleure dans le nouveau produit (*Figure 76*).

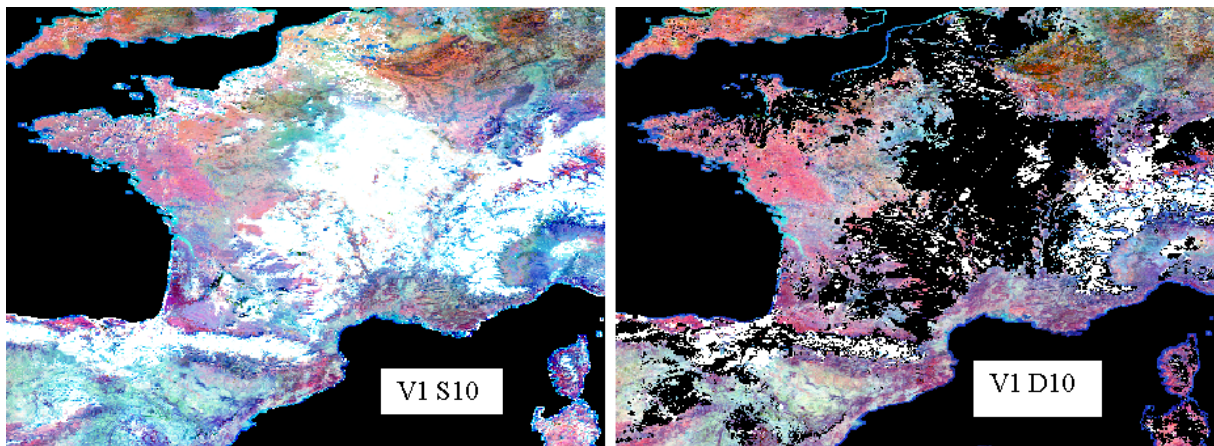


Figure 76. Comparaison des produits S10 et D10 pour la 1^{ère} décennie de décembre 2002

En général, les synthèses D10 améliorent les performances d'un facteur 2, excepté pour la bande *Bleu* pour laquelle l'amélioration est faible (nuages non détectés, résidus de corrections atmosphériques, réflectances plus faibles que les autres bandes).

1.3.3. LES ÉTUDES

Avec les données SPOT-VEGETATION, Ceccato *et al.* (2002b) ont développé un indice satellitaire, le GVMi (*Global Vegetation Moisture Index*) pour estimer l'état hydrique de la végétation par modélisation du transfert radiatif. Cet indice fut validé en zone de savanes au Sénégal et est lié à l'EWT du couvert. Selon Ceccato, l'indice d'état hydrique EWT du couvert (EWT de l'échantillon combiné au LAI) n'est pas perturbé par la teneur en matière sèche des feuilles contrairement à l'indice FMC et les corrélations avec les données satellitaires sont meilleures. De plus, l'EWT représente mieux spatialement l'état hydrique du couvert et semble donc plus adapté aux capteurs à basse résolution.

1.4. INTÉRÊT DU NOUVEAU CAPTEUR MODIS POUR LE SUIVI DE LA VÉGÉTATION

1.4.1. LE CAPTEUR

Il existe deux capteurs MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), embarqués sur les satellites héliosynchrones TERRA et AQUA, lancés respectivement en décembre 1999 et juin 2001 (*Tableau 56*).

Tableau 56. Caractéristiques techniques du capteur MODIS

Orbite	héliosynchrone à 705 km d'altitude – 16 jours passage à 12h30 (TERRA) et 15h30 locale (AQUA) sur la France
Dimensions de l'image	2330 km de large (le long de la trace) et 10 km en balayage (perpendiculaire à la trace)
Format des données	12 bits
Résolution spatiale	250m au nadir pour les bandes 1 (R) et 2 (PIR) 500m au nadir pour les bandes 3 à 7 1000m au nadir pour les bandes 8 à 36*

*résolution rééchantillonnée ; résolution réelle de 1150 x 1150m au nadir à 4600 x 6900m en bord de fauchée !

Les premières images du capteur MODIS ont été disponibles en février 2000 pour TERRA et juin 2002 pour AQUA. Rapidement les équipes de chercheurs de la NASA (*National Aeronautic and Space Administration*) ont proposé **gratuitement** plusieurs produits couvrant les disciplines d'observation des continents, des océans et de l'atmosphère.

MODIS fournit des données radiométriques pour **36 bandes** allant du *Bleu* (400 nm) à l'*Infrarouge thermique* (14,4 µm), offrant ainsi une large gamme d'images relevant d'objectifs scientifiques variés (Tableau 57).

Tableau 57. Exemples d'usage des images MODIS

Domaines d'application	Bandes	Résolution*
Transformation et type d'occupation du sol	1, 2, 3, 4, 5	250 à 500 m
Teneur en chlorophylle	8, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 18, 19	1000 m
Propriétés de l'atmosphère (température, humidité, quantité et type de nuages, aérosols, ozone...)	2, 6, 7, 13, 22, 23, 27, 28, 30 24, 25, 26, 33, 34, 35, 36	1000 m
Température de surface (mer, sol)	20, 29, 31, 32	1000 m
Détection des feux de forêt et volcans	21	1000 m

* après rééchantillonnage

Dans le cadre de notre étude, nous utilisons les images basées sur la réflectance de la surface de la Terre (produits n°9A, 9A1 et 43) et la température de surface (produit n°11) (Tableau 58).

Tableau 58. Produits MODIS utilisés

Produit	Intitulé	Bandes	Résolution		Version
			spatiale*	temporelle	
MOD09A	Réflectance de surface	7	500 m	1 jour	2
MOD09A1	Réflectance de surface	7	1000 m	8 jours	3
MOD43	Réflectance bidirectionnelle ajustée au nadir	7	1000 m	16 jours	4
MOD11A1	Température et émissivité de surface	2	1000 m	1 jour	3

* après rééchantillonnage

La version signifie le degré de correction atmosphérique qu'ont subi les images, en comparaison à la version 1 des données brutes.

1.4.2. LES PRODUITS

1.4.2.1. *PRODUIT MOD09A, RÉFLECTANCES JOURNALIÈRES*

Les produits MODIS « *surface reflectance daily L2G* » consistent en une estimation quotidienne de la réflectance spectrale (de 0,2 à 100%), laquelle aurait été mesurée sur le terrain en l'absence d'absorption et de dispersion atmosphérique.

Le fournisseur américain des données a accompli une série de corrections atmosphériques tenant compte des actions des gaz atmosphériques (vapeur d'eau et ozone) et des aérosols (Vermote et Vermeulen, 1999). Ces corrections utilisent comme variables d'entrée les produits atmosphériques dérivés de certaines bandes du capteur MODIS (MOD04 pour les aérosols, MOD05 pour la vapeur d'eau, MOD07 pour l'ozone et MOD35 pour le masque des nuages), ainsi que des bases de données auxiliaires et des données météorologiques mondiales (Figure 77).

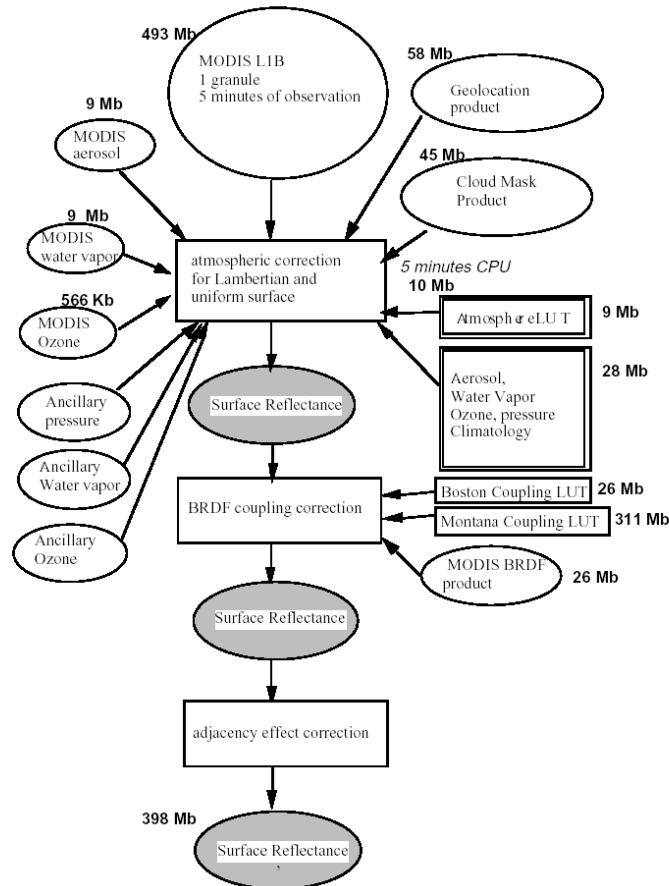


Figure 77. Schéma de la chaîne de corrections atmosphériques des images MODIS

Ces produits journaliers de réflectance de surface nous permettent de faire un suivi quotidien de la teneur en eau des plantes.

1.4.2.2. PRODUIT MOD09A1, SYNTHÈSE SUR 8 JOURS

Les produits MODIS « Réflectance_de_la_surface_Niveau_3 » consistent en des synthèses de 8 jours de la réflectance de la surface de la Terre, niveau 3.

Les produits disponibles sont accompagnés d'indicateurs de qualité, comme la présence de nuages, d'ombres et de l'angle zénithal solaire pour chaque pixel.

1.4.2.3. PRODUIT MOD43, BRDF/ALBÉDO, SYNTHÈSE SUR 16 JOURS

Les produits de réflectance de la surface au nadir (NBAR) « *nadir BRDF-adjusted reflectance 16-day L3* » sont obtenus pour chaque période de 16 jours (durée à l'issue de laquelle le satellite repasse exactement sur la même orbite que le premier jour). Les produits s'obtiennent en inversant le modèle de la BRDF avec des observations de réflectance de surface corrigées des effets de l'atmosphère et en l'absence de nuages (Figure 78).

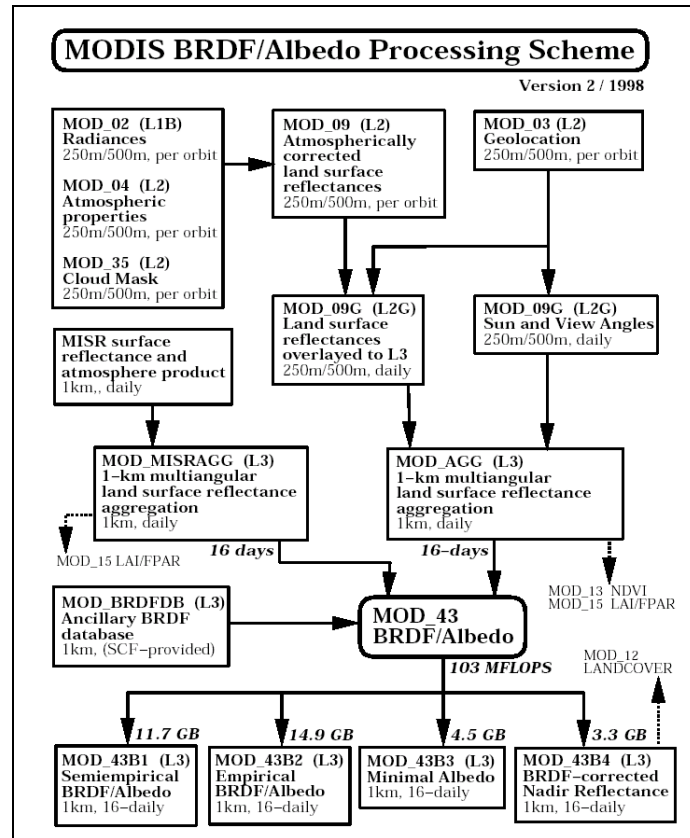


Figure 78. Schéma de la chaîne de traitement des corrections de la BRDF

Parfois, pendant la période d'acquisition de 16 jours, un même pixel peut être plusieurs jours nuageux. Lorsque moins de 7 jours sont disponibles ou lorsque le nombre d'observations de qualité est très faible, la NASA utilise une base de données des paramètres archétypes de la BRDF, pour compléter les données disponibles puis faire une inversion des magnitudes. Cette base de données est associée aux occupations du sol, à la saison et aux paramètres de la BRDF s'y rapportant.

C'est donc le **produit de réflectance de surface le plus fiable**. Par contre sa résolution temporelle (1 image par période de 16 jours) ne permet pas de suivre l'évolution de l'état hydrique avec la précision souhaitée (cf. variabilité temporelle de l'état hydrique inférieure à 8 jours).

Les observations sont acquises par MODIS et éventuellement par MIRS, de la plate-forme TERRA. Il est prévu, dans un futur proche (fin 2004), d'utiliser aussi des données MODIS de la plate-forme AQUA.

1.4.2.4. PRODUIT MOD11, TEMPÉRATURE DE SURFACE QUOTIDIENNE

Les produits MODIS «*land surface temperature/emissivity daily L3*» consistent en une estimation quotidienne de la température et de l'émissivité de surface, à partir des canaux du capteur dans l'infrarouge thermique. La précision de la température est de 1°C en absolu pour un maximum de saturation du capteur à 427°C.

Compte tenu de la nouveauté des produits MODIS, nous présentons dans les paragraphes suivants quelques applications.

1.4.3. LES ÉTUDES

Récemment deux nouveaux capteurs à basse résolution et couverture quotidienne du globe ont été mis en service. Il s'agit de MODIS embarqué sur les satellites américains TERRA et AQUA et de MERIS embarqué sur le satellite européen ENVISAT. Ce dernier lancé mi-2002 propose ses premières images depuis peu, c'est pourquoi aucun résultat scientifique n'a encore été présenté avec les produits de réflectance MERIS. En revanche une cinquantaine de références pour les produits de réflectance MODIS existe dans les revues spécialisées. Nous les présentons en *annexe 11* car elles apportent des éléments indirectement liés à notre étude, mais toutefois intéressants et notamment en terme de qualité des produits.

2. TENEUR EN EAU DE RÉFÉRENCE

Nous avons précisé dans le *chapitre 2* de la thèse les différents protocoles pour mesurer la teneur en eau des feuilles de la végétation méditerranéenne. Nous utilisons l'indice FMC basé sur la moyenne de plusieurs prélèvements de feuilles de l'année d'une même espèce.

Les prélèvements de terrain sont réalisés une à deux fois par semaine pendant les étés 2001, 2002 et 2003, à travers une trentaine de sites distribués sur la zone méditerranéenne française (environ 80.000 km²) pour laquelle les feux de forêt représentent des dégâts majeurs (0,5% des zones sensibles au feu sont brûlées chaque année). Deux protocoles d'échantillonnage se distinguent à travers le réseau opérationnel de l'ONF et deux sites à vocation de recherche dans l'Hérault et le Var.

2.1. RÉSEAU OPÉRATIONNEL DE L'OFFICE NATIONAL DES FORÊTS

Une des premières sources de données de référence réside dans le réseau opérationnel de suivi géré par l'Office National des Forêts. On compte 30 sites différents répartis dans les 15 départements du sud-est de la France, distants de 20 à 80 km les uns des autres (*Figure 79*).

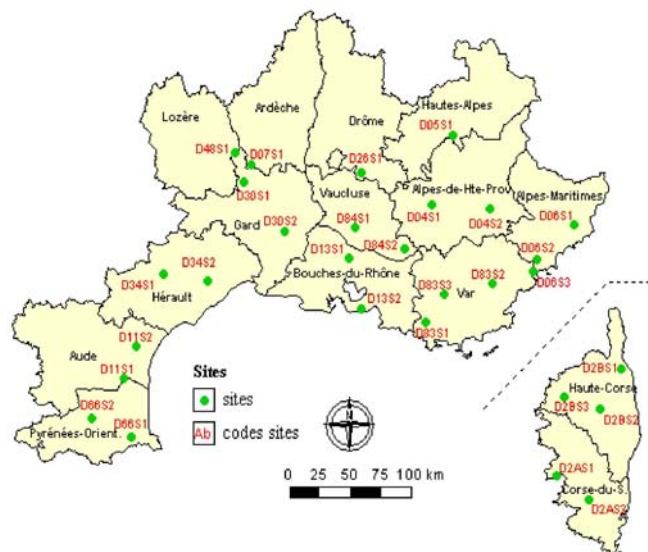


Figure 79. Localisation des sites du réseau ONF

Chaque prélèvement représente la moyenne de l'indice FMC d'une zone de moins d'un demi-hectare. En chaque station de mesure, deux espèces sont suivies et un total de 20 espèces différentes est représenté par le réseau.

2.2. DEUX SITES À VOCATION DE RECHERCHE

Dans le cadre d'un projet commun de recherche du Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) « incendie de forêt », l'INRA d'Avignon et le CEMAGREF de Montpellier ont mis en place deux sites d'étude pour suivre à différentes échelles spatiales et temporelles l'évolution de l'état hydrique de quelques espèces :

- le Causse d'Aumelas près de Montpellier suivi par le CEMAGREF ;
- le sommet du bœuf du massif des Maures suivi par l'INRA.

Les prélèvements ont été réalisés en plusieurs sites à des échelles décamétriques et hectométriques (de 10 à 500 mètres selon les sites et les années) (cf. *chapitre 2*).

Pour faciliter l'usage des images de télédétection, ces sites ont été choisis sur des zones connues *a priori* ayant un relief aussi plat que possible, pour éviter trop d'effets d'illumination, avec une couverture végétale monospécifique uniforme, d'une hauteur inférieure à 4 mètres pour faciliter les prélèvements. L'échantillonnage aux échelles hectométriques permet de calculer un indice FMC moyen adéquat à la taille d'un pixel satellitaire (de 500 à 1000 m).

2.3. QUALITÉ DES DONNÉES

La notion de qualité des mesures de FMC est tout à fait subjective et difficile à quantifier. Le meilleur moyen est souvent le calcul de l'écart-type des valeurs de FMC pour plusieurs prélèvements. Pour l'ensemble des sites considérés (ONF, INRA et CEMAGREF), chaque FMC d'un site correspond à la moyenne de 3 à 9 échantillons, eux-mêmes pouvant représenter des prélèvements de feuilles sur plus de 10 arbustes différents.

Une première étape de traitement des données est d'enlever les valeurs de FMC aberrantes provoquant un écart-type élevé. Ce premier tri a été réalisé pour l'ensemble des données.

Une autre source d'erreur ou d'imprécision provient directement du laboratoire qui pèse, étuve et repèse chaque échantillon. 21 laboratoires différents et proches des sites d'étude, au sein d'EPIC, d'EPST, de grandes écoles ou de régions ONF, ont été mis à contribution pour couvrir les besoins. Même si chaque étape de l'analyse suit un protocole précis, il réside des différences entre les matériels utilisés (étuve ventilée ou non, réglage des balances). De la même manière, le prélèvement sur le terrain dépend de la rigueur des opérateurs. De 2001 à 2003, on recense 30 à 35 opérateurs différents pour l'ONF, 4 pour l'INRA et 6 pour le CEMAGREF. Les différences ne sont pas négligeables et d'après Yvon Duché, directeur régional PACA à l'ONF et responsable du réseau, « un bon nombre de mesures n'est pas représentatif de la réalité » ! La principale cause vient de la motivation des équipes de terrain qui effectuent le prélèvement pendant l'été et les heures les plus chaudes de la journée. Il est primordial d'expliquer l'intérêt des prélèvements et de montrer les projets qui en découlent. Le retour d'expérience est selon moi encore trop restreint.

Au cours de l'été 2001, dans le département de l'Hérault deux sites de prélèvements (ONF et CEMAGREF), distants de 7 km seulement, suivent l'évolution de l'indice FMC du chêne kermès. En cours de saison, nous avons doublé le protocole sur le site de l'ONF afin d'évaluer l'influence de la méthode d'échantillonnage sur la mesure :

- 5 échantillons mélangés représentant une dizaine de prélèvements dans une zone de 20 mètres de rayon (protocole ONF-INRA) ;
- 8 échantillons sur des pieds identifiés dans une zone de 20 mètres de rayon (nouveau protocole CEMAGREF).

Les résultats devraient être identiques et pourtant les mesures du premier protocole varient beaucoup sans raison apparente en fin de saison (Figure 80).

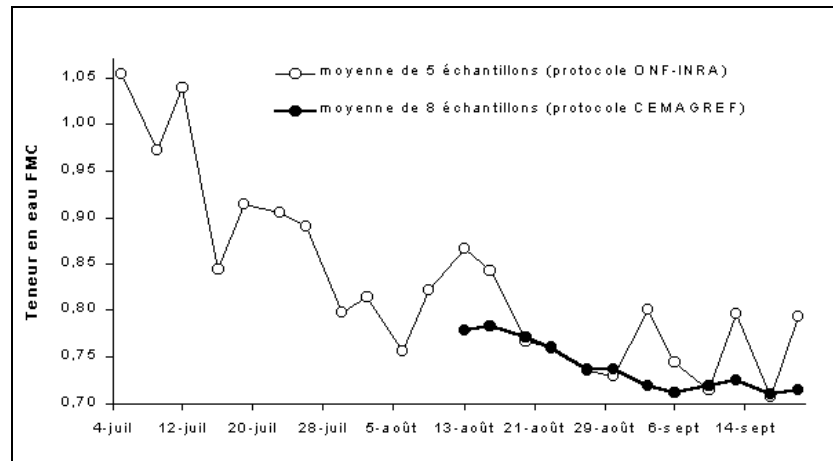


Figure 80. Évolution de la teneur en eau (FMC) du chêne kermès sur le site de Cournonterral (34) pendant l'été 2001 pour deux méthodes d'échantillonnage

La courbe obtenue avec le second protocole est assez proche des mesures effectuées sur un autre site à 7 km et semble donc plus représentative de la réalité.

Ce petit exemple, non généralisable, montre comment il est difficile d'apprécier la qualité d'une mesure. Au final, le prélèvement dépend toujours de l'interprétation de l'Homme face au végétal à prélever. Les consignes de prélèvement aussi bien définies soient-elles ne peuvent empêcher les erreurs mais seulement les minimiser.

La principale différence entre les sites de prélèvement réside dans **l'échelle des protocoles**. Chaque site du réseau ONF est ponctuel et représente un état hydrique à une échelle décamétrique. Pour les sites suivis par l'INRA et le CEMAGREF la même espèce est prélevée à deux niveaux : à une échelle décamétrique en plusieurs sites, distants de 70 à 600 mètres, permettant de calculer un indice FMC à une échelle hectométrique ou kilométrique.

Dans la suite des traitements statistiques, nous distinguerons toujours deux groupes de données de référence de FMC :

- Un **groupe « global »** représentant les valeurs mesurées pour tous les sites ;
- Un **groupe « recherche »** représentant les seuls sites suivis par les deux organismes de recherche de l'INRA et du CEMAGREF, pour lesquels l'état hydrique mesuré représente la moyenne de plusieurs sites.

2.4. PRÉ-TRAITEMENT DES DONNÉES DE RÉFÉRENCE

Les valeurs de FMC absentes (pour les jours non échantillonnés) sont interpolées linéairement. Aucune estimation n'est faite si le délai entre deux missions excède cinq jours ou si le jour est pluvieux. Pour la plupart des sites suivis par l'ONF et l'INRA, deux espèces sont prélevées et l'information sur la proportion de couverture de chaque espèce n'est pas connue. Des tests préliminaires montrent une meilleure corrélation des données satellitaires à la moyenne des FMC des deux espèces plutôt que d'une seule espèce. Cette moyenne des deux indices FMC semble mieux représenter l'état hydrique du couvert végétal en place et donc du pixel satellitaire. L'utilisation de données à basse résolution ne permet pas d'analyse spécifique (par espèce) pour la plupart des situations. Un pixel englobe en général un mélange de plusieurs espèces (Ceccato *et al.*, 2001).

Certains produits satellitaires utilisés sont des synthèses de plusieurs jours (8 jours et 16 pour MODIS, 10 jours pour VEGETATION). Dans un but d'homogénéité, on calculera la moyenne des FMC sur ces mêmes périodes. Dans la mesure où pour la plupart des sites la variabilité temporelle de la FMC n'excède pas la semaine, il est clair que le calcul d'un état hydrique moyen sur 10 ou 16 jours enlève une partie de la variabilité réelle observée.

3. DONNÉES ET MÉTHODES

3.1. INDICES SATELLITAIRES

Tous les indices satellitaires sont issus de références bibliographiques « sérieuses » (revues de rang A) et sont considérés pour certains comme généralistes, pour d'autres comme spécifiques d'un type de couvert végétal. Le fait que les indices testés sont issus de revues de rang A n'est évidemment pas une assurance de bons résultats. De nombreux indices ont été validés (parfois pas) partiellement, sur des couverts particuliers, avec des instruments particuliers, et n'ont pas fait l'objet d'études sur plusieurs années. Aucune restriction particulière n'a été appliquée à l'emploi des indices dans notre étude afin d'en tester un maximum (liste en *annexe 3*).

L'indice satellitaire est toujours un rapport entre les valeurs de réflectance (ou température) d'une ou plusieurs bandes d'un capteur. On peut distinguer trois grandes catégories :

- Les **indices simples** sont les plus anciens et se remarquent par une relative polyvalence de conditions de détection. Ils consistent en des rapports faisant intervenir :
 - les bandes *Rouge* (liées au pic d'absorption de la chlorophylle) et *Proche infrarouge* comme les indices NDVI, DVI, RVI, IPVI, RGRE ;
 - les bandes *Vert* (pic de réflectance des végétaux dans le visible) et *Proche infrarouge* comme l'indice GNDVI ;
 - Une nouvelle génération d'indices simples remplace la bande *Rouge* par le *Moyen infrarouge* MIR, très avantageux pour estimer la teneur en eau des végétaux, comme les indices PIR/MIR, NDII, SLAVI...
- Les **indices corrigés** essayent de rectifier les incohérences du signal engendrées par le sol, les aérosols et l'atmosphère. Plus récents, ils sont mieux adaptés aux situations de couvert végétal éparés ou aux conditions atmosphériques perturbées (nuages, poussières...). La correction est souvent basée sur la différence entre les bandes *Bleu* et *Rouge*, comme les indices SAVI, ARVI, SARVI, SARVI2, MSAVI2, MSARVI, GEMI. On distingue également des indices corrigés « *Vert* » (GARI, GRARI) et des indices basés sur le rapport PIR/MIR : indices LCWI et GVMI.
- Les indices faisant intervenir la **température de surface** TS. Ils correspondent au rapport des indices simples ou corrigés par TS : indices NDVI/TS, NDII/TS...

Il nous semble important d'**identifier les indices ayant un même comportement** grâce à une Analyse en Composantes Principales (ACP) prospective. Une AFC est donc réalisée entre les bandes du capteur MODIS (7 bandes d'une résolution de 500 mètres), les indices satellitaires dérivés et les valeurs de FMC de 2001 et 2002 (Coing, 2002).

Les deux premiers axes factoriels de l'ACP expliquent 76% des variables, avec une hypertrophie de l'axe 1 (59% de contribution). Le positionnement des valeurs propres des variables sur les deux axes montre que l'indice FMC est inversement relié à la réflectance dans les bandes du *Moyen infrarouge* et du *Visible* de MODIS. La répartition des variables par une analyse en nuées dynamiques permet de différencier 6 classes, indicatives de la typologie des indices satellitaires (Tableau 59).

Tableau 59. Analyse en nuées dynamiques entre les bandes spectrales de MODIS, les indices satellitaires associés et l'indice FMC

Classe	Inertie intraclasse	Effectifs	Indices	Remarques
1	0,24	6	DVI, GEMI, MSAVI2, SARVI, SARVI2, SAVI	indices corrigés des paramètres de sol
2	0,12	6	FMC, LCWI*, RGRE	FMC et indices proches du centre de gravité du nuage de points de l'ACP
3	0,07	12	NDII*, SLAVI*, PIR/MIR*	indices utilisant des rapports des bandes proche et moyen infrarouge
4	0,08	2	PIR, MIR1	2 bandes proches
5	0,24	12	ARVI, GARI, GNDVI, GRARI, GVMI*, IPVI, MSARVI, NDVI, RVI	classe hétérogène : indices corrigés, indices simples, GVMI
6	0,13	5	Bleu, Vert, Rouge, MIR2, MIR3	5 bandes MODIS

* indices déclinés pour chaque bande MIR de MODIS et pour une bande MIR moyenne

Puisque plusieurs indices sont équivalents, dans la suite des traitements, on limitera parfois le nombre de variables pour les calculs.

3.2. BASE DE DONNÉES

Afin de simplifier le travail d'analyse statistique sur les différentes variables des séries, toutes les valeurs sont compilées dans une base de données ACCESS®. La puissance de gestion et l'ergonomie de ce type d'outil informatique permet une manipulation des données plus aisée et la réalisation rapide de différentes requêtes spécifiques. Celles-ci sont ensuite exportées vers EXCEL® et l'extension macro XLSTAT-Pro® pour réaliser les calculs.

On distingue 2 groupes et plusieurs tables reliées entre elles :

- les **données de FMC de terrain** caractérisées pour :
 - o 37 sites définis par 26 critères (coordonnées géographiques, pente, réserve utile du sol, distance à la mer...) ;
 - o 20 espèces définies par 12 critères (nom commun, famille, genre, feuillage, inflammabilité...) ;
 - o trois années (2001, 2002 et 2003) ;
- les **données satellitaires** caractérisées pour :
 - o 3 capteurs satellitaires (AVHRR, MODIS, VEGETATION) ;
 - o 3 à 7 canaux initiaux (réflectances et température de surface) ;
 - o trois années (2001, 2002 et 2003).

A partir des données de FMC, on peut calculer de **nouveaux paramètres qualitatifs** :

- des classes de teneur en eau (10 classes toutes espèces confondues) ;

- des classes de niveau hydrique (5 ou 10 classes par espèce selon son amplitude observée sur les trois années) ;
- pour chaque espèce et site, la date à laquelle l'indice FMC est maximal et minimal.

A partir des données satellitaires, on peut calculer de **nouveaux paramètres quantitatifs** :

- 20 indices dérivés des canaux initiaux (NDVI, NDII, SARVI, GVMI...) ;
- d'autres indices qui dépendent des premiers (faisant intervenir le NDVI maximal ou minimal, la valeur d'un indice quand l'indice FMC est maximal ou minimal...).

Ainsi, à une date, une espèce et un site, on aura un état hydrique moyen (FMC, classe de stress hydrique) et plusieurs données satellitaires (réflectances, température, indices d'un ou plusieurs capteurs).

3.3. PRÉ-TRAITEMENT DES IMAGES SATELLITAIRES

3.3.1. COORDONNÉES SPATIALES ET PROJECTION

Le dénominateur commun à toutes les données est leurs **coordonnées spatiales** (géographiques). La mesure de terrain de l'état hydrique de la végétation (FMC de référence) est déterminée pour une surface délimitée, relevée au GPS (précision de 1 à 100 mètres selon les sites). De même, les données satellitaires (réflectance, température, indices) sont caractérisées par un découpage géométrique (pixel) et des coordonnées (précision de 100 à 500 mètres selon le capteur à basse résolution).

Dans le cadre de notre travail, le référentiel utilisé est le système français de **projection Lambert II étendue** (LIIe), utilisant l'ellipsoïde Clarke 1880 IGN et le système géodésique de la Nouvelle Triangulation Française (NTF). Cette projection est précise et présente l'avantage de s'exprimer en unité de distance (mètres) et non en unité angulaire (degrés) comme les systèmes UTM ou WGS 84. De plus, nous disposons au début de l'étude de nombreuses données au format vecteur et raster en projection LIIe.

3.3.2. AUTRES PRÉTRAITEMENTS

Chaque image satellitaire nécessite quelques pré-traitements, notamment pour lire les informations relatives aux pixels des sites de prélèvement. On a ainsi des images MODIS au format HDF-EOS (*Hierarchical Data Format - Earth Observing System*), des images VEGETATION et NOAA au format GEOTIFF. L'ensemble des scènes est importé au format du logiciel Erdas Imagine® et la projection est transformée en Lambert II étendue (Figure 81).

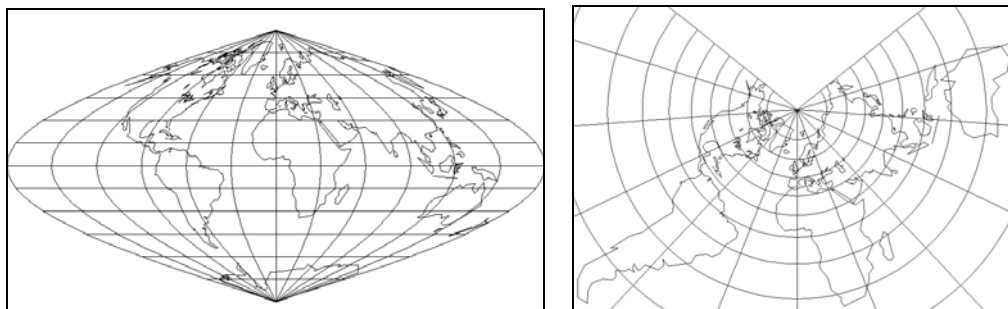


Figure 81. Projections *Integerized Sinusoidal* ISIN et Lambert II étendue (d'après Ollivier, 2002)

Les paramètres de projection sont divers (Tableau 60).

Tableau 60. Paramètres de projection des données satellitaires initiales

Paramètres de projection	Images AVHRR	Images VEGETATION	Images MODIS	Projection commune souhaitée
Nom	UTM 31	Lambert Européen	ISIN (<i>Integerized Sinusoidal</i>)	Lambert II étendue
Type	cylindrique	conique conforme	sinusoïdale équidistante	conique conforme
Ellipsoïde associé	International Hayford 1909	International Hayford 1909		Clarke 1880 IGN
Système géodésique	Europe 1950	Europe 1950		Nouvelle Triangulation Française

La méthode mathématique choisie de rééchantillonnage est la **convolution cubique**. Celle-ci a été choisie pour des raisons topologiques. La conception de ce modèle garantit en effet une redistribution moins aléatoire des valeurs de pixels dans la nouvelle grille et une **précision spatiale nettement supérieure** à ce que peut proposer la méthode bilinéaire ou la méthode du plus proche voisin (Robin 1998, USGS 2002). La méthode de convolution cubique utilise le poids des 16 nœuds les plus proches d'un point à reprojeter, pour établir sa position et caler sa valeur pixellaire dans la nouvelle grille de projection (Figure 82). Le poids de chaque élément contributif est d'autant plus important qu'il est proche du point à reprojeter.

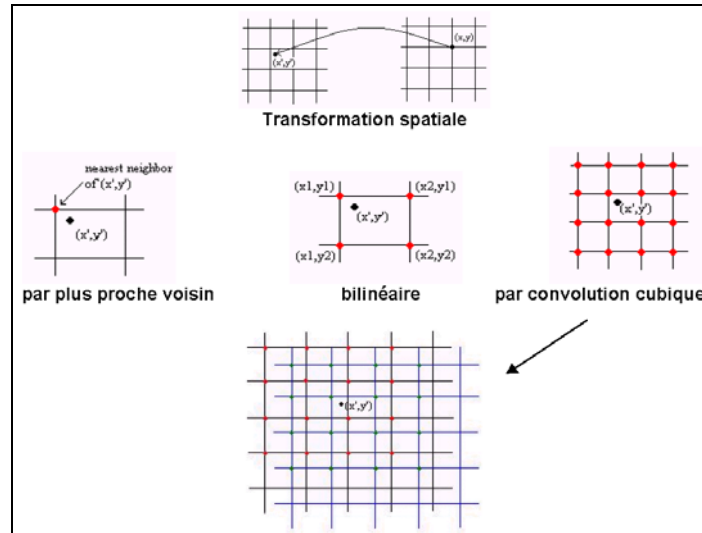


Figure 82. Rééchantillonnage par la méthode du plus proche voisin, la méthode bilinéaire et la convolution cubique (d'après USGS, 2002)

Le lissage des valeurs des pixels est certes plus important en utilisant cette méthode, mais la perte de dynamique reste négligeable (r^2 de 99,5% entre les pixels rééchantillonnés par la méthode du plus proche voisin et ceux rééchantillonnés par la convolution cubique).

3.3.3. PRÉ-TRAITEMENT NOAA

Nous utilisons les données du capteur AVHRR embarqué sur le satellite NOAA 16. Les images proviennent de la station HRPT (*High Resolution Picture Transmission*) basée à l'Université d'Alcala de Henares en Espagne. Chaque image est reprojétée dans le système français LIIe et un algorithme ôte les nuages par la méthode *Split-and-Merge Clustering* (Simpson et Gobat, 1996). De ces images traitées on extrait pour chaque pixel et à chaque date plusieurs paramètres :

- valeurs des 5 bandes du capteur AVHRR ;
- température de surface TS ;
- paramètres de visée (angle zénithal et azimutal solaire, angle de visée du pixel par rapport au nadir).

Le calcul des indices satellitaires est réalisé pour tous les indices faisant intervenir les bandes *Rouge*, *Proche infrarouge* et la *Température de surface*. On calcule également des indices moyens sur une période de 9 jours en gardant uniquement les jours sans nuages : NDVI, TS, NDVI/TS.

3.3.4. PRÉ-TRAITEMENT VEGETATION

Les produits D10 utilisés ont subi une correction des perturbations atmosphériques par le modèle global SMAC (*Simplified Method for Atmospheric Correction*) (Rahman et Dedieu 1994, Berthelot et Dedieu 1997). SMAC est une méthode simplifiée pour corriger les mesures satellitaires de leurs perturbations atmosphériques dans le domaine du spectre solaire.

3.3.5. PRÉ-TRAITEMENT MODIS

Les traitements ont été réalisés à partir des images journalières du satellite américain TERRA et de son capteur MODIS d'une résolution spatiale de 500 mètres (Figure 83).



Figure 83. Exemple d'une image TERRA-MODIS sur le sud-est de la France (image du 24 août 2001 et localisation des 2 sites d'étude)

3.3.5.1. **DONNÉES DE RÉFLECTANCE 1 ET 8 JOURS**

Les produits MODIS de réflectance (1 jour ou moyenne sur 8 jours, MOD09) et de température de surface (MOD11) ont une qualité transitoire (niveau 3), c'est-à-dire partiellement validée. Ces données sont mises à la disposition d'équipes de recherche développant des études exploratoires. Les étapes de validation des images sont en cours. Ces données nécessitent quelques pré-traitements, notamment pour enlever les erreurs grossières (valeurs de réflectances supérieures à 1, valeurs négatives). Malgré ce filtre grossier, de nombreuses données aux fortes valeurs de réflectance ($> 70\%$) subsistent, mettant en évidence des effets de BRDF et des perturbations atmosphériques résiduelles.

Un autre pré-traitement consiste à prendre en compte l'influence trop importante du sol pour certains sites. Comme mentionné précédemment, nous disposons de peu d'informations sur la proportion *sol nu / couvert végétal* pour la plupart des sites prélevés.

Des expériences de terrain complémentaires, menées sur quelques sites près de Montpellier à l'aide d'un radiomètre de terrain, montrent l'intérêt d'utiliser un indice simple basé sur les bandes *Proche infrarouge* et *Rouge* : rapport PIR/R aussi appelé *Ratio Vegetation Index* RVI (Pearson et Miller, 1972). Les données avec un rapport PIR/R inférieur à 4 comportent une proportion très importante de sol nu (>70%). Ainsi près de 45% des données initiales sont éliminées par ce filtre.

3.3.5.2. DONNÉES DE TEMPÉRATURE DE SURFACE 1 JOUR

Concernant les données de température de surface, aucune correction n'est nécessaire. Les jours aux températures inférieures à 15°C (anormal pour les sites et périodes étudiées) sont ôtés automatiquement avec le filtre $PIR/R < 4$.

3.3.5.3. DONNÉES DE RÉFLECTANCE 16 JOURS

Les synthèses de réflectance à 16 jours utilisées sont proposées en qualité de niveau 4 et stade 1, c'est-à-dire que la précision des images a été évaluée par la NASA par un petit nombre de mesures de terrain indépendantes, obtenues en quelques sites sélectionnés et pour certaines périodes de l'année. Ces produits validés sont adaptés aux publications scientifiques et sont de loin les meilleures données proposées par la NASA, utilisables sans correction supplémentaire en théorie.

Après ces quelques traitements, les 8 bandes initiales (7 réflectances et TS) ainsi que l'ensemble des indices satellitaires, combinant 2 à 4 bandes, sont testés.

Après l'emploi du filtre $RVI < 4$ pour enlever les effets du sol sur les produits MOD09 et MOD11, nous disposons finalement de 55% des données initiales journalières.

4. RÉSULTATS

Avant de comparer pour chaque capteur les données de télédétection aux mesures de terrain, nous souhaitons décrire l'ensemble des sites et espèces étudiés pour identifier certains paramètres régissant l'état hydrique de la végétation. Cette approche se base sur des analyses multivariées.

4.1. ANALYSE MULTIVARIÉE DES SITES ET DES ESPÈCES SUIVIES

Un premier travail consiste à considérer l'ensemble des données de terrain pour identifier les facteurs influençant l'état hydrique des plantes. Par analyses multivariées successives, nous souhaitons déterminer le poids des différentes variables explicatives sur la variable expliquée FMC. On dispose ainsi de 26 variables décrivant chacun des 37 sites (**variables abiotiques**) et de 12 variables décrivant chacune les 20 espèces (**variables biotiques**).

4.1.1. MÉTHODES STATISTIQUES

4.1.1.1. **ANALYSE DES COMPOSANTES MULTIPLES**

Tout d'abord, de façon globale, nous testons une Analyse des Composantes Multiples (ACM) de toutes les variables qualitatives. Aucune tendance satisfaisante n'apparaît car seulement 11% des termes sont expliqués par les deux premiers axes factoriels.

En conséquence, nous préférons tester des analyses thématiques par Analyse Factorielle des Correspondances (AFC).

4.1.1.2. **ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES**

L'AFC se base uniquement sur des variables qualitatives. Seules quatre variables quantitatives sont transformées en classes :

- l'exposition des sites en 4 classes (degrés transformés en orientation selon les 4 points cardinaux),
- les valeurs de pente en 4 classes (0 à 10°, 10 à 20°, 20 à 30° et au-delà de 30°),
- l'altitude en 5 classes,
- les mesures de FMC en 5 classes.

Le choix de la méthode de discrétisation est basé sur la **distribution de la série des données** (Lahousse et Piédanna, 1998). Ainsi, les mesures de FMC présentent une distribution symétrique autour de la moyenne (coefficient d'asymétrie de 0,02). On choisit donc une méthode de découpage qui tient compte de la moyenne arithmétique et de l'écart-type de la distribution.

En revanche, pour les données d'altitude, la distribution des valeurs n'est pas régulière et beaucoup de sites ont une faible altitude (coefficient d'asymétrie de 1,05). On préfère donc une méthode de découpage selon une progression arithmétique.

Deux tests sont réalisés :

- AFC entre les variables abiotiques du milieu et la teneur en eau FMC,
- AFC entre les variables biotiques et la teneur en eau FMC.

4.1.1.3. ANALYSE EN NUÉES DYNAMIQUES

Pour chaque analyse AFC, nous souhaitons identifier les variables (abiotiques et biotiques) liées aux mesures de teneur en eau. Notre choix s'est porté sur l'analyse en nuées dynamiques, basée sur les coordonnées des variables dans l'espace des deux premiers axes factoriels de chaque test. L'algorithme des nuées dynamiques, analogue à l'algorithme des *k-means*, consiste à améliorer de façon itérative une partition initiale en minimisant l'inertie intra-classe. A chaque itération, l'algorithme calcule les barycentres des classes de la partition courante, puis affecte chaque individu au barycentre le plus proche afin de former une nouvelle partition dont l'inertie intra-classe est plus faible que la précédente (Diday 1971, Lebart *et al.* 1997). Dans notre cas, nous séparons l'ensemble des données des variables en 5 groupes. Nous espérons ainsi distinguer les 5 niveaux de FMC et identifier les variables correspondantes.

4.1.2. RÉSULTATS DES ANALYSES MULTIVARIÉES

Les analyses multivariées sur les données 2001 et 2002 ont fait l'objet d'un rapport complet (Coing, 2002). Nous ne rappelons ici que les principaux résultats.

4.1.2.1. LES VARIABLES ABIOTIQUES ET LA TENEUR EN EAU FMC

Les variables descriptives des sites de prélèvements sont comparées aux teneurs en eau mesurées. Lors d'une première AFC globale, 5 variables parmi les 26 se distinguent (exposition, altitude, excentricité à la scène, position topographique, proximité du littoral). Une seconde AFC est ensuite réalisée sur les 5 variables abiotiques retenues plus l'indice FMC. Les deux axes factoriels obtenus expliquent 92% des variables, avec une hypertrophie de l'axe 1 (66% de contribution). Ce dernier semble séparer les sites selon leur altitude et leur distance à la mer Méditerranée. Nous scindons les données en 5 groupes par analyse en nuées dynamiques. Chaque niveau de FMC se situe dans un groupe distinct, associé à plusieurs variables abiotiques (Coing, 2002).

Les résultats nous indiquent que l'organisation de l'état hydrique de la végétation est, sur le plan physique, essentiellement conditionnée par des **facteurs bioclimatiques**, comme nous l'avons précisé au *paragraphe 1.4.2 du chapitre 2*. En effet, les sites composés des végétaux les plus secs sont localisés à l'étage thermoméditerranéen alors que les sites aux fortes valeurs de FMC se placent plutôt aux étages méso et oroméditerranéens.

Une nouvelle AFC réalisée entre les sites et les niveaux de FMC propose graphiquement une typologie des sites par rapport à leur état hydrique. Les deux axes factoriels obtenus expliquent 81% des variables, avec une hypertrophie de l'axe 1 (51% de contribution) (Figure 84).

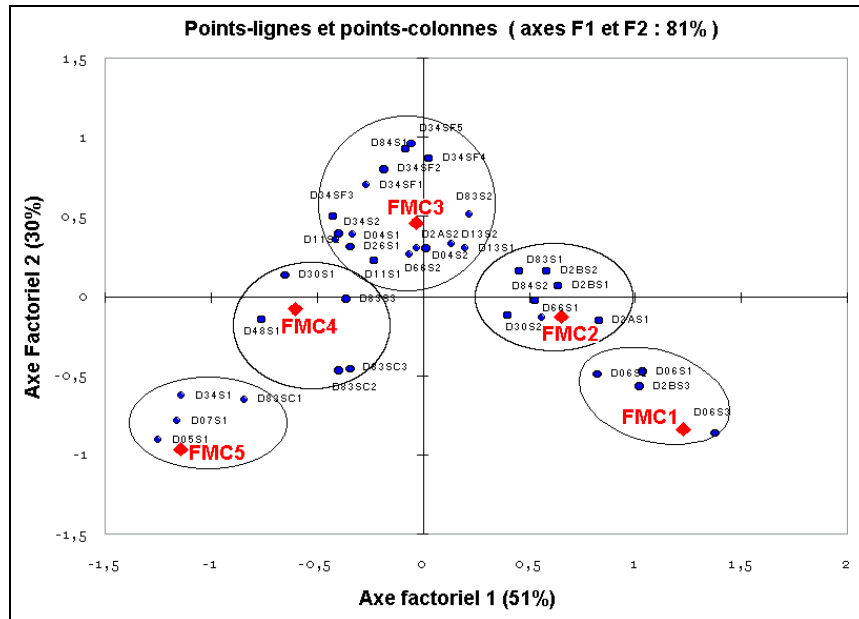


Figure 84. AFC des sites et indice FMC en cinq groupes

L'indice FMC organise ainsi les sites en 5 groupes avec une plus grande inertie pour les sites dont l'état hydrique est moyen (groupe 3 de l'indice FMC).

4.1.2.2. LES VARIABLES BIOTIQUES ET LA TENEUR EN EAU FMC

Les variables descriptives de la végétation prélevée sont comparées aux teneurs en eau mesurées. Parmi les 13 variables disponibles (12 biotiques et FMC), aucune ne se distingue par AFC. Les deux axes factoriels créés expliquent 87% des variables (51% pour l'axe 1 et 36% pour l'axe 2). Cette quasi-équivalence entre les valeurs propres des deux axes gêne l'interprétation des facteurs structurants (Marage, 2001).

Dans notre étude, il semble que l'espèce soit le facteur structurant, dépendant de sa capacité à stocker l'eau. Contrairement au paragraphe précédent, la partition des variables en 5 groupes sépare mal les niveaux de FMC (FMC 1, 2 et 4 dans le même groupe). Il n'est donc pas possible d'identifier les variables biotiques fortement influencées par l'indice FMC.

En conséquence, les liens entre les variables abiotiques et l'état hydrique des plantes sont minces. On visualise la répartition de l'indice FMC selon l'espèce (Figure 85) :

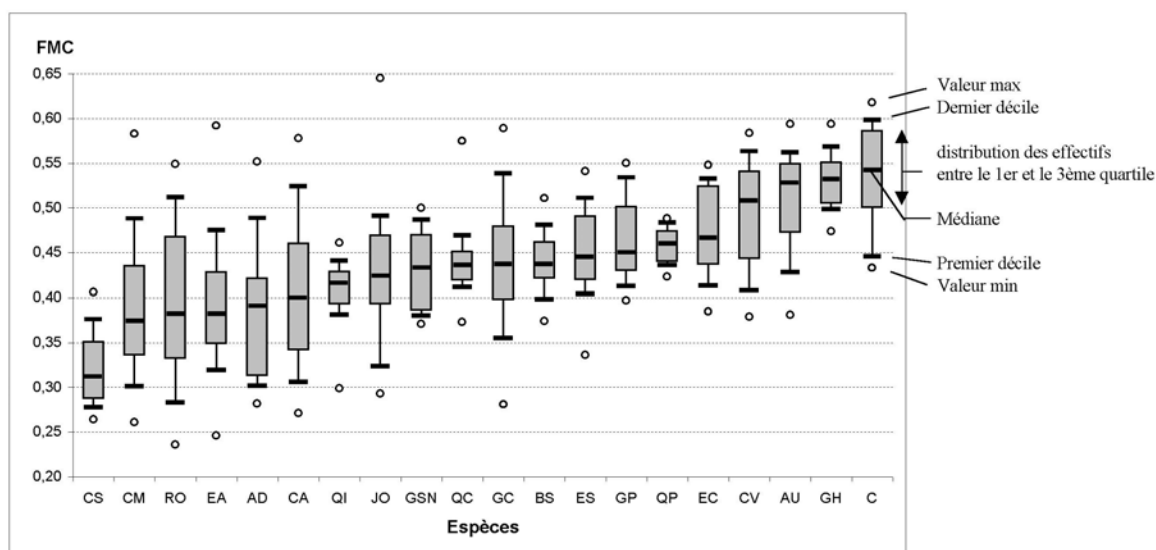


Figure 85. Répartition de l'indice FMC selon l'espèce

Abordons désormais les résultats pour chaque capteur satellitaire. Les mesures de FMC sur le terrain sont mises en relation avec les données de réflectance journalière ou par période, les données de température de surface et les multiples indices satellitaires dérivés.

4.2. NOAA-AVHRR POUR SUIVRE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION

4.2.1. DONNÉES INITIALES UTILISÉES

Nous disposons des images journalières de l'ensemble du sud-est de la France de début juillet à début octobre 2003. Nous les comparons aux teneurs en eau hebdomadaires mesurées sur les deux sites de recherche du Causse d'Aumelas et du massif des Maures (Tableau 61).

Tableau 61. Données utilisées

Site	Espèce	Jours de mesure de FMC	Images satellitaires sans nuage correspondant aux jours de mesures
Causse d'Aumelas	Chêne kermès QC	12	8
	Chêne vert QI	13	8
Massif des Maures	Arbousier et bruyère arborescente	14	11
Total	4 espèces	39	27

Sur le Causse d'Aumelas, on distingue deux sites monospécifiques, correspondant à deux pixels AVHRR différents. La Figure 86 représente l'évolution temporelle de la teneur en eau des parcelles d'étude près de Montpellier pour les deux espèces suivies en 2003.

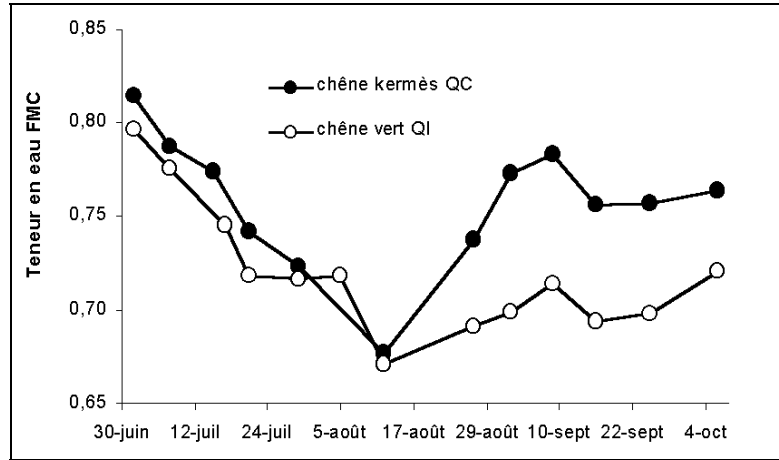


Figure 86. Évolution de la teneur en eau sur les deux sites de Montpellier en 2003

En ce qui concerne le massif des Maures, nous suivons la teneur en eau FMC de 6 lieux différents pour l'arbousier et de 2 lieux différents pour la bruyère arborescente sur environ 10 hectares, inclus dans un pixel satellitaire. Les valeurs de ce pixel sont comparées à la teneur en eau moyenne de la végétation, calculée par l'Équation 29, en considérant la même proportion d'arbousier et de bruyère sur le site.

Équation 29.
$$FMC_{Maures} = \frac{\sum_{i=1}^6 \frac{FMCa_i}{6} + \sum_{j=1}^2 \frac{FMCb_j}{2}}{2},$$

avec $FMCa$ la teneur en eau de l'arbousier en un site,
 $FMCb$ la teneur en eau de la bruyère arborescente en un site.

La Figure 87 montre l'évolution temporelle de la teneur en eau dans le massif des Maures pour les deux espèces suivies en 2003.

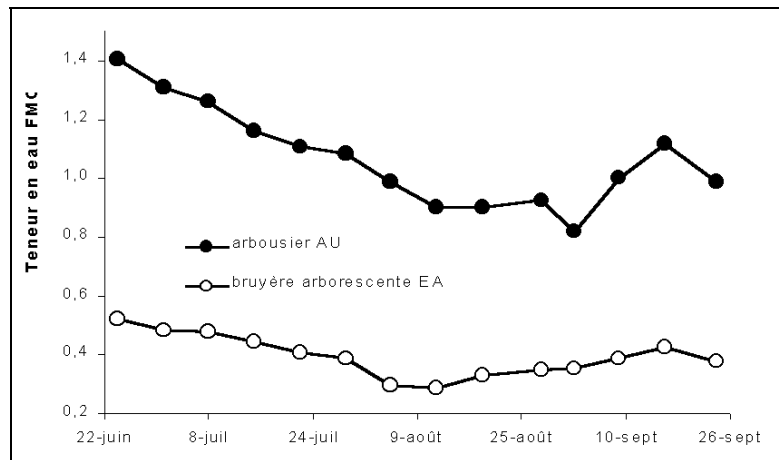


Figure 87. Évolution de la teneur en eau de l'arbousier (moyenne de 6 lieux) et de la bruyère arborescente (moyenne de 2 lieux) pour le site du massif des Maures en 2003

4.2.2. RELATIONS ENTRE LA TENEUR EN EAU FMC ET LES DONNÉES SATELLITAIRES JOURNALIÈRES

Le *Tableau 62* représente le coefficient de détermination r^2 entre les données de FMC et les meilleurs indices satellitaires.

Tableau 62. Relation entre les mesures de FMC et les indices quotidiens dérivés de NOAA-AVHRR

Nom du pixel	Site	Espèce	Effectif	Meilleur indice	r^2
A	Causse d'Aumelas	QC	8	canal 5	0,26
B	Causse d'Aumelas	QI	8	SAVI	0,90
C	Massif des Maures	AU et EA	11	RVI	0,17
A + B + C	Ensemble	Les 4 espèces	27	SM	0,13

De part les **faibles effectifs** présents, il est difficile de montrer une relation évidente. Pour le pixel C de maquis, on ne distingue aucune relation explicite. Il en est de même si l'on considère l'ensemble des pixels. En revanche, pour le pixel B de la zone de garrigue, les relations sont correctes (r^2 de 90%) pour huit valeurs.

La *Figure 88* suivante représente un exemple d'évolution conjointe de l'état hydrique du chêne vert et de l'indice SAVI.

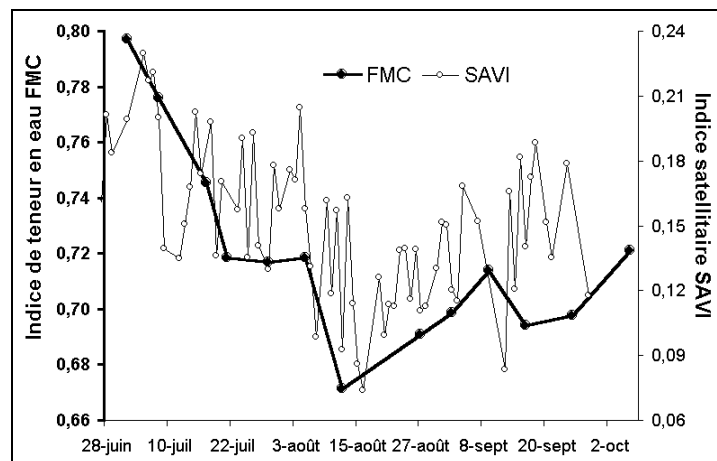


Figure 88. Évolution de la teneur en eau du chêne vert sur le Causse d'Aumelas pendant l'été 2003 et de l'indice satellitaire SAVI dérivé du capteur AVHRR

On observe de fortes oscillations journalières de l'indice. En effet, l'angle de visée d'un pixel, par rapport au nadir, varie de manière importante selon la date de prise de vue ($\pm 55,4^\circ$), avec une période de retour de 9 jours, fonction de l'orbite de NOAA (Figure 89).

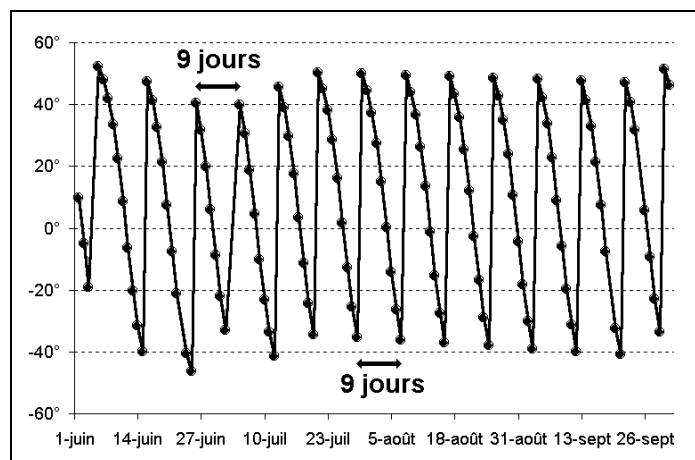


Figure 89. Variation de l'angle de visée d'un pixel NOAA-AVHRR par rapport au nadir. Exemple du site de chêne vert du Causse d'Aumelas pendant l'été 2003

Pour éliminer ces variations périodiques, nous utilisons les données moyennes équivalentes à une période de 9 jours (synthèse 9 jours).

4.2.3. RELATIONS ENTRE LA TENEUR EN EAU FMC ET LES IMAGES SATELLITAIRES DE SYNTHÈSE À 9 JOURS

Comme précisé au chapitre 2, la variabilité temporelle de l'état hydrique des plantes est pour la plupart des espèces méditerranéenne **inférieure à 8 jours**. De ce fait, bien que l'utilisation de synthèse à 9 jours améliore grandement le signal satellitaire, une partie de la variabilité de l'état hydrique de terrain est ôtée.

Nous comparons donc chaque mesure de FMC à la moyenne des observations satellitaires du jour de prélèvement et des 8 jours antérieurs (Tableau 63).

Tableau 63. Relation entre les mesures de FMC et les indices dérivés de NOAA-AVHRR de synthèse à 9 jours

Nom du pixel	Site	Espèce	Effectif	Meilleur indice	r^2
A	Causse d'Aumelas	QC	12	NDVI / TS	0,23
B	Causse d'Aumelas	QI	13	SAVI	0,53
C	Massif des Maures	AU et EA	14	GEMI et DVI	0,48
A + B + C	Ensemble	Les 4 espèces	39	SM	0,13

Les effectifs sont un peu plus importants. En effet, ces nouveaux tests portent sur l'ensemble des mesures de terrain (n=39) puisque les images satellitaires manquantes sont remplacées par une valeur moyenne des 9 jours précédents. Dans l'ensemble les corrélations sont faibles.

Si l'on reprend l'exemple de l'indice SAVI du site de chêne vert, les oscillations sont nettement réduites (Figure 90) comparées à celles de la Figure 88 précédente.

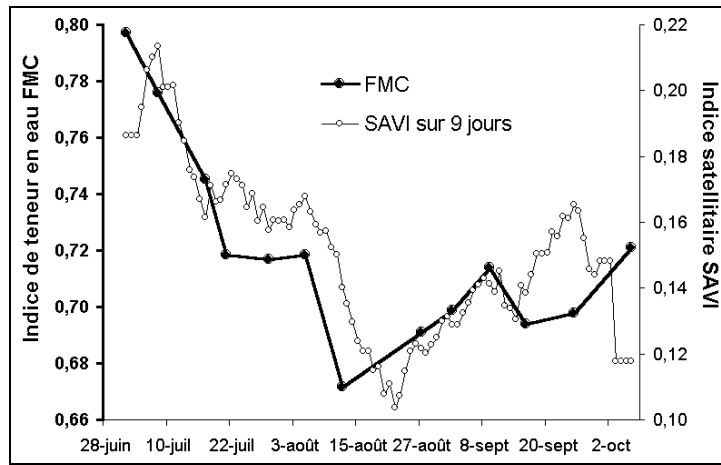


Figure 90. Évolution de la teneur en eau du chêne vert sur le Causse d'Aumelas pendant l'été 2003 et de l'indice satellitaire SAVI moyen sur 9 jours, dérivé du capteur AVHRR

Nous pouvons nous affranchir des divers indices satellitaires et développer un modèle de prédiction de l'indice FMC pour les sites étudiés.

4.2.4. PRÉVISION DE LA TENEUR EN EAU FMC PAR RÉGRESSIONS MULTIPLES

On réalise des régressions multiples pas à pas (*Stepwise regression*) pour chaque espèce et chaque site, afin de déterminer la meilleure combinaison linéaire des bandes du capteur AVHRR pour estimer l'indice FMC.

Chuvieco (2003) propose un modèle prenant en compte le jour et les indices quotidiens NDVI et TS :

$$\text{Équation 30.} \quad FMC = \beta_0 + \beta_1 \text{Jour} + \beta_2 \text{NDVI} + \beta_3 \text{TS} ,$$

avec β_0 , β_1 , β_2 et β_3 les paramètres du modèle.

Le Tableau 64 indique les valeurs des coefficients calculés pour chaque site et espèce.

Tableau 64. Régression multiple selon le modèle de Chuvieco

Nom du pixel	Site	Espèce	β_0	β_1	β_2	β_3	Effectif	r^2	p-value
A	Causse d'Aumelas	QC	2,051	-0,002	-1,563	-0,010	8	0,94	0,72%
B	Causse d'Aumelas	QI	0,892	-0,001	0,201	-0,001	8	0,93	0,95%
C	Massif des Maures	AU et EA	2,301	-0,005	-0,141	-0,011	11	0,97	< 0,01%
A + B + C	Ensemble	Les 4 espèces	1,585	-0,003	-0,198	-0,005	27	0,56	0,03%

Malgré de faibles effectifs, pour chacun des trois pixels suivis, les relations sont fortes (r^2 entre 93 et 97%, p-value < 1%). Pour le regroupement des pixels, la corrélation est moins bonne avec un r^2 de 56%.

Nous testons un nouveau modèle (Équation 31) en remplaçant les variables TS et NDVI de l'Équation 30 par la moyenne à 9 jours des températures de surface TS et des indices NDVI :

$$\text{Équation 31.} \quad FMC = \beta_0 + \beta_1 \text{Jour} + \beta_2 \text{NDVI}_{9 \text{ jours}} + \beta_3 \text{TS}_{9 \text{ jours}},$$

avec β_0 , β_1 , β_2 et β_3 les paramètres du modèle.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 65.

Tableau 65. Régression multiple selon le nouveau modèle (TS et NDVI à 9 jours)

Nom du pixel	Site	Espèce	β_0	β_1	β_2	β_3	Effectif	r^2	p-value
A	Causse d'Aumelas	QC	1,120	-0,001	0,284	-0,006	12	0,59	5,51%
B	Causse d'Aumelas	QI	1,256	-0,001	-0,069	-0,005	13	0,90	< 0,01%
C	Massif des Maures	AU et EA	2,157	-0,004	0,160	-0,021	14	0,90	< 0,01%
A + B + C	Ensemble	Les 4 espèces	1,819	-0,003	-0,420	-0,010	39	0,53	< 0,01%

Même si les effectifs augmentent, les corrélations obtenues sont toutes moins bonnes. Le lissage de l'information sur 9 jours n'améliore donc pas le modèle de Chuvieco.

Nous proposons enfin un dernier modèle (Équation 32) en considérant la simple combinaison linéaire des bandes du capteur (R, PIR et TS) et du jour :

$$\text{Équation 32.} \quad FMC = \beta_0 + \beta_1 \text{Jour} + \beta_2 R_{9 \text{ jours}} + \beta_3 \text{PIR}_{9 \text{ jours}} + \beta_4 \text{TS}_{9 \text{ jours}}$$

avec β_0 , β_1 , β_2 , β_3 et β_4 les paramètres du modèle.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 66.

Tableau 66. Régression multiple selon le nouveau modèle (R, PIR et TS à 9 jours)

Nom du pixel	Site	Espèce	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	Effectif	r^2	p-value
A	Causse d'Aumelas	QC	1,087	-0,001	-0,417	0,900	-0,007	12	0,66	7,49%
B	Causse d'Aumelas	QI	1,281	-0,002	0,432	-0,356	-0,005	13	0,90	0,04%
C	Massif des Maures	AU et EA	2,743	-0,004	-0,010	-0,018	-0,022	14	0,90	0,01%
A + B + C	Ensemble	Les 4 espèces	1,571	-0,002	-0,045	0,015	-0,010	39	0,67	< 0,01%

En comparaison des deux autres modèles, les corrélations obtenues entre les données AVHRR et les mesures de FMC pour le site de chêne vert (pixel B) et le site des Maures (pixel C) sont équivalentes au modèle proposé par Chuvieco. Ce dernier est en revanche meilleur pour le site de chêne kermès (pixel A). Si l'on considère le regroupement des pixels, on obtient une corrélation également meilleure (r^2 de 67%).

En reprenant l'exemple du site de chêne vert du Causse d'Aumelas, on peut comparer l'état hydrique mesuré et l'état hydrique prédit par le modèle précédent (modèle global réalisé à partir de 39 données et portant sur la combinaison linéaire de 4 variables) (Figure 91).

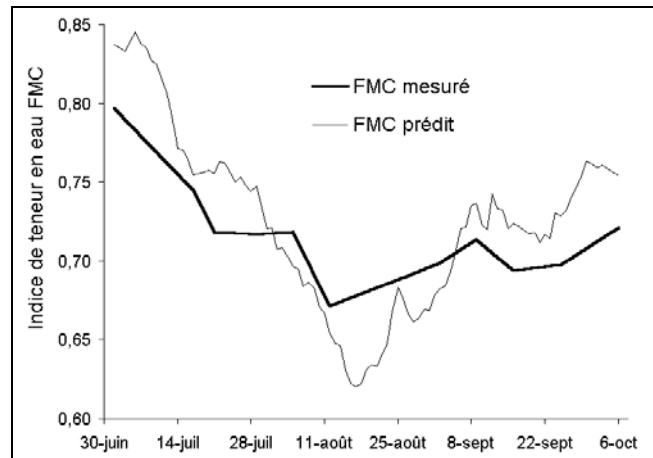


Figure 91. Évolution de la teneur en eau du chêne vert QI sur le Causse d'Aumelas pendant l'été 2003, avec l'indice FMC mesuré (*trait épais*) et l'indice FMC prédit par le modèle global (*trait fin*) dérivé du capteur AVHRR

On pourrait aussi créer d'autres modèles en considérant les paramètres des images comme les angles (soleil et prise de vue). Toutefois, ces paramètres suivent une variation périodique rendant la même oscillation aux prédictions, raison pour laquelle l'utilisation de modèles est plus robuste que celle de relations statistiques.

4.2.5. CONCLUSION

Nous avons suivi trois pixels du capteur satellitaire AVHRR pendant l'été 2003 : un pixel de chêne kermès, un pixel de chêne vert et un pixel de mélange d'arbousier et de bruyère. Pour chaque pixel, nous mesurons sur le terrain (entre 1 et 6 lieux dans un pixel) la teneur en eau moyenne de la végétation, ceci pour plusieurs dates (entre 12 et 14 jours différents).

Concernant les données satellitaires journalières disponibles, nous observons une grande variabilité d'un jour à l'autre des valeurs des bandes du capteur et par conséquent des indices satellitaires (néocanaux) dérivés. La corrélation linéaire entre l'indice FMC et les données (27 images sur 39 campagnes de terrain) est d'ailleurs quasi-inexistante. On distingue alors une période de variation de 9 jours de l'angle de visée du pixel. En conséquence, l'ensemble des données de télédétection est moyenné sur cette période (synthèse de 9 jours). Même si graphiquement la variabilité des indices est fortement réduite, les corrélations restent faibles et difficilement interprétables (faible effectif).

Différents modèles spécifiques sont ensuite testés, basés sur la combinaison linéaire de plusieurs bandes et indices pour estimer la teneur en eau des différentes espèces.

Le modèle proposé par Chuvieco (2003), basé sur le jour, la température de surface TS et l'indice NDVI, affiche de bonnes corrélations pour chaque pixel suivi. Si l'on applique ce modèle à des synthèses de 9 jours, les résultats sont médiocres.

Par régression multiple pas à pas, on propose alors pour l'ensemble des mesures de terrain, un nouveau modèle (Équation 32 et Tableau 66) correct (r^2 de 67% pour 39 individus) qui combine linéairement la date (jour de l'année) et trois données de synthèses à 9 jours (température de surface TS et réflectances dans le Rouge et Proche infrarouge d'AVHRR).

Pour valider cette approche, il serait toutefois nécessaire de disposer d'une série de données plus grande ainsi que d'autres sites et espèces, afin d'ajuster un modèle plus robuste.

4.3. SPOT-VEGETATION POUR SUIVRE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION

4.3.1. RELATION ENTRE LA TENEUR EN EAU FMC ET LES IMAGES SATELLITAIRES JOURNALIÈRES

Les images journalières (produit P) ont été acquises uniquement pour le mois de juillet 2001 dans un but prospectif. En effet, ces produits de réflectance des quatre canaux du capteur (B, R, PIR et MIR) ont subi peu de pré-traitements : étalonnage des radiométries et géoréférencement des pixels (avec rééchantillonnage sur une maille de 1x1km²) pour une précision de l'ordre de 400 mètres (source : CNES). Les effets de l'atmosphère ne sont pas corrigés. De plus, l'orbite du satellite SPOT est de 26 jours et donc l'angle de visée d'un pixel varie fortement sur cette période. Les variations radiométriques ainsi causées ne sont pas non plus prises en compte.

Ainsi pour le mois de juillet 2001, on observe un pixel de garrigue près de Montpellier. A l'intérieur de ce pixel, trois sites sont échantillonnés deux fois par semaine pendant l'été afin de calculer un indice FMC moyen. Cet état hydrique est ensuite comparé aux valeurs de réflectance de SPOT-VGT (Figure 92).

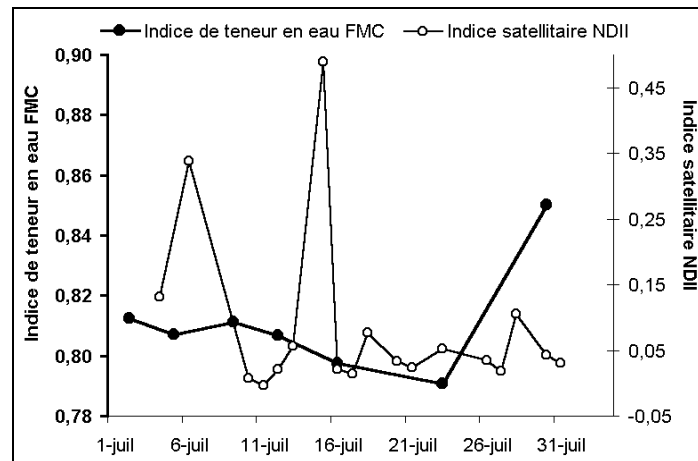


Figure 92. Évolution de la teneur en eau FMC et de l'indice satellitaire NDII journalier dérivé de SPOT-VEGETATION. Exemple du site de chêne kermès QC du Causse d'Aumelas pour le mois de juillet 2001.

Cet exemple est très révélateur des données utilisées. Certains jours (très nuageux) manquent dans la série et d'autres perturbent grandement le signal (6 et 15 juillet). Il est impossible de relier quelque indice que ce soit avec la teneur en eau de la végétation sans améliorer au préalable les données satellitaires (corrections atmosphériques et radiométriques).

Le centre de distribution des données VEGETATION (VITO en Belgique) propose alors un produit corrigé basé sur une synthèse à 10 jours du produit P quotidien.

4.3.2. RELATION ENTRE LA TENEUR EN EAU FMC ET LES IMAGES DE SYNTHÈSE À 10 JOURS

Dans le cadre de notre étude, nous utilisons les données de synthèse à 10 jours (produit D10) portant sur 9 images de synthèse de 10 jours chacune, soit 90 jours (trois mois) de données de juillet à octobre 2001.

Ces produits sont corrigés des effets atmosphériques par l'intermédiaire du modèle SMAC. L'effet de la distribution des réflectances bidirectionnelles (BRDF) est réduit par le modèle de Roujean (Roujean *et al.*, 1992).

Contrairement aux données NOAA-AVHRR (moyenne mobile sur 9 jours), les données D10 de SPOT-VGT correspondent à une période de 10 jours, non mobile. On a dû calculer pour chaque période, l'indice FMC moyen, en considérant la variation de la teneur en eau des plantes linéaire entre deux prélèvements. On perd en conséquence une partie de l'information de terrain puisque la variabilité temporelle de l'état hydrique des plantes est inférieure à 10 jours (démontrée au *chapitre 2*) !

De manière globale, on compare les indices satellitaires aux données de terrain de l'été 2001 pour l'ensemble des sites de prélèvement (sites CEMAGREF près de Montpellier, sites INRA du Massif des Maures et réseau hydrique de l'ONF dans 15 départements du sud-est de la France) (*Tableau 67*).

Tableau 67. Comparaison de l'état hydrique moyen de la végétation sur 10 jours (indice FMC) et des indices satellitaires dérivés du produit D10 de SPOT-VEGATATION

Organisme	Nombre de pixels	Nombre d'espèces	Effectif	Meilleur indice	r^2
Recherche CEMAGREF et INRA	3	4	32	GEMI	0,21
Réseau opérationnel ONF	30	20	207	PIR / MIR	0,16
Ensemble	33	20	239	NDII	0,20

Les corrélations sont mauvaises pour l'ensemble des sites quelle que soit leur origine (recherche ou opérationnelle).

On représente ci-dessous (Figure 93) l'indice NDII linéairement relié à la teneur en eau FMC.

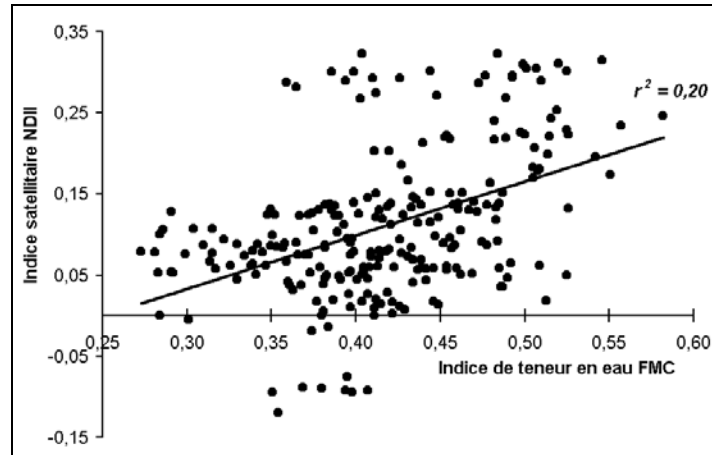


Figure 93. Comparaison entre les indices de teneur en eau FMC et satellitaire NDII dérivé des synthèses à 10 jours de SPOT-VEGETATION. Exemple des sites de l'Entente du 15 juillet au 30 septembre 2001.

Toutefois, si l'on distingue un par un les 33 sites échantillonnés, on observe une évolution semblable des indices FMC et GVMI (Figure 94).

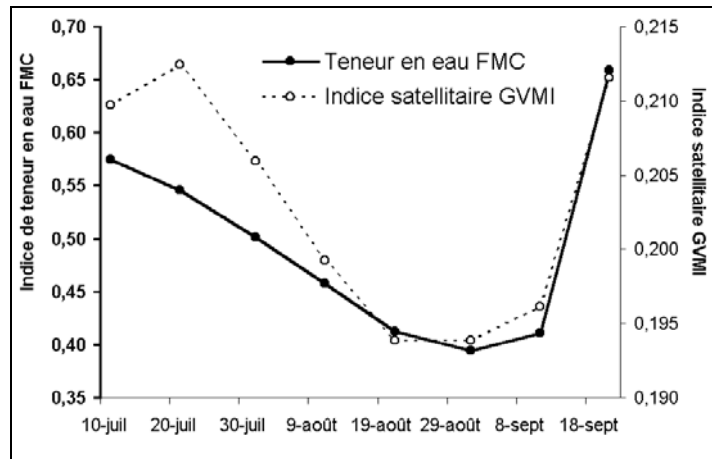


Figure 94. Évolution de la teneur en eau FMC et de l'indice satellitaire GVMI dérivé des synthèses à 10 jours de SPOT-VEGETATION. Exemple du site n°3 des Alpes-Maritimes suivi par l'ONF pendant l'été 2001.

Dans ce cas précis, la corrélation est forte (r^2 de 86%) mais les effectifs sont très faibles ($n=8$) (Figure 95).

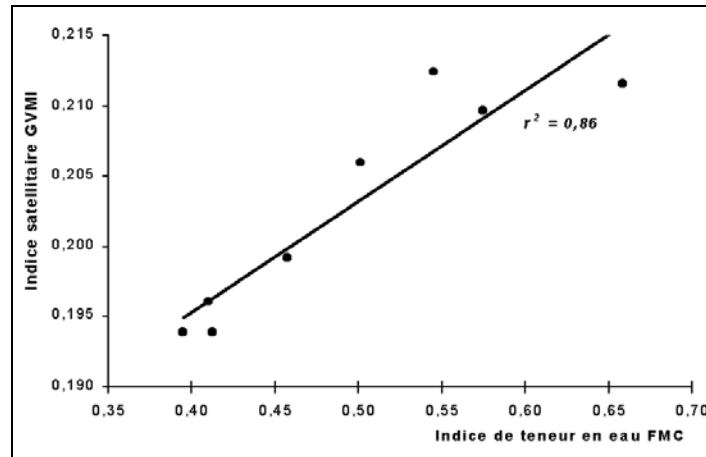


Figure 95. Comparaison entre les indices de teneur en eau FMC et satellitaire GVMI dérivé des synthèses à 10 jours de SPOT-VEGETATION. Exemple du site n°3 des Alpes-Maritimes suivi par l'ONF pendant l'été 2001.

Sur l'ensemble des sites, quelques cas sont prometteurs (r^2 supérieur à 80%) mais aucune distinction de ces sites par rapport aux autres n'est clairement identifiée (topographie, espèce...).

4.3.3. PRÉVISION DE LA TENEUR EN EAU

Par régression linéaire multiple, on peut toujours améliorer les corrélations au détriment de la simplicité du modèle (r^2 de 15% par combinaison linéaire des 4 canaux VGT, r^2 de 20% pour 10 indices, r^2 de 23% pour 15 indices...). Mais ces améliorations restent toutefois très faibles.

4.3.4. CARTOGRAPHIE DE LA VARIATION DE L'ÉTAT HYDRIQUE À PARTIR DES IMAGES DE SYNTHÈSE À 10 JOURS

De la même façon que pour le capteur haute résolution SPOT-HRVIR, nous réalisons une cartographie de la variation de l'indice NDII pour l'ensemble du sud-est de la France pour l'été 2001. La classification non supervisée utilisée permet de distinguer cinq classes de variation. Seules les zones forestières sont conservées en éliminant les autres surfaces à l'aide de la base de donnée Corine Land Cover.

La carte obtenue présente la dynamique entre les massifs forestiers pendant l'été 2001 (Figure 96).

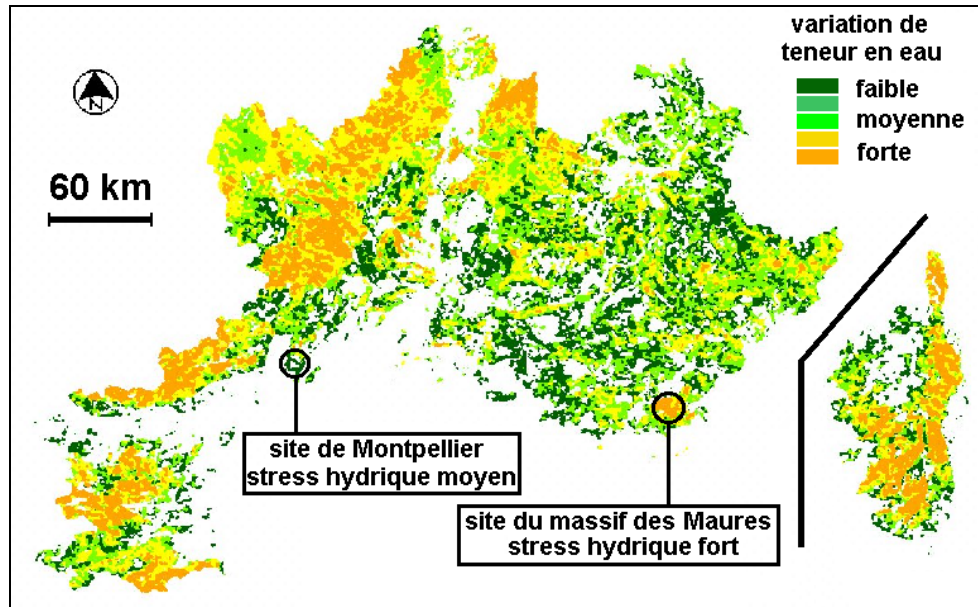


Figure 96. Carte de variation de l'indice NDII pour le sud-est de la France en 2001

Sur cette carte, nous pouvons localiser les deux sites de recherche suivis : pour le site près de Montpellier l'indice NDII varie moyennement alors qu'il varie fortement pour le massif des Maures. Ceci corrobore les mesures de terrain obtenues. Nous remarquons également que les zones d'arrière-pays et la Corse furent particulièrement touchées par la sécheresse pendant l'été 2001. SPOT-VEGETATION est un bon outil pour spatialiser à large échelle le comportement de la végétation et notamment l'impact d'une période de sécheresse sur les massifs forestiers.

4.3.5. CONCLUSION

L'observation de la dynamique temporelle sur une saison de la végétation, à partir d'images SPOT-VEGETATION, permet de rendre compte des comportements hydriques des différents massifs forestiers. En revanche, malgré quelques résultats positifs pour certains sites, les produits P et D10 du capteur VEGETATION ne permettent pas d'estimer l'état hydrique de la végétation dans toutes les situations. Les valeurs de réflectance des bandes du capteur sont davantage influencées par les paramètres intrinsèques aux sites (espèce, densité végétale, pente, exposition...) que par l'état hydrique de la végétation. La teneur en eau n'est donc pas le facteur principal commun à l'ensemble des sites observés par VGT.

La principale limite de cette étude réside dans la comparaison de deux phénomènes très différents : d'un côté, une réflectance moyenne sur une période de 10 jours, corrigée en partie des perturbations de l'atmosphère et des effets de BRDF, de l'autre, une teneur en eau de la végétation mesurée sur le terrain une à deux fois par semaine. Les deux échelles temporelles ne concordent pas. En conséquence, de nouvelles recherches sont à développer pour améliorer le traitement des images et notamment combiner les deux capteurs VGT1 et VGT2 pour proposer des données de qualité comme un nouveau produit de synthèse à 5 jours, plus en rapport avec la réelle variabilité de l'état hydrique des plantes.

4.4. TERRA-MODIS POUR SUIVRE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION

Comme nous l'avons précisé précédemment au *paragraphe 1.4.1*, les premières images MODIS sont récentes (février 2000) et les données de niveau 4 (produits validés) ne sont disponibles que depuis juin 2003 et pour une partie du globe seulement.

Nous présentons dans une première partie les relations entre l'état hydrique de la végétation (indice FMC) et les données MODIS en niveau 3 (produits provisoires) pendant l'été 2001. Dans une seconde partie, nous comparons pour cette même période les anciens produits aux nouveaux (niveau 4) et nous discutons la qualité des données. Enfin dans une troisième partie, nous testons un algorithme de correction des effets bidirectionnels sur les images journalières pour un site précis.

4.4.1. RELATION ENTRE LA TENEUR EN EAU FMC ET LES IMAGES SATELLITAIRES MODIS DE NIVEAU 3

Comme précisé au *paragraphe 2.3*, nous distinguons deux groupes de données (sites uniquement de recherche et ensemble des sites), fonctions des protocoles d'échantillonnage de terrain. D'après Dauriac *et al.* (2003), les premiers tests sont réalisés avec les données journalières (réflectances et température de surface) et les synthèses à 16 jours (réflectances) (Tableau 68).

Tableau 68. Comparaison de l'état hydrique de terrain FMC et des données satellitaires MODIS pour l'été 2001

Période	Bandes	Résolution		Sites de recherche			Ensemble des sites		
		temporelle	spatiale	r^2	indice	effectif	r^2	indice	effectif
Été 2001	7 bandes (réflectance)	1 jour	463m	0,13	PIR/MIR ₂	212	0,30	PIR/MIR ₂	1325
Été 2001	8 bandes (réflectance et TS)		927m	0,13	NDII ₂ /TS	199	0,24	NDII _m /TS	1268
5-14 juillet 2001 période humide	7 bandes (réflectance)		463m	0,81	GVMI ₁	26	0,53	PIR/MIR _m	156
8-17 sept. 2001 période sèche				0,02	GVMI ₁	17	0,15	PIR/MIR _m	137
Été 2001		16 jours	927m	0,21	PIR/MIR ₂	30	0,29	SARVI ₂	162

1: Première bande MIR centrée à 1240 nm 2: Deuxième bande MIR centrée à 1640 nm m: Moyenne des 3 Bandes MIR

Les résultats des corrélations sur les sites de recherche ne sont pas bons. Dans l'ensemble, il n'y pas de relation significative entre la teneur en eau et les données MODIS analysées. On remarque toutefois que les meilleurs indices sont toujours ceux qui combinent les bandes *Proche* et *Moyen infrarouge*, comme le rapport PIR/MIR, les indices GVMI, NDII....

L'utilisation de régressions multiples ou de régressions non linéaires améliore légèrement ces résultats. Pour quelques sites, représentant moins de 10% des données, la corrélation peut atteindre 90%. Mais cette amélioration est difficilement généralisable. Le coefficient de détermination r^2 passe de 30 à 40% seulement pour l'ensemble des sites en été 2001.

Comme pour la Figure 94 avec les images SPOT-VGT, nous reprenons l'exemple du site n°3 des Alpes-Maritimes suivi par l'ONF comparé aux images TERRA-MODIS (Figure 97).

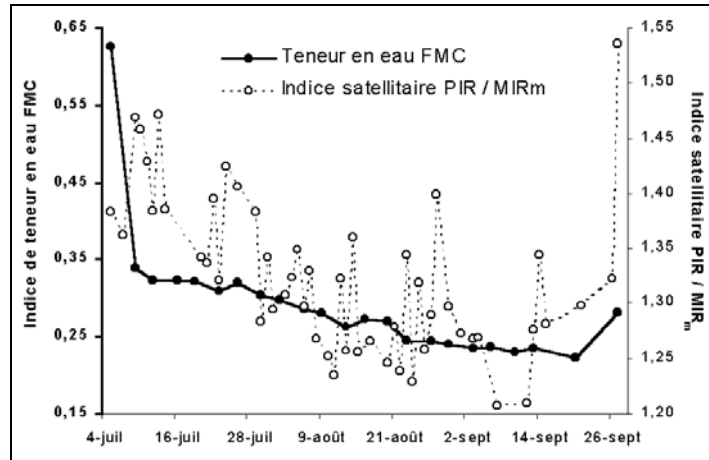


Figure 97. Évolution de la teneur en eau FMC et de l'indice satellitaire PIR/MIR_m dérivé des images journalières de TERRA-MODIS. Exemple du site n°3 des Alpes-Maritimes pendant l'été 2001.

Nous observons une très grande variabilité d'un jour à l'autre de l'indice satellitaire. En effet, la variation journalière de la réflectance est très irrégulière, à cause de l'effet perturbateur de la réflectance bidirectionnelle (BRDF). Cet effet doit être absolument corrigé.

4.4.2. NOUVEAUX PRODUITS MODIS DE QUALITÉ AMÉLIORÉE

Les premiers produits de réflectance proposés par la NASA à partir de 2001 étaient de qualité moyenne (niveau 3 « *provisional* »). Les corrélations obtenues entre humidité de terrain et indices dérivés des données MODIS sont faibles (Cf. *paragraphe 4.4.1* ci-dessus). Depuis juin 2003, une nouvelle version des produits MODIS est disponible (niveau 4 « *validated* ») selon les continents.

Nous souhaitons comparer ces produits et présenter les modifications mises en œuvre par le distributeur d'images dans l'intérêt de notre étude. Nous appuyons notre analyse sur des produits de niveaux 3 et 4 des mêmes images de l'été 2001 sur les mêmes zones d'étude.

La validation et le traitement des images de niveau 3 en niveau 4 ont débuté en décembre 2002 pour s'achever fin 2003. La couverture journalière mondiale est désormais disponible. Les images archivées couvrent le globe depuis février 2000, début de la mission TERRA (Figure 98).

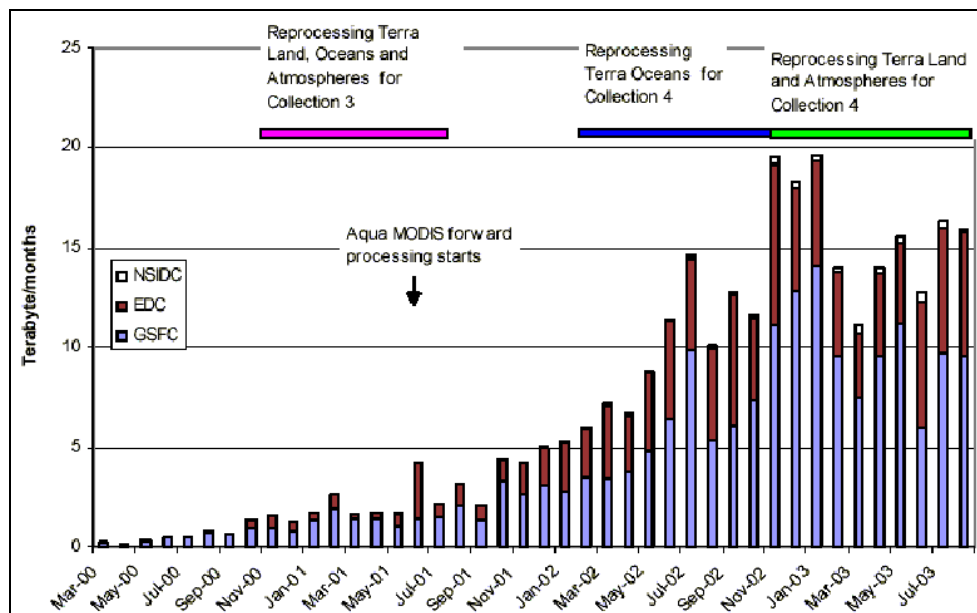


Figure 98. Calendrier de la production des différentes collections MODIS

4.4.2.1. PRINCIPAUX CHANGEMENTS

Les principaux changements des produits de niveau 4 sont présentés dans le Tableau 69 :

Tableau 69. Changement des produits MODIS de niveau 4 par rapport au niveau 3

Produit	Changements
MOD09GHK	- Ajout d'un algorithme interne pour masquer les nuages denses - Ajout d'un filtre des nuages fins sur une base géométrique - Amélioration de l'estimation des aérosols sur des zones brillantes en présence de nuages ou de neige - Amélioration du schéma d'interpolation de l'aérosol - Pas d'utilisation du détecteur bruité 0 sur la bande 5 pour l'estimation des aérosols afin d'éviter un artefact de lignage - Élimination du lignage de la bande 26 car déjà fait dans le produit brut L1B pour le niveau 4
MOD09A1A	- Utilisation du MOD09 masque des nuages interne dans le traitement de la sélection des observations - Changement du schéma de composition et sélection des observations claires et proches du nadir - Ajout d'une logique pour traiter les inconsistances dans les données d'entrée
MOD43B ₄	- Actualisation de la base de données de la BRDF - Actualisation des LUTs (Look Up Tables) - Utilisation du modèle LiTransit (Lucht et al. 2000, Lucht et Lewis 2000) de la BRDF au lieu du modèle Walthall (Walthall et al., 1985)

4.4.2.2. MÉTHODOLOGIE

Nous comparons les images MODIS des deux niveaux 3 et 4 pour les trois produits :

- MOD09GHK, réflectances journalières 500m : jours n°185 et 236 de l'année 2001 ;
- MOD09A1A, synthèse sur 8 jours 500m : du jour n°185 au 192 puis du jour n°233 au 240 de l'année 2001 ;
- MOD43B4, réflectance bidirectionnelle ajustée au nadir (NBAR) : toutes les images de juin à septembre 2001.

Nous avons choisi des périodes contenant les jours n°185 et 236 car ils représentent deux conditions climatologiques différentes : le jour 185 (4 juillet) est un jour nuageux et le jour 236 (24 août) est un jour très clair sur l'ensemble de l'image.

4.4.2.3. RÉFLECTANCES JOURNALIÈRES DE L'ÉTÉ 2001 EN NIVEAUX 3 ET 4

Tout d'abord, pour comparer les réflectances, nous calculons l'image des différences de réflectance entre les deux niveaux pour chaque bande. Les différences les plus fortes apparaissent dans les zones montagneuses (Alpes). Ceci peut être dû à l'amélioration des algorithmes du niveau 4 ou à l'accumulation des nuages sur les sommets ou encore à la présence de neige.

Les fichiers d'information de qualité des images (*HFA info*) du jour 185 et 236 sont présentés en *Annexe 12*.

Pour les jours 185 et 236, en niveau 4, les pixels de bonne qualité représentent 90% du total alors qu'en niveau 3 il n'y en a aucun. Dans le contrôle de qualité de chaque niveau, on peut lire l'information présente dans le *Tableau 70* pour la plupart des pixels :

Tableau 70. Contrôle-qualité MODIS des jours 185 et 236

Niveau 3 provisoire	Niveau 4 validé
Pas de correction de voisinage Correction atmosphérique Bande 1 à 7 de plus haute qualité	
Le pixel corrigé a été produit sans toute la qualité idéale dans quelques bandes	Le pixel corrigé a été produit avec la qualité idéale dans toutes les bandes

Mais certains pixels présentent des erreurs sur la bande 5 (moyen infrarouge réflectif de 1230 à 1250 nm), avec davantage de données défectueuses dans le niveau 3.

4.4.2.4. RÉFLECTANCES DE 8 JOURS DE L'ÉTÉ 2001 EN NIVEAUX 3 ET 4

Nous avons suivi la même méthode que pour les images quotidiennes, mais avec les synthèses des jours 185 à 192 (du 4 au 11 juillet 2001) et des jours 233 à 240 (du 21 au 28 août 2001). La différence des images des deux niveaux est très similaire à celle que l'on obtient avec les images quotidiennes : les plus grandes différences de réflectance se situent aussi en zones montagneuses.

Les fichiers d'information de qualité des images (*HFA info*) des périodes 185-192 et 233-240 sont présentés en *Annexe 12*.

4.4.2.5. PÉRIODE ENSOLEILLÉE DU 21 AU 28 AOÛT 2001 (J 233 À J 240)

Les résultats obtenus sont assez similaires pour les deux niveaux ; la seule différence réside dans le nombre de pixels nuageux. Pour les données de niveau 3, il y a 17% de nuages alors qu'il n'y en a plus en niveau 4. L'amélioration de l'algorithme du masque des nuages et la sélection des pixels clairs dans le processus de composition du niveau 4 semble donc bien jouer son rôle.

Pour analyser les données d'indicateur de qualité (*MODIS_sur_refl_state_500m*) on crée une zone d'intérêt AOI (*Area Of Interest*) la plus hétérogène possible, couvrant le département français des Alpes-Maritimes. Pour les deux niveaux, le pixel type a des caractéristiques similaires (Tableau 71).

Tableau 71. Contrôle-qualité MODIS de la période 233-240 de 2001

Voisinage de nuage détecté	non
Correction de BRDF	non
Neige	non
Source de données d'ozone	climatologie
Source de données de vapeur d'eau	climatologie
Cirrus détecté	aucun
Quantité d'aérosols	moyenne
Occupation du sol	terrain
Ombre des nuages	non
État des nuages	clair

En revanche, les deux niveaux sont différents concernant l'état des nuages et le niveau d'aérosols (Tableau 72).

Tableau 72. État nuageux/niveau d'aérosol pour les données MODIS de la période 233-240 de 2001 en niveaux 3 et 4

État nuageux Niveau d'Aérosols	Niveau 3	Clair	Mélange	Nuageux	TOTAL	Niveau 4	Clair	Mélange	Nuageux	TOTAL
Bas		25,0%	0,0%	0,1%	25,1%		46,0%	0,3%	0,0%	46,3%
Intermédiaire		72,9%	0,3%	0,4%	73,6%		52,2%	0,3%	0,1%	52,6%
Haut		0,9%	0,2%	0,1%	1,2%		0,7%	0,1%	0,0%	0,8%
Autre		0,1%	0,0%	0,0%	0,1%		0,2%	0,0%	0,1%	0,3%
TOTAL		98,9%	0,5%	0,6%	100%		99,1%	0,7%	0,2%	100%

En niveau 3, la quantité d'aérosols est plus élevée qu'en niveau 4 (par exemple 73,6% de pixels en classe intermédiaire contre 52,6%).

4.4.2.6. PÉRIODE NUAGEUSE DU 4 AU 11 JUILLET 2001 (J 185 À J 192)

Dans le cas des images de la période 185-192, le contrôle de qualité de la réflectance nous donne également l'information présentée dans le Tableau 71 pour la plupart des pixels et l'analyse des données d'indicateur de qualité est identique à la période précédente.

Nous observons le tableau de contingence, comparant l'état des nuages et le niveau d'aérosols (Tableau 73) :

Tableau 73. État nuageux/niveau d'aérosol pour les données MODIS de la période 185-192 de 2001 en niveaux 3 et 4

État nuageux Niveau d'Aérosols		Clair	Mélange	Nuageux	TOTAL		Clair	Mélange	Nuageux	TOTAL
	Niveau 3					Niveau 4				
Bas		11,4%	0,5%	0,3%	12,2%		25,6%	0,2%	0,9%	26,7%
Intermédiaire		51,9%	1,7%	1,4%	55,0%		56,2%	0,4%	3,0%	59,6%
Haut		19,8%	6,9%	4,6%	31,3%		8,9%	0,3%	1,2%	10,4%
Autre		0,3%	1,2%	0,0%	1,5%		1,1%	1,6%	0,6%	3,3%
TOTAL		83,4%	10,3%	6,3%	100%		99,1%	0,2%	0,7%	100%

Nous remarquons une grande différence entre les deux niveaux de traitement pour le nombre de pixels nuageux (83,4% de ciel clair en niveau 3 et 99,1% en niveau 4). De même, la proportion des pixels à fortes valeurs d'aérosols est réduite (de 31,3% à 10,4%). L'amélioration des algorithmes des produits de niveau 4 est par conséquent réelle.

4.4.2.7. RÉFLECTANCES DE 16 JOURS DE L'ÉTÉ 2001 EN NIVEAUX 3 ET 4

Avec les données de NBAR (*Nadir Bidirectional Adjusted Reflectance*, réflectance bidirectionnelle normalisée au nadir) des images de l'été 2001, nous calculons pour les deux niveaux les deux indices satellitaires suivants :

- le NDVI (*Normalised Difference Vegetation Index*) ;
- le NDII (*Normalised Difference Infrared Index*) en utilisant dans le *Moyen infrarouge* la bande 7 (de 2105 à 2155 nm) de MODIS.

Ces indices sont calculés pour dix pixels au sein de la zone du Causse d'Aumelas près de Montpellier :

- cinq à couverture majoritaire de taillis de chêne vert,
- cinq à couverture majoritaire de garrigue à chêne kermès.

Dans la suite, par souci de clarté, nous ne présenterons que l'analyse de la zone de chêne vert, les résultats étant très similaires pour les pixels de chêne kermès.

Les images des périodes 161-176 et 177-192 ne sont pas disponibles en niveau 3 et ne sont donc pas utilisées dans les calculs.

Les graphiques pour les deux niveaux sont présentés dans la Figure 99 :

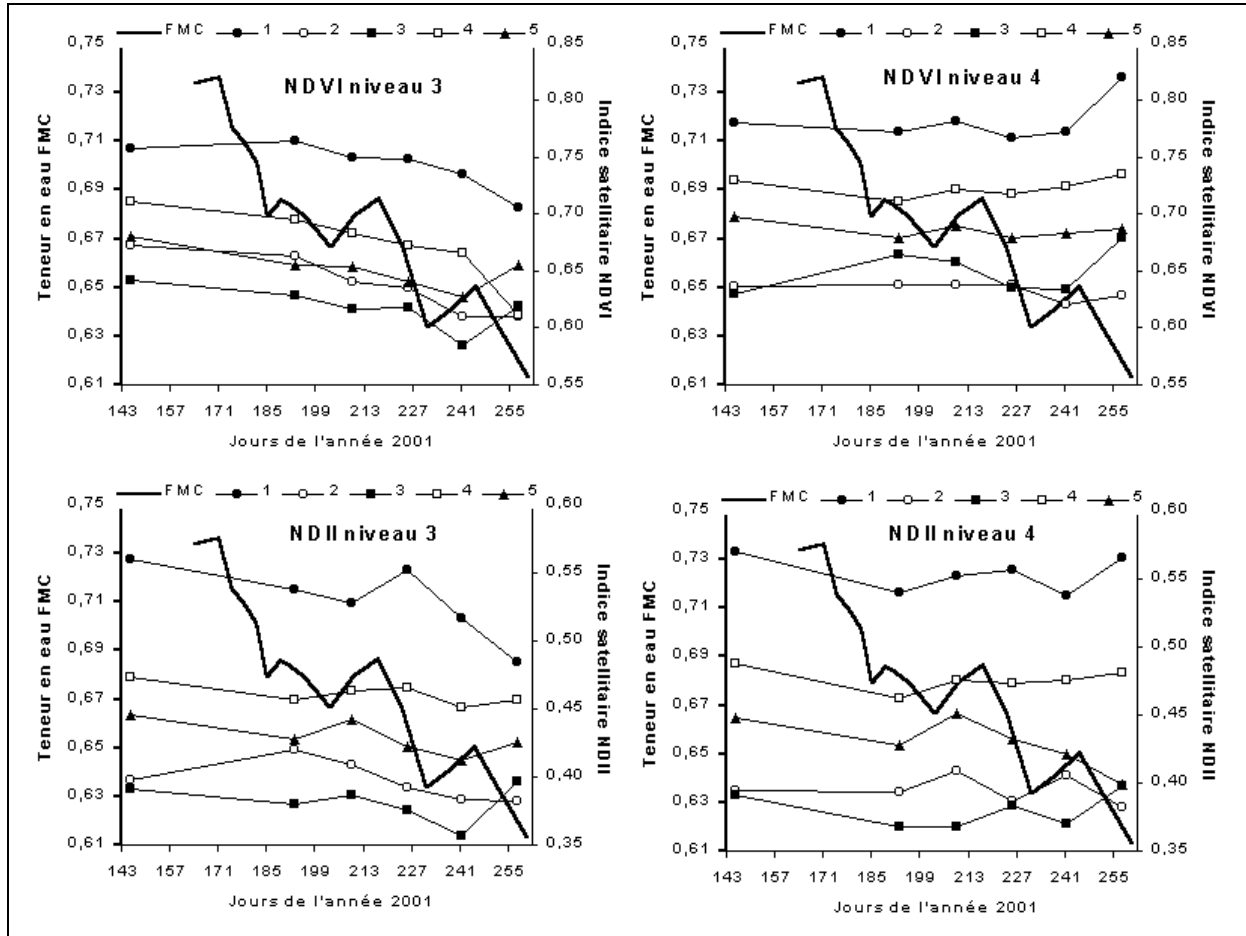


Figure 99. Évolution temporelle pendant l'été 2001 des indices satellitaires NDVI et NDII sur les 5 pixels de chêne vert du Causse d'Aumelas. Comparaison des niveaux 3 et 4 des données MODIS.

Les données obtenues (NDVI et NDII en niveaux 3 et 4) ne reflètent pas l'évolution de la végétation pendant l'été. En effet, les courbes des indices satellitaires devraient suivre l'évolution de l'indice FMC; notamment les trois hausses de l'indice FMC, dues aux réhydratations de la végétation par la pluie, ne sont pas perçues par les indices satellitaires.

Également, nous notons que l'évolution de certains pixels pour la dernière période (257-272) est différente selon le niveau de correction du produit MODIS. C'est le cas par exemple des pixels 1 et 4. C'est pourquoi nous examinons les différences entre les pixels (Tableau 74).

Tableau 74. Contrôle-qualité des bandes du produit MOD43B4 en niveaux 3 et 4 pour les cinq pixels de chêne vert de la période 257-272 de l'année 2001

n3 / n4	Qualité MODIS	Bande 1 Rouge	Bande 2 PIR	Bande 3 Bleu	Bande 4 Vert	Bande 5 MIR1	Bande 6 MIR2	Bande 7 MIR3
Pixel 1	bonne	1 / 0	1 / 1	1 / 0	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1
Pixel 2	bonne	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1
Pixel 3	médiocre	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1	00 / 00	0 / 0	0 / 0
Pixel 4	bonne	1 / 00	1 / 1	00 / 0	1 / 0	1 / 1	1 / 1	1 / 1
Pixel 5	médiocre	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1	00 / 00	0 / 0	0 / 0

1 : EQM bon, WoD-NBAR bon, WoD-WSA bon

00 : inversion des magnitudes et nombre d'observations supérieur ou égal à 7

0 : inversion des magnitudes et nombre d'observations entre 3 et 7

 niveaux 3 et 4 différents

Les pixels 1 et 4 diffèrent pour la qualité des bandes *Bleu*, *Vert* et *Rouge*. En niveau 3 de production, l'inversion de la BRDF est totale alors qu'en niveau 4, il manque des observations de terrain (moins de 7 sur 16 jours). Cette inversion est désormais possible grâce aux nouveaux algorithmes de détection des nuages et de correction atmosphérique.

4.4.2.8. RÉFLECTANCES À 16 JOURS DE L'ÉTÉ 2003 EN NIVEAU 4

Nous disposons des données de réflectance à 16 jours de l'été 2003, en niveau 4 uniquement. Il est intéressant de reprendre la même approche pour analyser la dynamique temporelle des indices NDVI et NDII des cinq pixels de chêne vert et de chêne kermès (*Figure 100*).

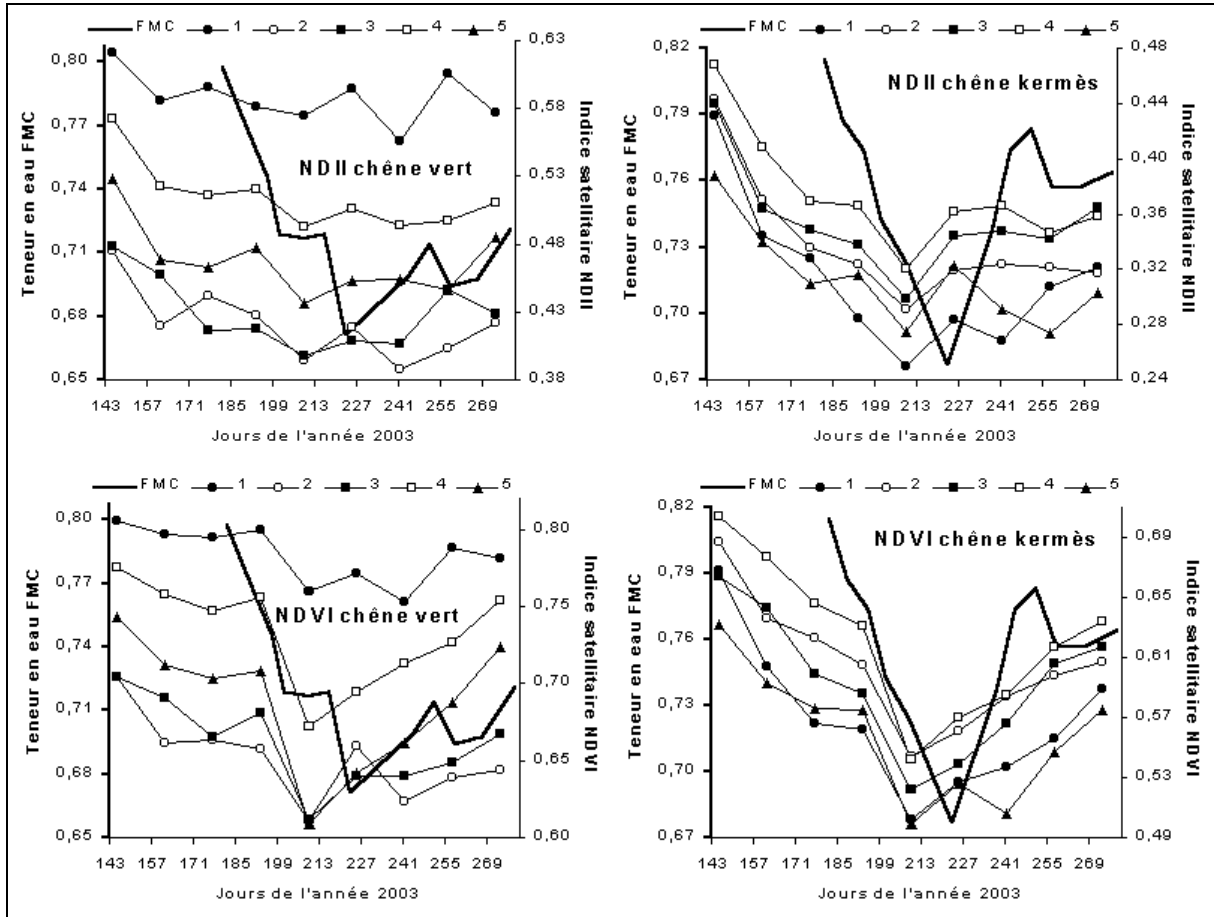


Figure 100. Évolution temporelle pendant l'été 2003 des indices satellitaires NDVI et NDII sur les cinq pixels de chêne vert et chêne kermès du Causse d'Aumelas. Niveau 4 des données MODIS.

Pendant l'été 2003 caniculaire (record centenaire), le NDVI et le NDII se comportent logiquement, avec une baisse importante en milieu d'été puis une remontée de l'indice en fin de saison. Ce phénomène est plus marqué pour le chêne kermès que pour le chêne vert, plutôt pour l'indice NDVI que pour le NDII.

Ces résultats sont encourageants et les produits MODIS de niveau 4 pour l'année 2003, par l'intermédiaire d'indices satellitaires, semblent être liés à l'état hydrique de la végétation. On peut s'interroger sur ce résultat, étant donnée l'absence de relation obtenue avec les mêmes produits de niveau 4 pour l'été 2001 (*Figure 99*).

4.4.2.9. SYNTHÈSE

Cette partie de l'étude a été rendue nécessaire par le constat que les indices dérivés des produits MODIS avaient des comportements non conformes aux attentes, dont la cause semblait venir d'un défaut de qualité des produits. Nous avons donc essayé de connaître la qualité réelle des produits de réflectance fournis par la NASA pour le capteur MODIS à différentes échelles temporelles (1, 8 et 16 jours). Nous avons pu vérifier que les produits de niveau 4 sont d'une qualité supérieure aux produits de niveau 3. Il est clair aussi que le produit à 16 jours en niveau 4, « corrigé de tout », fournit des données de qualité raisonnable avec une bonne précision géographique et radiométrique.

Il reste cependant une difficulté liée à l'échelle temporelle de ce produit (une image de synthèse tous les 16 jours) qui ne correspond pas vraiment aux attentes des utilisateurs, lesquels souhaitent un produit environ tous les 4 jours pour le suivi du stress hydrique à une échelle sub-hebdomadaire.

Pour l'ensemble des trois produits testés, nous avons pu observer des modifications significatives entre les deux niveaux. Ces modifications sont-elles de réelles améliorations ? Pour répondre à cette question, nous allons reprendre les produits séparément.

4.4.2.9.1. PRODUIT MOD09GHK, RÉFLECTANCES JOURNALIÈRES

La principale modification est liée aux algorithmes de corrections atmosphériques (des aérosols, de la vapeur d'eau et des nuages). Ces algorithmes utilisent des produits de caractérisation de l'atmosphère (MOD04 pour les aérosols, MOD05 pour la vapeur d'eau, MOD07 pour l'ozone et MOD35 pour le masque des nuages), générés plus tôt dans la chaîne de traitements MODIS. A défaut d'une analyse détaillée de ces produits, il faut admettre le contrôle-qualité de la NASA, indiquant une meilleure qualité générale des données en niveau 4, mais qui ne précise pas la manière dont cette qualité est évaluée !

4.4.2.9.2. PRODUIT MOD09A1A, SYNTHÈSE À 8 JOURS

Ce produit est une synthèse sur une période de 8 jours des données de réflectance quotidienne, donc toutes les modifications subies par les données de réflectance quotidienne se reflèteront sur ce produit. Les principales modifications concernent le niveau de traitement et de sélection des observations. Nous avons pu observer pour l'été 2001 une réduction importante des pixels nuageux entre les niveaux 3 et 4. Il semble donc que la détection des pixels nuageux avec le nouvel algorithme soit plus précise tout en excluant les pixels de mauvaise qualité.

4.4.2.9.3. PRODUIT MOD43B4, NBAR

Toutes les modifications subies par les données de réflectance quotidienne se reflètent aussi sur ce produit élaboré plus tard dans la chaîne. Similairement à la synthèse à 8 jours, l'amélioration de l'algorithme de détection des nuages permet une meilleure discrimination des observations de mauvaise qualité et un meilleur ajustement des paramètres de BRDF.

Par ailleurs, le changement d'un modèle de BRDF empirique (Walthall) à un modèle semi-empirique (modèle LiTransit, Li *et al.* 1999, Gao *et al.* 1999) permet une meilleure estimation des processus physiques de BRDF mais aux dépens d'une plus grande complexité de formulation.

4.4.3. CORRECTION DES EFFETS BIDIRECTIONNELS DES DONNÉES JOURNALIÈRES MODIS

4.4.3.1. GÉNÉRALITÉ

Plusieurs modèles sont disponibles pour corriger les effets bidirectionnels de la surface de la Terre. Les plus courants sont les modèles semi-empiriques basés sur la combinaison linéaire de paramètres appelés noyaux ou *kernels*³⁴ (Hu *et al.* 1997, Hert *et al.* 2001, Pokrovsky et Roujean 2002a et b). La formule générale peut s'exprimer ainsi :

$$\text{Équation 33. } \rho(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda) = f_{iso}(\lambda) + f_{vol}(\lambda)K_{vol}(\theta_s, \theta_v, \phi) + f_{geo}(\lambda)K_{geo}(\theta_s, \theta_v, \phi) ,$$

avec ρ la réflectance de la surface,

θ_s l'angle zénithal solaire,

θ_v l'angle zénithal de visée,

ϕ l'angle azimutal relatif entre le satellite et le soleil tel que $\phi = \phi_v - \phi_s$,

λ les différentes longueurs d'onde.

Nous représentons ces angles sur la Figure 101.

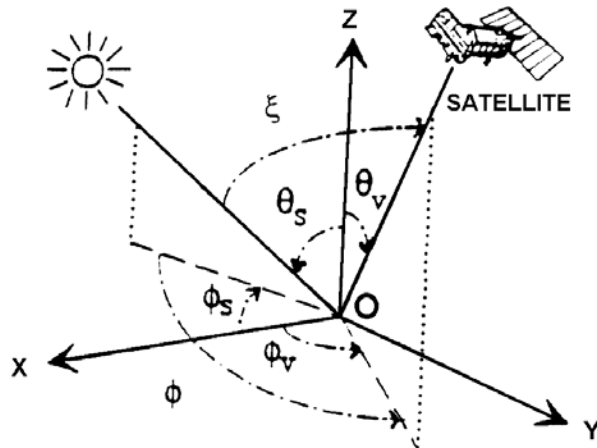


Figure 101. Angles de visée et d'éclairement (d'après Duchemin, 1999)

Les *kernels* K_{vol} et K_{geo} sont l'expression géométrique de la BRDF causée par la végétation. f_{iso} , f_{vol} et f_{geo} sont les paramètres du modèle, fonction de la longueur d'onde.

³⁴ Collections de représentations d'objets géométriques de taille constante et d'opérations sur ces représentations

D'après Pokrovski et Roujean (2002a), diverses interprétations peuvent être assignées aux *kernels* géométriques et volumétriques :

- la séparation entre le sol (K_{geo}) et la végétation (K_{vol}) ;
- la séparation entre un milieu mince (K_{geo}) et un autre profond (K_{vol}) ;
- la séparation entre une macro-échelle (K_{geo}) et une micro-échelle (K_{vol}).

Notre principal objectif est d'utiliser les données MODIS journalières pour estimer la teneur en eau de la végétation, en corrigeant les effets de réflectance bidirectionnelle (BRDF). Notre travail porte sur un site particulier : un taillis de chêne vert du Causse d'Aumelas près de Montpellier. Ce site est relativement homogène sur une surface de 1 km². L'état hydrique des feuilles est mesuré pendant les étés 2001 à 2003.

Nous souhaitons tout d'abord corriger les effets bidirectionnels des longueurs d'onde du Rouge et du Proche infrarouge en utilisant les images du 1^{er} juin au 13 octobre 2003, l'été le plus chaud et le plus sec sur la région depuis un siècle.

4.4.3.2. MODÈLE DE CORRECTION DE LA NASA

Pour cela, dans un premier temps, nous choisissons les *kernels* de l'équipe MODIS de la NASA (Strahler et Muller, 1999) utilisés pour corriger la BRDF du produit MODIS de réflectance à 16 jours (produit MOD43 BRDF/Albédo).

- Le *kernel* volumétrique (K_{vol}) **Ross-Thick** défini par Roujean *et al.* (1992) est basé sur un **modèle de houppier dense** et s'exprime ainsi :

Équation 34.
$$K_{vol}(\theta_s, \theta_v, \phi) = \frac{4}{3\pi} \frac{1}{\cos\theta_s + \cos\theta_v} \times \left[\left(\frac{\pi}{2} - \xi \right) \cos\xi + \sin\xi \right] - \frac{1}{3} ,$$

où ξ est l'angle de dispersion de phase défini par $\xi = \cos^{-1}(\cos\theta_s \cos\theta_v + \sin\theta_s \sin\theta_v \cos\phi)$,

avec θ_s l'angle zénithal solaire,

θ_v l'angle zénithal de visée,

ϕ l'angle azimutal relatif (entre le satellite et le soleil).

Le terme $\frac{1}{3}$ est soustrait, par convention, pour normaliser les réflectances (visée au nadir, soleil au zénith).

- Le *kernel* géométrique (K_{geo}) **Li-Sparse-Reciprocal** (Lucht 1998, Lucht et Roujean 2000) est une modification de celui proposé par Li et Strahler (1992) et représente un scénario avec des sphéroïdes dont chaque centre a une cote égale au double du rayon. Le *kernel* s'exprime par l'équation suivante :

Équation 35.
$$K_{geo}(\theta_s, \theta_v, \phi) = \frac{1}{\pi} (t - \sin t \cos t) (\sec\theta_s + \sec\theta_v) - (\sec\theta_s + \sec\theta_v) + \frac{1}{2} (1 + \cos\xi) \sec\theta_v \sec\theta_s ,$$

où $\cos t = \frac{\sqrt{D^2 + (\tan\theta_s \tan\theta_v \cos\phi)^2}}{(\sec\theta_s + \sec\theta_v)}$ et $D = \sqrt{\tan^2\theta_s + \tan^2\theta_v - 2 \tan\theta_s \tan\theta_v \cos\phi}$.

On rappelle $\sec(x) = \frac{1}{\cos(x)}$.

Le paramètre $\cos t$ varie bien sûr sur l'intervalle $[-1; +1]$. Des valeurs hors de cet intervalle n'indiquent aucune superposition et sont donc négligées.

4.4.3.3. INVERSION DU MODÈLE

L'inversion du modèle est réalisée sur les données correspondant à un intervalle de 16 jours, déjà « nettoyées » des nuages. Cet intervalle correspond à la périodicité de l'orbite du satellite et donc au délai de visée d'un même lieu avec le même angle. L'ajustement du modèle varie selon le nombre de jours et la longueur d'onde (Schaaf *et al.*, 2002). Les effets atmosphériques sont plus importants dans le domaine du visible que dans l'infrarouge. La correction de ces perturbations est alors plus ardue dans le visible ; l'ajustement du modèle est généralement meilleur dans le *proche infrarouge* que dans le *rouge*.

Après ajustement des paramètres du modèle, nous normalisons les données de réflectance mesurées pour n'importe quelle géométrie de visée. Par exemple, pour un angle zénithal solaire de 45° et une visée au nadir (angle zénithal de visée nul), Duchemin (1999) propose la simple normalisation :

$$\text{Équation 36.} \quad \rho_{NADIR} = \rho(\theta_s, \theta_v, \phi) \frac{\rho_{\text{Modèle}}(45^\circ, 0^\circ, \phi_0)}{\rho_{\text{Modèle}}(\theta_s, \theta_v, \phi)},$$

avec ρ_{NADIR} la réflectance normalisée,

ρ la réflectance mesurée,

$\rho_{\text{Modèle}}$ la réflectance modélisée,

θ_s l'angle zénithal solaire,

θ_v l'angle zénithal de visée,

ϕ l'angle azimutal relatif,

ϕ_0 l'angle azimutal de normalisation fixé par Duchemin (1999)³⁵.

4.4.3.4. RÉSULTATS

Nous présentons les statistiques descriptives des bandes *Rouge*, *Proche infrarouge* de MODIS et de l'indice NDVI dérivé, avant et après la correction des effets de réflectance bidirectionnelle (Tableau 75).

Tableau 75. Statistiques descriptives des bandes *Rouge*, *Proche infrarouge* de MODIS et de l'indice NDVI, avant et après correction radiométrique de la BRDF (n=80)

Statistique (en %)	R		PIR		NDVI	
	avant	après	avant	après	avant	après
Minimum	2,9	2,4	20,9	23,2	56,7	63,7
Moyenne	5,2	4,3	29,0	26,0	70,2	71,8
Médiane	5,0	4,3	29,5	25,5	71,2	72,0
Maximum	9,4	6,4	38,5	32,8	78,8	81,4
Écart-type	1,4	0,7	4,5	1,6	4,8	4,1

L'écart-type des valeurs de réflectance est réduit de moitié dans le *Rouge* et des deux tiers dans le *Proche infrarouge*. Les réflectances sont écartées avec une diminution de la moyenne et de la médiane.

³⁵ Il précise que la réflectance modélisée $\rho_{\text{Modèle}}(45^\circ, 0^\circ, \phi_0)$ est indépendante de l'angle azimutal relatif.

On peut observer l'évolution temporelle des deux bandes R et PIR pour un pixel MODIS du site de chêne vert suivi (Figure 102), avec et sans correction :

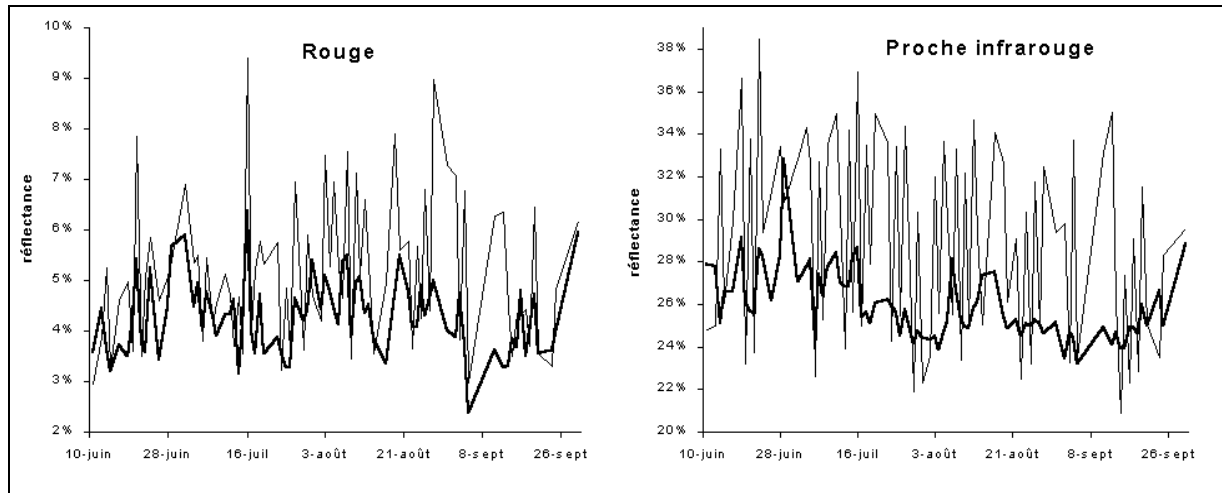


Figure 102. Évolution quotidienne de la réflectance des bandes *Rouge* et *Proche infrarouge* d'un pixel MODIS de chêne vert sur le Causse d'Aumelas près de Montpellier pendant l'été 2003. Valeurs brutes (trait fin) et valeurs corrigées radiométriquement de la BRDF (trait épais).

Dans le cas de l'indice satellitaire NDVI, l'amélioration reste faible. Cet indice, basé lui-même sur le rapport des bandes R et PIR, annule une grande partie des effets bidirectionnels.

Un premier test consiste à relier l'indice NDVI du pixel suivi à la teneur en eau (indice FMC) du chêne vert pendant l'été 2003. On calcule le coefficient de détermination r^2 de la regression linéaire avec et sans correction des effets bidirectionnels. On a ainsi un r^2 de 37% avec les données initiales sans correction et un r^2 de 74% après correction. Malgré les faibles effectifs ($n=14$) l'amélioration due à la correction est donc réelle.

4.4.3.5. CONCLUSION

Cette étude préliminaire, liée à la correction des effets bidirectionnels, montre une amélioration importante de la qualité des données journalières utilisées. L'approche mérite d'être étendue à l'ensemble des sept bandes du capteur MODIS et sur l'ensemble des pixels de l'image, ou du moins dans un premier temps, sur l'ensemble des pixels des sites de mesure, pour confirmer l'amélioration des corrélations. Ce travail nécessite le développement d'une base de données plus complexe ainsi que des méthodes de programmation adaptées pour accélérer les corrections.

Il faut rappeler que nous utilisons dans cette étude le même modèle qu'utilise en routine la NASA pour produire des images de synthèse à 16 jours, quelle que soit l'occupation du sol (territoires artificiels, savane, forêt boréale...). Leur modèle est très général. Il est donc souhaitable de choisir des *kernels* plus adaptés aux conditions méditerranéennes pour améliorer l'ajustement des modèles.

Dans la littérature, il existe un consensus sur l'utilisation du *kernel* volumétrique *Ross-Thick* (Roujean et al., 1992).

Le choix du *kernel* géométrique (K_{geo}) est en revanche plus discuté. Outre le modèle *Li-Sparse-Reciprocal* (Wanner et al., 1995) présenté auparavant dans l'Équation 35, on distingue :

- Le modèle **Li-Sparse non-reciprocal** (Li et Strahler, 1992) définit par :

Équation 37. $K_{geo}(\theta_s, \theta_v, \phi) = \frac{1}{\pi} (t - \sin t \cos t) (\sec \theta_s + \sec \theta_v) - (\sec \theta_s + \sec \theta_v) + \frac{1}{2} (1 + \cos \xi) \sec \theta_v.$

- Le modèle de **Roujean** (Roujean et al., 1992) basé sur des saillies rectangulaires disposées au hasard :

Équation 38. $K_{geo}(\theta_s, \theta_v, \phi) = \frac{1}{2\pi} [(\pi - \phi) \cos \phi + \sin \phi] \tan \theta_s \tan \theta_v - \frac{1}{\pi} \left[\tan \theta_s + \tan \theta_v + \sqrt{\tan^2 \theta_s + \tan^2 \theta_v + 2 \tan \theta_s \tan \theta_v \cos \phi} \right].$

- Le modèle **Li-Dense** (Wanner et al., 1995) basé sur une canopée dense où l'ombrage mutuel ne peut être négligé :

Équation 39.
$$K_{geo}(\theta_s, \theta_v, \phi) = \frac{(1 + \cos \xi \sec \theta_v)}{\cos \theta_s + \cos \theta_v - \frac{1}{\pi} (t - \sin t \cos t) (\sec \theta_s + \sec \theta_v)} - 2$$

Il faudrait donc appliquer un des quatre modèles géométriques selon les conditions de couvert végétal (plus ou moins dense). L'expérience mérite d'être testée dans l'avenir sur les sites de recherche du Causse d'Aumelas et du massif des Maures pour les trois étés suivis (2001 à 2003).

5. SYNTHÈSE

Dans ce cinquième chapitre, notre principal objectif était de tester plusieurs capteurs satellitaires à basse résolution (capteur AVHRR de NOAA 16, VEGETATION de SPOT 4 et MODIS de TERRA) pour suivre l'état hydrique de la végétation mesuré sur le terrain.

L'originalité du travail s'est appuyée sur l'utilisation :

- de données de terrain de FMC provenant de protocoles étendus dans l'espace (plusieurs sites échantillonnés à l'intérieur d'un pixel à basse résolution) ;
- d'images satellitaires spectralement améliorées pour pouvoir discriminer les bandes d'absorption de l'eau (produits élaborés journaliers et de synthèse).

Ce travail reste une démarche prospective de recherche, ayant pour but de percevoir par un capteur satellitaire le processus physiologique de stress hydrique des plantes.

Le besoin des utilisateurs consiste en une prévision du risque inférieure à la semaine. Dans le *chapitre 2* de la thèse, nous avons également précisé l'échelle temporelle de variation de l'état hydrique des plantes inférieure à 8 jours.

Les produits satellitaires utilisés, dans la majorité des cas, ne répondent pas au besoin de l'utilisateur. Les meilleurs produits sur le marché sont des produits de synthèses, à 9 jours pour AVHRR, à 10 jours pour VEGETATION et à 8 ou 16 jours pour MODIS. Ces produits dépendent de l'orbite du satellite. Plus le délai est long, plus on a de chance d'obtenir pour chaque pixel de l'image une valeur de réflectance « propre », sans nuage ou perturbation de l'atmosphère. Les problèmes liés au rayonnement bidirectionnel sont également minimisés par l'intermédiaire de visées multiangulaires et de modèles de correction plus ou moins complexes.

Notre travail met en exergue l'évolution constante des produits utilisés. Ainsi au cours de l'étude, les produits S10 de VEGETATION ont été améliorés en D10, les produits MODIS encore provisoires (niveau 3) ont été validés (niveau 4), les modèles de correction ont évolué au gré des résultats de recherche. Il est important de garder une veille technologique.

Aujourd'hui, la principale limite du capteur AVHRR est sa faible résolution spatiale, notamment en bord de fauchée (pixel > 13 km²), rendant difficile le géoréférencement et le rééchantillonnage de l'image en une grille de 1x1 km². En revanche, dans la mesure où nous disposons d'une station de réception, il est aisé de calculer des indices moyens (NDVI, NDVI/TS) à 9 jours et de corriger les problèmes d'atmosphère et de BRDF.

Concernant le capteur VEGETATION, sa principale limite réside dans l'absence de bandes thermiques et par la longue périodicité de son orbite (26 jours). Dans la mesure où le nouveau SPOT 5 est doté du même capteur VGT, il semble intéressant d'utiliser les deux capteurs VGT1 et 2 pour calculer des données de synthèse inférieure au produit proposé à 10 jours, soit en améliorant les traitements radiométriques du produit D10, soit en proposant un produit de qualité équivalente mais de synthèse à 5 jours seulement.

Enfin, le capteur MODIS peut devenir un réel outil de prévention. Sa richesse spectrale et sa résolution spatiale sont meilleures que les précédents. Un NDVI quotidien à 250 mètres est disponible pour l'ensemble du globe. Les données de synthèse proposées (à 8 et 16 jours) ne sont pas encore suffisamment traitées et corrigées des effets de l'atmosphère et de la BRDF. Il est nécessaire de proposer de nouveaux produits, comme dans le cas de VGT, en combinant les deux capteurs MODIS des plate-formes TERRA et AQUA. On peut penser que la NASA développe dans un futur proche de nouveaux produits de synthèse à 4 jours.

CHAPITRE 6

DISCUSSION GÉNÉRALE : CONTRIBUTIONS PRATIQUES ET THÉORIQUES

« Toute solution d'un problème est un problème nouveau »
Johann Wolfgang von Goethe, écrivain (1749-1832)

1. DISCUSSION DES RÉSULTATS

1.1. PROTOCOLE DE TERRAIN OPTIMISÉ

Il ressort des tests de terrain une série de conseils sur les protocoles d'échantillonnage. Il est par exemple primordial de réaliser les prélèvements au **maximum du stress hydrique de la journée** (aux alentours de 15 h) puisque le contenu en eau des feuilles des plantes varie de manière importante au cours d'une journée. Les prélèvements doivent également être représentatifs du peuplement ; il est donc nécessaire de les réaliser sur un **nombre d'individus suffisants** (> 30) pour pouvoir calculer une moyenne et un écart-type significatifs.

Le suivi de plusieurs sites pendant les étés 2001, 2002 et 2003 met en évidence un délai de réponse de la végétation après un épisode pluvieux. La hausse de l'état hydrique des feuilles est observée après 5 ou 6 jours en moyenne et dans les deux tiers des cas ce délai est inférieur à 8 jours. En conséquence, à la fois l'état hydrique de la végétation (indice FMC) et les cartes de risque météorologique d'incendie (indice IFM) doivent être calculés à une **fréquence au moins hebdomadaire**.

1.2. IMPORTANCE DU MOYEN INFRAROUGE RÉFLECTIF

Les mesures radiométriques de laboratoire, sur matériel vivant et sec (*chapitre 3*), ont permis de confirmer l'intérêt du domaine spectral du moyen infrarouge réflectif (1200-2500 nm) pour prédire la teneur en eau des feuilles. Ainsi, le niveau hydrique des plantes est prédictible en conditions de laboratoire à partir de mesures spectroradiométriques quelle que soit l'espèce. Malgré le changement disproportionné d'échelle (passage d'une feuille à un pixel satellitaire), nous utilisons les mesures spectrales de l'état hydrique des feuilles (indice EWT) pour simuler les bandes spectrales de capteurs satellitaires. Les résultats montrent que les capteurs ETM+, VEGETATION, MODIS et surtout MERIS ont une réelle potentialité pour suivre le contenu en eau de la végétation.

1.3. ESTIMATION DE L'ÉTAT HYDRIQUE PAR TÉLÉDÉTECTION

Les données à haute résolution de SPOT-HRVIR ont permis de cartographier la variation de l'état hydrique sur un site spécifique proche de Montpellier. En revanche, la comparaison des valeurs de réflectance aux mesures de FMC de terrain s'est révélée difficile. Le meilleur modèle obtenu est basé sur les données des deux mois de sécheresse de l'été 2001 et combine linéairement les quatre bandes du capteur (r^2 de 78% pour 18 pixels seulement).

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent (test de modèles de transfert radiatif), l'état hydrique de la végétation n'est pas la seule variable influençant le rayonnement et dans le cas de données à haute résolution, il sera aussi important d'améliorer le traitement des images (correction des effets de l'atmosphère et de BRDF).

Les résultats issus du traitement des images à basse résolution sont hétérogènes et peu concluants. Plusieurs raisons en sont la cause. Tout d'abord, ces données satellitaires (les seules potentiellement utiles par leur couverture journalière) sont affectées d'altérations radiométriques causées par l'atmosphère et par la variation de leur angle d'observation. Ces altérations sont théoriquement corrigées dans les chaînes de traitement mises en place pour les nouveaux capteurs disponibles, VEGETATION et MODIS. Malheureusement, nous avons découvert que les produits disponibles au moment de l'étude n'étaient pas complètement corrigés de ces altérations. La situation est actuellement en train de changer : les produits MODIS de niveau 4 sont maintenant disponibles et s'avèrent de meilleure qualité. D'autre part, un contact récent avec le CNES, responsable du programme VEGETATION, a conduit à mettre sur pied un partenariat visant à retraiter les données des années 2001 à 2005.

Ce travail reste une démarche prospective de recherche. Ainsi nous avons pu mettre en évidence les limites actuelles des trois capteurs pour décrire le processus physiologique de stress hydrique des plantes pendant l'été.

2. DISCUSSION DES MÉTHODES

2.1. NOTION D'ÉCHELLES D'OBSERVATION

La mesure de l'état hydrique de la végétation est aléatoire et son estimation est réalisée à la fois par des méthodes directes et indirectes. Le principal problème réside dans la double association des **échelles spatiales et temporelles** ainsi que dans l'**échelle d'observation** à laquelle on se place.

Une plante, de surcroît sclérophylle, base son cycle phénologique principalement sur la disponibilité en eau. Celle-ci dépend directement des précipitations et de la capacité de réserve des sols. En conditions méditerranéennes, tout est fait au niveau physiologique pour optimiser la croissance malgré les fortes sécheresses. Ainsi, la plante ralentit ou suspend sa croissance en été, et croît principalement au printemps et en automne, périodes où les précipitations se concentrent. Elle peut aussi croître en hiver (caractère sempervirent) lorsque la température dépasse 5°C.

Au niveau du comportement hydrique, la différence entre individus est significative et lors des protocoles spatiaux développés (*chapitre 2*), nous remarquons l'absence de réelle échelle spatiale de variation de l'indice FMC pour les quatre espèces suivies. L'hétérogénéité spatiale de l'état hydrique de la végétation est aussi importante que l'amplitude annuelle. Il est donc indispensable de calculer à chaque prélèvement un état hydrique correspondant à l'humidité moyenne de plusieurs individus. Il faut remarquer que les contraintes temporelles de collecte d'échantillons sur le terrain (créneau temporel étroit autour du passage du satellite, temps de transfert entre différents sites à prélever, temps de déplacement sur l'emprise au sol d'un pixel basse résolution (environ 1x1 km²), temps de collecte et de pesée) conduisent souvent à un prélèvement d'un nombre d'échantillons inférieur à l'idéal, qui peut engendrer la production d'une référence de terrain non entièrement conforme à la vérité de terrain.

De ce fait, si l'on considère des données de télédétection issues de synthèses à 8, 9, 10 ou même 16 jours (capteurs AVHRR, VEGETATION ou MODIS), **il est impossible de connaître avec précision l'état hydrique du pixel correspondant**. Au niveau spatial, il est rare de disposer d'une végétation homogène à l'échelle du kilomètre et encore plus rare de connaître l'état hydrique moyen de la végétation du pixel. Au niveau temporel, la variabilité du contenu en eau de la végétation reste inférieure à la semaine. En toute rigueur, on ne peut donc pas comparer deux choses très différentes.

L'amélioration du système passe par le choix de données de meilleures résolutions spatio-temporelles en adéquation avec le paramètre suivi, à savoir une image satellitaire tous les 4 ou 5 jours d'une résolution inférieure à 500 mètres. Malheureusement ces produits n'existent pas encore.

2.2. NOTION DE RÉOLUTIONS

2.2.1. RÉSOLUTION SPATIALE

Nous avons abordé dans cette thèse la notion de résolution spatiale de façon succincte. Grâce au développement et à l'utilisation d'un drone télécommandé à distance (drone Pixy®), nous avons réalisé une carte précise de l'occupation du sol d'un site expérimental, permettant de préciser par la suite la résolution réelle d'un pixel SPOT-HRVIR. D'une résolution initiale de 400 m² (20 x 20 m), l'étude met en évidence la prise en compte d'une zone d'environ 1000 m² dans le cas de couvert homogène et largement supérieure pour un couvert hétérogène.

L'opération peut être extrapolée aux images à basse résolution pour lesquelles la résolution initiale correspond souvent à un rééchantillonnage grossier. Ainsi, les produits NOAA (synthèse 9 jours), VEGETATION (synthèse 10 jours) ou MODIS (synthèse 16 jours) sont livrés initialement avec la même résolution spatiale de 1 km² pour chaque pixel. La résolution réelle est très différente, notamment pour le capteur NOAA : mauvaise localisation, résolution des pixels en bord de fauchée de 15 km² ! A cette échelle, aucun pixel n'est donc composé d'un couvert végétal homogène.

2.2.2. RÉSOLUTION TEMPORELLE

Nous ne revenons pas sur la discussion exposée précédemment, à savoir l'observation d'un paramètre biologique d'une variabilité inférieure à la semaine à partir de données satellitaires calculées pour des synthèses supérieures à la semaine !

Il est indispensable d'améliorer le traitement des images journalières de capteurs à basse résolution, voire d'associer plusieurs capteurs identiques présents sur des satellites différents (AVHRR 14 et 16, VGT 1 et 2, MODIS 1 et 2) pour proposer des résolutions temporelles équivalentes au comportement hydrique de la végétation.

2.2.3. RÉSOLUTION SPECTRALE

Même si nous disposons d'images hebdomadaires d'un même lieu avec une résolution spatiale améliorée, il semble désormais indispensable de bénéficier de bandes spectrales dans le domaine du moyen infrarouge pour suivre avec précision l'évolution du contenu en eau des couverts végétaux. Dans cette thèse, les meilleurs résultats obtenus avec les images satellitaires associent le plus souvent des indices basés sur le MIR (indice NDII, GVMI...). De la même manière, les expériences de spectroscopie mettent en évidence cette zone du spectre comme étant la plus sensible aux variations d'humidité des feuilles. Les technologies des années 1980 ne permettaient pas d'embarquer des capteurs moyen infrarouge sur les satellites car ils étaient trop volumineux et d'un rapport signal/bruit trop faible. Aujourd'hui, après les premiers dispositifs Landsat ETM+ et SPOT-VEGETATION, il semble que le MIR réflectif fasse l'unanimité. Nous pouvons donc espérer que les futurs capteurs seront dotés de bandes MIR.

3. PERSPECTIVES

3.1. VERS UN SYSTÈME OPÉRATIONNEL INTÉGRÉ

3.1.1. LE SYSTÈME EXISTANT

Actuellement, le système français de prévention du risque d'incendie de forêt est basé sur trois indications issues des services de Météo-France, de l'INRA et de l'ONF, avec :

- une prévision biquotidienne du risque réalisée par Météo-France, pour des sous-bassins d'environ 700 km², basée sur le suivi de paramètres météorologiques au niveau de stations automatiques ;
- une mesure bihebdomadaire du niveau d'inflammabilité de la bruyère arborescente (ou de l'arbousier en période très sèche) réalisée par l'INRA du domaine du Ruscas (massif des Maures) sur une zone de prélèvement inférieure à un hectare ;
- une mesure hebdomadaire de l'état hydrique des feuilles de la végétation méditerranéenne réalisée par l'ONF, au niveau d'un réseau de 30 sites et pour un total de 20 espèces différentes.

Chaque information est centralisée au Centre Opérationnel de Zone (COZ) pour une redistribution aux services départementaux des SDIS-CODIS lesquels déploient et guident les patrouilles (prévention et intervention).

A l'heure actuelle, toutes les informations sont issues de **mesures ponctuelles** et leur extrapolation à l'ensemble du territoire est discutable.

3.1.2. INTÉGRATION DE LA TÉLÉ DÉTECTION

La télédétection peut être un outil de choix pour fournir au COZ une image dynamique des paramètres physiologiques des massifs forestiers entiers avec une résolution améliorée de l'ordre du kilomètre carré.

Certes, il n'est pas toujours possible de relier simplement le signal mesuré par le capteur satellitaire à un contenu en eau du feuillage quelles que soient les conditions de couvert. Néanmoins, l'amélioration récente des capteurs et surtout des traitements doit permettre dans un avenir proche (été 2005) de disposer de cartes hebdomadaires de stress hydrique de la végétation.

Avant même de se lancer dans l'ajustement des différents modèles (modèle d'architecture du couvert, modèle de transfert radiatif, modèle de correction des effets de l'atmosphère, de BRDF...), nous pensons qu'il est important de travailler sur les données historiques déjà archivées. Par exemple, chaque été l'INRA compare les indices obtenus (inflammabilité, réserve en eau du sol...) aux données historiques acquises depuis l'été 1989. De la même façon, pendant la canicule record de 2003, l'ONF a rajouté aux mesures initiales de l'indice FMC, les valeurs minimales observées pour chaque site depuis le début du réseau en 1994.

Il nous semble donc essentiel d'appliquer dans un premier temps la même démarche aux images satellitaires. Les deux derniers étés sont très représentatifs des valeurs extrêmes d'état hydrique observées sur le terrain (été 2002 très humide et été 2003 exceptionnellement sec). Les données satellitaires, comme les données du capteur MODIS représentées sur la Figure 103, confirment ces observations.

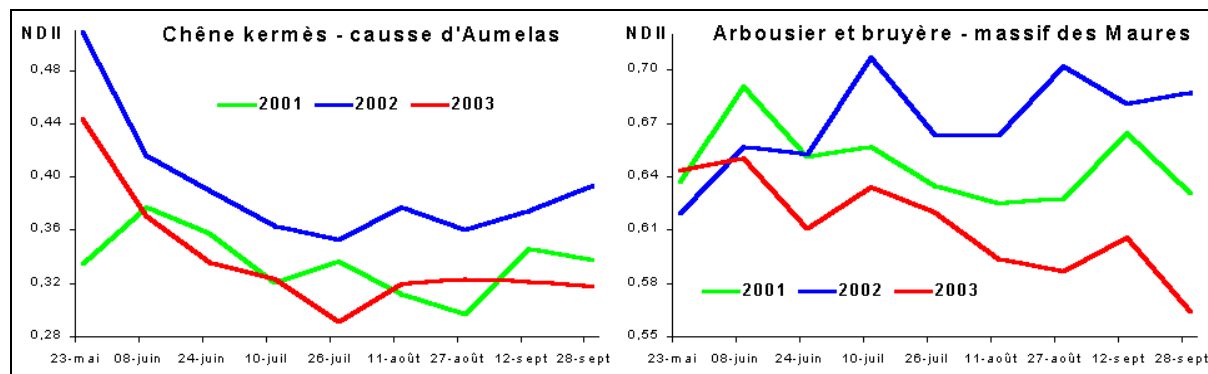


Figure 103. Évolution de l'indice satellitaire NDII, calculé à partir des bandes PIR et MIR3 du produit MOD43B de MODIS (synthèse à 16 jours), pendant les étés 2001, 2002 et 2003 pour deux pixels

Pour le sud-est de la France, les données MODIS sont disponibles depuis l'été 2000 et les données VEGETATION depuis l'été 1998. Un prochain travail consisterait à constituer une **base de données des valeurs extrêmes** (de réflectances et d'indices satellitaires) pour chaque pixel de l'image. En conséquence, chaque été en période de risque d'incendie, on peut imaginer une chaîne opérationnelle de traitements transformant pour chaque nouvelle image les valeurs des pixels en classes de risque, au regard des valeurs extrêmes historiques déjà observées. Une attention particulière devra être portée en début de campagne pour écarter les artéfacts dus notamment à une modification de l'occupation du sol d'un pixel entre deux étés (zone de forêt transformée en zone urbaine par exemple).

3.1.3. AMÉLIORATION DU DÉCOUPAGE DU RISQUE MÉTÉOROLOGIQUE

Actuellement, les indices de risque météorologique calculés par Météo-France (*IFM, IS, IH, ICL...*) nécessitent la mesure de nombreux paramètres climatiques disponibles pour un nombre restreint de stations. Le découpage engendré correspond à des zones moyennes de 700 km² trop grandes pour être représentatives de la variabilité spatiale de la végétation.

Nous nous sommes placés dans le cas particulier d'une station météo proche d'un site de prélèvement pour évaluer la qualité des indices et leur liaison avec le contenu en eau des plantes (*chapitre 2*). Cette expérience a mis en évidence l'intérêt de l'**indice IS (Indice de Sécheresse)** par rapport aux autres indices de risque. Celui-ci est facile à calculer au jour le jour car il ne dépend que de deux paramètres : la température de l'air et la pluie du jour précédent.

En France, le maillage des stations météorologiques mesurant les deux paramètres du calcul de l'indice *IS* (températures et précipitations) est bien plus fin que le découpage actuellement proposé par Météo-France de 700 km². On pourrait donc facilement réaliser une carte de l'indice *IS* avec un meilleur découpage.

3.1.4. UN SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION

Il faut d'abord disposer d'une carte d'occupation du sol à jour, par exemple issue des données de l'IFN et de l'IGN, pour se focaliser sur les zones uniquement boisées. Avec le développement récent des outils de cartographie et des systèmes d'information géographique (SIG), nous pouvons proposer de représenter sur une carte l'état hydrique de la végétation à partir de plusieurs sources de données (Tableau 76).

Tableau 76. Intégration de plusieurs sources d'information pour cartographier l'état hydrique de la végétation

Source	Contenu	Échelle	Mise à jour
Météo-France	variation de l'indice IS calculé à partir des stations mesurant la température de l'air et le cumul de pluies	selon densité du réseau	24 h
ONF	état hydrique de la végétation en classes de risque (mesures de terrain comparées aux amplitudes de variation historiques de chaque site et espèce)	30 sites	3 à 7 jours
INRA	inflammabilité de la bruyère arborescente en classes de risque (mesures comparées aux données d'archive)	1 site	3 à 7 jours
CNES	état hydrique estimé à partir d'indices satellitaires dérivés de SPOT-VEGETATION	pixel de 1 km ²	5 jours

Ce SIG permettrait d'organiser les données au sein d'une même carte du niveau hydrique de la végétation, simple à utiliser par tous. Toutefois, cette carte ne serait qu'une partie de l'information nécessaire au système de gestion du risque d'incendie. On peut aussi intégrer d'autres indices de risque météo, comme ceux faisant intervenir le vent, qui est un facteur aggravant lors de grands feux.

3.2. LA TÉLÉDÉTECTION ET LES PROJETS FUTURS

3.2.1. LA VÉGÉTATION ET LES ANCIENS CAPTEURS

La cartographie de l'occupation des sols est une application ancienne de la télédétection aux échelles du 1/50.000^{ème} (SPOT, LANDSAT). Les limites actuelles résident essentiellement dans la difficulté d'automatiser ces méthodes et les coûts associés à la couverture de grandes superficies limitent la fréquence des mises à jour (ex : *CORINE Land Cover* de l'année 2000 toujours en cours en 2004). Les flux d'eau et de carbone dépendent non seulement de la nature du couvert végétal mais également de l'évolution saisonnière des processus de photosynthèse et de transpiration. Ces derniers n'étant pas directement accessibles par télédétection, les travaux ont porté sur des variables intermédiaires comme l'indice foliaire LAI, la biomasse, le taux de couvert ou le contenu en chlorophylle. Les instruments spatiaux susceptibles d'effectuer le suivi saisonnier du couvert végétal sont d'une part les capteurs à haute résolution spatiale et d'autre part les capteurs « grand champ ». Les données de type Landsat-ETM+, SPOT-HRVIR et leurs successeurs offrent une résolution spatiale satisfaisante pour la plupart des études mais leur faible répétitivité temporelle, encore réduite par la nébulosité et les conflits de programmation, limite leur capacité d'identification et de suivi des processus dynamiques comme la phénologie de la végétation.

Le faible nombre de bandes spectrales réduit les possibilités de caractériser l'atmosphère et donc de corriger ses perturbations sur le signal. Le nombre de paramètres de surface qu'il est possible d'inverser est également restreint.

Les mesures des capteurs « grand champ » (AVHRR, VEGETATION, METEOSAT, GOES...) offrent une fréquence d'acquisition infra-journalière et une résolution spatiale kilométrique qui paraissent adaptées aux évolutions de la surface ainsi qu'à l'étude des cycles de l'eau et du carbone aux échelles continentales et globales. Cependant, la haute répétitivité des capteurs « grand champ » est difficilement mise à profit car leur faible résolution spatiale conduit à intégrer des surfaces hétérogènes et interdit le plus souvent d'attribuer une évolution à un écosystème précis.

Des méthodes, dites de *spectral-unmixing*, ont été développées pour tirer parti de la haute résolution spatiale offerte par HRVIR et ETM+ et de la répétitivité de AVHRR, VEGETATION ou MODIS. La précision atteinte par ces méthodes en dehors des zones de grandes cultures reste à évaluer. En outre, leur mise en œuvre suppose un apprentissage et un investissement en temps non négligeables qui freinent leur utilisation en dehors des communautés de spécialistes de la télédétection. De manière générale, la difficulté d'appropriation des techniques de télédétection par les thématiciens, comme les hydrologues, est probablement un frein important à leur utilisation.

A chaque lancement de satellite, les capteurs se dotent de meilleures définitions et de nouvelles bandes spectrales notamment dans le moyen infrarouge réflectif (1200-2200 nm). Leur intérêt réside aujourd'hui dans l'important historique des images archivées (AVHRR, Landsat...). Depuis le lancement en mai 2002 du second capteur VEGETATION, des améliorations sont désormais attendues.

3.2.2. LE CAPTEUR VEGETATION DE SPOT

Un récent contact avec le CNES de Toulouse (Olivier Hagolle et Patrice Henry au dépt. OT/QTIS) a permis de vérifier que des améliorations sont prévues sur les produits VEGETATION. Les responsables « qualité » nous informent de la faible utilisation des produits (nous fûmes les seuls utilisateurs français des synthèses à 10 jours en 2002) et de la qualité moyenne des images. Fort de ce constat, le CNES souhaite développer des produits améliorés en réponse aux besoins des utilisateurs. Pour ce faire, il veut créer de nouveaux contacts avec des utilisateurs potentiels visant à valider les nouveaux traitements. La discussion a conduit à mettre sur pied fin 2003 un partenariat au sein du **projet Forest Focus**, en collaboration avec l'INRA et l'ONF, confiant au CNES la responsabilité de fournir des produits améliorés et au Cemagref de les valider.

Les améliorations envisagées portent sur la qualité intrinsèque des images (détection des nuages par plusieurs seuillages, corrections atmosphériques) et sur la génération de **produits de synthèse à 5 jours** par l'utilisation conjointe des deux capteurs VGT et par la modification du modèle initial de BRDF de Roujean *et al.* (1992).

Le projet se décomposera en trois phases :

- la validation des nouveaux indices à travers des sites-test pendant les étés 2004 et 2005,
- la collecte et le retraitement des images d'archives (2001 à 2004),
- l'analyse comparative locale sur plusieurs années des indices satellitaires pour chaque pixel ainsi que la création de classes de risque et de cartes.

Ce travail doit évaluer la faisabilité d'un système opérationnel de cartographie de l'état hydrique de la végétation par satellite pour une amélioration des systèmes de prévention actuels.

3.2.3. LES AMÉLIORATIONS DE MODIS

Les produits proposés par la NASA pour le capteur MODIS sont en constante évolution. Dans le cadre de cette thèse, nous avons pu suivre les différentes étapes, des premières images en 2000 aux produits de qualité de niveau 2, 3 puis 4. Il est ainsi primordial de garder une veille technologique active, dans la mesure où chaque trimestre de nouvelles chaînes de traitements sont mises au point et de nouveaux produits sont proposés.

L'avenir de ce capteur réside surtout dans ses capacités à mesurer la réflectance dans le *Rouge* et le *Proche infrarouge* à une résolution spatiale de 250 mètres au nadir. MODIS est présent sur deux satellites ; un même lieu peut donc être observé quatre fois par période de 24 heures. La combinaison des deux images diurnes permet de disposer pour un même pixel de deux angles de visée différents. En l'absence de couverture nuageuse, on peut améliorer les corrections des effets de BRDF et proposer ainsi des synthèses de qualité pour des périodes inférieures à l'orbite de 16 jours du satellite.

3.2.4. LES CAPTEURS EN PROJET

Les satellites d'observation de la Terre en orbite autour de la planète proviennent de choix technologiques effectués il y a 10 à 15 ans. Ce sont souvent de grosses plates-formes (NOAA, SPOT, TERRA...) et les capteurs doivent répondre aux besoins du plus grand nombre d'utilisateurs. Nous assistons alors à un compromis technologique, qui résulte en la fourniture de données non optimales pour telle ou telle application, comme pour la prévention des incendies de forêt.

Le nouveau capteur MERIS sur le satellite ENVISAT, lancé en janvier 2002, fait aussi partie de cette ancienne génération de macro-satellites à vocation généraliste. Alors que les premières images furent disponibles en 2003, leur atout pour nos applications reste limité : absence de bandes spectrales dans le *Moyen infrarouge* et dans l'*Infrarouge thermique*. Leur intérêt réside surtout dans la résolution spatiale améliorée (350 mètres au nadir) et la précision spectrale des bandes (15 bandes de 410 à 900 nm).

De nos jours, les mentalités ont beaucoup évolué et les nouveaux projets sont basés sur des micro-satellites : masse, coût et consommation faibles, peu de capteurs mais adaptés à un besoin précis, avec une durée de vie de quelques années.

3.2.4.1. LE PROJET RHEA

Rhéal est un projet de satellite scientifique d'observation de la Terre proposé initialement par le CNES en 1998. La charge utile est constituée d'un capteur superspectral embarqué sur un micro-satellite en orbite héliosynchrone. L'objectif du satellite *Rhéal* est de fournir, sur un ensemble de sites, des mesures adaptées au suivi des écosystèmes naturels et cultivés, à la modélisation de la productivité végétale, aux bilans d'eau et de carbone ainsi qu'à l'étude du transfert d'échelles.

Il doit permettre de réaliser une image de synthèse hebdomadaire, au moyen d'une répétitivité journalière, avec une résolution comprise entre 10 et 20 mètres pour 8 bandes spectrales. Les domaines spectraux potentiellement intéressants comme le thermique ou les micro-ondes ont été écartés pour des raisons de maturité technique insuffisante et d'incompatibilité de poids pour un micro-satellite. Les données acquises serviront à la mise au point et à la validation de méthodes originales d'inversion et d'assimilation de données ; le développement de ces méthodes est actuellement limité par la disponibilité de données adaptées. *Rhéal* essaiera de fournir des données dont la complexité est en cohérence avec l'état de développement actuel et à moyen terme des modèles de fonctionnement de la surface.

Le responsable du projet, Gérard Dedieu du CNES, nous informe en février 2004 de l'avancée du dossier *Rhéal*. Après plusieurs étapes en 1998 et 2001, les résultats de l'étude de faisabilité (phase 0) seront enfin connus en mai 2004. Si le projet final est accepté, le lancement du satellite est prévu fin 2008.

3.2.4.2. LE PROJET SPECTRA

Les objectifs de mission de *Spectra* sont proches de ceux de *Rhéal*. La résolution spatiale visée est de l'ordre de 25 mètres au nadir, pour une fauchée de 50 km et une fréquence de revisite d'un même lieu de trois jours. Le satellite *Spectra* prévoit d'acquérir des données sur 50 à 100 sites répartis sur le globe. Le spectroradiomètre embarqué peut effectuer des mesures dans 190 bandes spectrales (de 450 à 2350 nm), ainsi que dans deux bandes thermiques (de 8,1 à 12,2 μm). Le dépointage latéral est de 35° et il est prévu d'acquérir sept angles de visée le long de la trace (entre 0 et 70°). Dans l'hypothèse où la mission *Spectra* serait retenue, il est raisonnable de penser que son lancement interviendrait au plus tôt en 2011, soit trois ans après *Rhéal*. *Rhéal* jouerait alors un rôle de précurseur en permettant de tester les algorithmes d'inversion de variables comme la teneur en chlorophylle ou l'indice foliaire. De par sa complexité et les délais qui seront nécessaires au développement des produits élaborés, la mission *Spectra* nous paraît destinée davantage à la communauté des télédéTECTEURS qu'aux réels thématiciens.

3.2.4.3. AUTRES PROJETS

A court terme, le CNES projette de modifier l'orbite du satellite SPOT 2. En effet, SPOT 4 et 5 assurent la plupart des missions et SPOT 2 est en fin de vie. Les chercheurs souhaitent redescendre l'altitude du satellite pour permettre une répétitivité des images de deux jours seulement. L'objectif est de fournir aux chercheurs une image hebdomadaire propre (sans nuage, corrections des radiométries et de la géométrie...) sur des sites choisis (une quinzaine au moins). Les disponibilités couvriraient une partie de l'année 2005 avant une désintégration du satellite dans l'atmosphère.

Le CNES et l'Agence Spatiale Européenne, dans le cadre du programme européen GMES (*Global Monitoring of Environment and Security*), prévoient de lancer en 2010 une constellation de micro-satellites pour disposer tous les deux jours d'une image du globe d'une résolution de 10 mètres, pour des bandes spectrales allant du visible au moyen infrarouge (400 à 2200 nm).

3.2.5. LA GESTION MONDIALE DES CATASTROPHES

3.2.5.1. ESTIMATION DES BESOINS

Au niveau mondial, face à une catastrophe naturelle (feu de forêt, inondation, tempête, sécheresse, tremblement de terre, éruption volcanique...) ou humaine (marée noire, naufrage...) les états des Nations Unies ont manifesté le besoin d'informations cartographiques spatio-temporelles. Le Comité des satellites d'observation de la Terre CEOS (*Committee on Earth Observation Satellites*) propose d'améliorer l'échange et le partage des données satellitaires lors de catastrophes.

Ainsi, par l'intermédiaire du groupe de gestion des catastrophes DMSG (*Disaster Management Support Group*), les agences spatiales de la NOAA-NESDIS et l'Agence Spatiale Européenne ESA (*European Space Agency*) ont proposé fin 2002 leur contribution et leurs services au consortium (CEOS, 2002).

Par exemple, l'ESA réalise chaque année la carte mondiale des feux à l'aide des capteurs ATSR (*Along Track Scanning Radiometer*) et AVHRR. Concernant l'estimation des dégâts, l'agence fournit aux services de protection civile italiens des cartes de zones brûlées. Les capteurs radars permettent également de localiser en continu la déforestation des zones tropicales.

La NOAA utilise l'indice VHI (*Vegetation Health Index*) pour prévenir les sécheresses et cartographier les dynamiques spatio-temporelles.

Concernant les feux de forêt et la prédiction des conditions hydriques du combustible, la NOAA-NESDIS nous informe de l'absence de solutions actuelles et de leur attente quant aux nouvelles missions : le capteur VIIRS (*Visible-Infrared Imager-Radiometer Suite*) en 2006, les capteurs ABI (*Advanced Baseline Imager*) et ABS (*Advanced Baseline Sounder*) en 2010.

3.2.5.2. LE PROJET DISASTER MONITORING CONSTELLATION DMC

Le projet DMC fut initié en 1996 par le laboratoire anglais du SSTL *Surrey Small Satellite Technology* (Sweeting et Chen Fang-yu, 1996). Ce système est basé sur une constellation de sept satellites (*Tableau 77*) de faible masse (90 kg), d'orbite héliosynchrone et polaire à 686 km d'altitude (SSTL, 2002).

Tableau 77. Caractéristiques de la constellation

Satellite	Pays	Lancement
AISAT-1	Algérie	28 novembre 2002
NigeriaSat-1	Nigeria	27 septembre 2003
BILSAT-1	Turquie	
UK-DMC	Royaume-Uni	
DMC+5	Chine	Prévu début 2005
DMC+6	Vietnam	Prévu fin 2005
ThaiPaht-2	Thaïlande	Prévu fin 2005

L'objectif est de disposer, pour n'importe quel lieu du globe, d'**une image quotidienne, de 600 x 600 km² et d'une résolution de 32 mètres**. Le capteur dispose de trois bandes spectrales (Vert, Rouge et Proche infrarouge) basées sur le capteur TM de LANDSAT. La durée de vie de chaque satellite est d'environ 5 ans et le coût de la mission est limité (40 millions de dollars). Les premières images issues de AISAT-1 sont très prometteuses (Da Silva Curiel *et al.*, 2003) et les quatre premiers satellites devraient être opérationnels dès l'été 2004.

Les projets et les idées ne manquent donc pas en matière de télédétection. Selon moi, il est enfin temps de développer des partenariats entre les utilisateurs de terrain (sapeurs-pompiers, forestiers, collectivités locales) et le monde de la télédétection (chercheurs et développeurs de capteurs) pour proposer dans un futur proche des cartes thématiques de risque d'incendie, réellement accessibles au plus grand nombre.

4. CONCLUSION

Nous avons entrepris un travail de recherche finalisée sur la prévention des incendies de forêt. Il faut toujours garder à l'esprit que les départs de feu en conditions européennes sont essentiellement d'origine humaine. Les grands feux couvrant des milliers d'hectares combinent toujours plusieurs facteurs (sécheresse extrême, biomasse importante, vent fort...). Parmi ces derniers, l'état hydrique de la végétation joue un rôle majeur dans l'aléa d'éclosion et de propagation du feu. Nous proposons alors d'utiliser la télédétection satellitaire pour spatialiser la teneur en eau des plantes (*chapitre 1*).

Pour atteindre cet objectif, nous avons mis en place un dispositif expérimental de terrain pour mesurer directement la teneur en eau de la végétation à différentes échelles (*chapitre 2*), ce qui a permis d'identifier les protocoles d'échantillonnage adéquats. Par la suite, cette mesure sert de référence aux estimations indirectes testées. Ainsi, dans un premier temps nous étudions par spectroscopie proche infrarouge le signal perçu à l'échelle de la feuille (*chapitre 3*) et nous montrons l'intérêt de la partie moyen infrarouge du spectre électromagnétique pour prédire l'état hydrique des feuilles. Dans un second temps, nous changeons d'échelle d'observation en évaluant l'état hydrique du peuplement à l'aide d'images satellitaires, à la fois à haute (*chapitre 4*) et basse résolutions spatiales (*chapitre 5*). Les résultats sont hétérogènes, notamment à cause d'un manque de correction des perturbations radiométriques et atmosphériques des images. Nous précisons par la suite (*chapitre 6*) les progrès futurs des produits satellitaires vis à vis de ces perturbations. En France, l'amélioration des données est actuellement abordée dans le cadre d'un nouveau travail initié par le CNES.

La télédétection paraît un outil de choix pour non seulement spatialiser l'état hydrique du combustible (aléas) mais aussi détecter les départs de feu et cartographier les dégâts. Les systèmes de prévention du risque à venir devront intégrer plusieurs sources d'information afin de représenter au mieux la réalité.

BIBLIOGRAPHIE

- 📖 Aguado I., Chuvieco E., Camarasa A., Martin M.P., Camia A., **1998**. Estimation of Meteorological fire danger indices from multitemporal series of NOAA-AVHRR data. In: Viegas D.X. (Ed.), *III International Conference on Forest Fire Research - 14th Conference on Fire and Forest Meteorology*, ADAI, Luso-Coimbra, pp 1131-1147.
- 📖 Albin F.A., **1985**. A model for fire spread in wildland fuels by radiation. *Combust. Set and Tech.*, vol.42, pp.229-259.
- 📖 Alonso M., Camarasa A., Chuvieco E., Kyun I.A., Martin M.P., Salas F.J., **1996**. Estimating temporal dynamics of fuel moisture content of Mediterranean species from NOAA-AVHRR data. *EARSeL Advances in Remote Sensing*, vol.4, n°4, pp.9-21.
- 📖 Andrews P.L., Chase C.H., **1990**. The BEHAVE fire behavior prediction system. *The Compiler*, vol.8, pp.4-9.
- 📖 Arianoutsou M., Ne'eman G., **2000**. Post-fire regeneration of natural *Pinus halepensis* forests in the east Mediterranean Basin, pp.269-289 in Ne'eman G. & Trabaud L. (eds.). *Ecology, biogeography and management of Pinus halepensis and Pinus brutia forest ecosystems in the Mediterranean Basin*. Backhuys Publishers, Leiden.
- 📖 ASD : FieldSpec® FR Portable Spectrometer, **2002**. On line: http://www.asdi.com/asd/prod/fs_fr.html
- 📖 Aussenac, **1995**. Cours de physiologie végétale. Seconde année fondamentale, ESA Purpan, Toulouse.
- 📖 Bachmann A., Allgöwer B., **1999**. The need for a consistent wildfire risk terminology. In: G.E. Gollberg (Editor), *The Joint Fire Science Conference and Workshop*. University of Idaho and International Association of Wildland Fire, Boise, Idaho.
- 📖 Baldini E., Facini O., Nerozzi F., Rossi F., Rotondi A., **1997**. Leaf Characteristics and Optical Properties of Different Woody Species. *Trees*, n°12, pp.73-81
- 📖 Baldy C., Barbero M., Madjidieh H., Quezel P., **1988**. Caractères biophysiques foliaires du modèle sclérophylle en situation de stress hydrique. Le cas du chênevert. Time scales and water stress. *Proceedings of V International Conference on Mediterranean Ecosystems*, pp.267-276.
- 📖 Barnes R.J., Dhanoa M.S., Lister S.J., **1989**. Standard normal variate transformation and detrending of NIR spectra. *Applied Spectroscopy*, vol.43, pp.772-777.
- 📖 Bartholic J.F., Namken L.N. and Wiegand C.L., **1972**. Aerial thermal scanner to determine temperatures of soils and of crop canopies differing in water stress. In *Agronomic Journal*, Vol. 64, pp 603-608.
- 📖 Baudino P., **2000**. Evaluation du Risque Feux de Forêts. *Infos DFCI*, n°44, Cemagref, Aix-en-Provence, pp.1-2
- 📖 Begni G., **1988**. Document de synthèse sur l'étalonnage absolu des données Spot. CNES, Toulouse, France.
- 📖 Bernard M., **2000**. La Prévision des Incendies de Forêt. *Pour la Science*, Paris, n°275, 14 p.
- 📖 Berthelot B., Dedieu G., **1997**. Correction of Atmospheric Effects for VEGETATION Data. *Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*. Rotterdam (Pays-Bas) : A A BALKEMA, pp.19-25. ISBN 90-5410-917-3
- 📖 Bertrand D., **2002**. La spectroscopie proche infrarouge et ses applications dans les industries de l'alimentation animale. *INRA production animale*, vol.15, n°3, pp.209-219.
- 📖 Bidet J., **1996**. L'Analyse du Risque Météorologique en Zone Méditerranéenne. *Infos DFCI*. n°37, Cemagref, Aix-en-Provence, pp.2-3
- 📖 Bidet J., **2000**. Du Nouveau dans l'Analyse Météorologique du Danger d'Incendies. *Infos DFCI*, n°44, Cemagref, Aix-en-Provence, pp.2-3
- 📖 Blackmarr W.H., Flanner W.B., **1968**. Seasonal and diurnal variation in moisture content of six species of Pocosin shrubs. SE-33, Southeastern Forest Experiment Station, U.S. Forest Service, Asheville.
- 📖 Blanchi R., Allgöwer B., Koutsias N., Salas J., Camia A., Chuvieco E., **2002**. Fire risk mapping (I): Methodology, selected examples and evaluation of user requirements (Deliverable D161), Spread Project, 48 p.
- 📖 Bolster K.L., Martin M.E., Aber J.D., **1996**. Determination of carbon fraction and nitrogen concentration in tree foliage by near infrared reflectance: a comparison of statistical methods. *Canadian Journal of Forest Ressources*, vol.26, pp.590-600.
- 📖 Bouchard V., Gillon D., Joffre R., Lefevre J.C., **2003**. Actual litter decomposition rates in salt marshes measured using near-infrared reflectance spectroscopy. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, vol.28, pp.1-15.
- 📖 Bovio G., Quaglino A., Nosenzo A., **1984**. Individuazione di un indice di previsione per il pericolo di incendi boschivi. *Monti e Boschi*. 35, 4: 39-44.
- 📖 Bowman W.D., **1989**. The relationship between leaf water status, gas exchange, and spectral reflectance in cotton leaves. *Remote Sensing of Environment*, vol.30, Elsevier Science Inc., New-York, USA, pp.249-255.
- 📖 Bradshaw L. S., Deeming J.E., Burgan R. E., Cohen J.D., **1983**. The National Fire Danger Rating System: Technical Documentation. USDA General. Technical Report INT-169, p. 41.
- 📖 Braswell B. H., Hagen S. C., Frolking S. E., Salas W. A., **2003**. A multivariable approach for mapping sub-pixel land cover distributions using MISR and MODIS: Application in the Brazilian Amazon region. *Remote Sensing Of Environment*, vol.87, pp.243-256

Bibliographie

- 📖 Broncano M.J., **2000**. Patrones observados y factores que determinan la variabilidad espacio-temporal de la regeneración del pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) después de un incendio. Thèse, Université autonome de Barcelone.
- 📖 Brown J.K., Booth G.D., Simmermann D.G., **1989**. Seasonal change in live fuel moisture of understory plants in western U.S. Aspen. *Proceedings of 10th Conference on Fire and Forest Meteorology*, Ottawa, pp 406-412.
- 📖 Buck C.C., Hugues J.E., **1939**. The solvent distillation method for determining the moisture content of forest litter. *Journal of Forestry*, vol.37, pp.645-651.
- 📖 Buckley A., **1988**. Evaluation of Protimeter Grainmini V., rapport non publié.
- 📖 Burgan R.E., **1996**. Use of remotely sensed data for fire danger estimation. *EARSeL Advances in Remote Sensing*, vol.4, n°4, pp.1-8.
- 📖 Burrows N.D., **1991**. Rapid estimation of the moisture content of dead *Pinus pinaster* needle litter in the field. *Australian forestry*, vol.54, n°3, pp.116-119.
- 📖 Camia A., Bovio G., Aguado I., Stach N., **1999**. Meteorological fire danger indices and remote sensing. *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin* (E. Chuvieco, Ed.), Springer-Verlag, Berlin, pp.39-59.
- 📖 Card D.H., Peterson D.L., Matson P.A., Aber J.D., **1988**. Prediction of leaf chemistry by the use of visible and near-infrared reflectance spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, vol.26, Elsevier Science Inc., New-York, USA, pp.123-147.
- 📖 Carrega P., **1990**. Climatology and index of forest fire hazard in Mediterranean France. *Proceedings of the International Conference on Forest Fire Research*, Coimbra. B.05-1/11.
- 📖 Carter G.A., **1991**. Primary and secondary effects of water content on spectral reflectance of leaves. *American Journal of Botanic*, vol.78, pp.916-924.
- 📖 Casanova J.L., Calle A. and Gonzalez-Alonso F., **1998**. A forest fire risk assessment obtained in real time by means of NOAA satellite images. *Proceedings of III International Conference on Forest Fire Research*, 16/20 November 1998, Vol I, Luso, Portugal, pp 1169-1179.
- 📖 Catchpole EA, Catchpole WR, Viney NR, McCaw WL, Marsden-Smedley JB, **2001**. Estimating fuel response time and predicting fuel moisture content from field data, *International Journal of Wildland Fire*, vol.10, n°2, pp.215-222
- 📖 CCT Centre Canadien de Télédétection, **2002**. Le Spectre Electromagnétique. *Tutoriel de Télédétection : Notions Fondamentales de Télédétection*. Ressources Naturelles Canada. On line, http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tutorials/fundam/chapter1/chapter1_3_f.html
- 📖 Ceccato P., Flasse S., Grégoire J.-M., **2002b**. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 2. Validation and applications, *Remote Sensing of Environment*, vol. 82, Elsevier Science Inc., New-York, USA, pp.198-207.
- 📖 Ceccato P., Flasse S., Tarantola S., Jacquemoud S., Grégoire J.-M., **2001**. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain, *Remote Sensing of Environment*, vol. 77, Elsevier Science Inc., New-York, USA, pp.22-33.
- 📖 Ceccato P., Gobron N., Flasse S., Pinty B., Tarantola S., **2002a**. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1 Theoretical approach, *Remote Sensing of Environment*, vol. 82, Elsevier Science Inc., New-York, USA, pp.188-197.
- 📖 CEOS Committee on Earth Observation Satellites, **2002**. on line: <http://disaster.ceos.org>
- 📖 CERESTA, **1986**. Aide-mémoire pratique des techniques statistiques pour ingénieurs et techniciens supérieurs. *Revue de statistique appliquée*, vol.34, numéro spécial, 2° édition, Lavoisier Tec. & Doc., Paris, 274 p.
- 📖 Champagne CM, Staenz K, Bannari A, McNairn H, Deguise JC, **2003**. Validation of a hyperspectral curve-fitting model for the estimation of plant water content of agricultural canopies. *Remote Sensing of Environment*, vol.87, n°2-3, pp.148-160.
- 📖 Chatto K., **1997**. Techniques of Measuring Fuel Moisture Content : A Review. Appendix 1, technical report on Wiltronics T-H Fine Fuel Moisture Meter, O'Connor, Australia, pp 24-32.
- 📖 Chavez P.S. Jr., **1975**. Atmospheric, solar, and M.T.F. corrections for ERTS digital imagery, *Proceedings of American Society of Photogrammetry Fall Conference*, Phoenix, Arizona, USA, p.69.
- 📖 Chavez P.S., Jr., **1988**. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data, *Remote Sensing of Environment*, Vol.24, pp.459-479.
- 📖 Chavez P.S., Jr., **1989**. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.55, n°9, pp.1285-1294.
- 📖 Chavez P.S., Jr., **1996**. Image-based atmospheric corrections – revisited and revised. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.62, n°9, pp.1025-1036.

- ☞ Chuvieco E, Aguado I, Cocero D, Riano D, **2003**. Design of an empirical index to estimate fuel moisture content from NOAA-AVHRR images in forest fire danger studies. *International Journal of Remote Sensing*, vol.24, n°8, pp.1621-1637
- ☞ Chuvieco E., Deshayes M., Stach N., Cocero D. and Riano D., **1999**. Short-term fire risk: foliage moisture content estimation from satellite data. *Remote sensing of large wildfires in the European Mediterranean Basin*, E. Chuvieco (Ed.), Berlin: Springer (University of Alcala, Spain), pp 17-38.
- ☞ Chuvieco E., Martin P., **1994**. Global Fire Mapping and Fire Danger Estimation Using AVHRR Images. In *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. Vol. 60. N°5. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. New York, pp.563-570
- ☞ Chuvieco E., Riano D., Aguado I., Cocero D., **2002**. Estimation of Fuel Moisture Content from Multitemporal Analysis of LANDSAT Thematic Mapper reflectance Data : Applications in the Fire Danger Assessment. *International Journal of remote Sensing*. Vol. 23. N°11. Taylor & Francis. New York, pp.2145-2162
- ☞ Chuvieco E., Salas F.J., Aguado I., Cocero D., Riano D., **2001**. Estimación del estado hídrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución. *Geofocus (Artículos)*, n° 1, pp.1-16.
- ☞ Clandillon S., Meyer C., Bestault C, Yésou H, Fraipont (de) P., **1999**. SPOT 4 MIR : Evaluation thématique hydrologie / milieux humides. Validation des résultats obtenus sur la plaine d'Alsace au cours des projets pilotes SPOT 4 MIR : Décision d'aide à la Recherche N°794/98/CNES/7378. Rapport final SERTIT, CNES, 57p.
- ☞ Cohen W., **1991a**. Chaparral Vegetation Reflectance and its Potential Utility for Assessment of Fire Hazard. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol.57, n° 2, pp. 203-207.
- ☞ Cohen W.B., **1991b**. Temporal versus spatial variation in leaf reflectance under changing water stress conditions. *International Journal of Remote Sensing*, vol.12, n°9, pp.1865-1876.
- ☞ Coing P., **2002**. Suivi par télédétection basse résolution, de la dynamique temporelle de la teneur en eau de la végétation méditerranéenne, pour la prévention du risque de feu de forêt. Mastère Spécialisé en Sciences Forestières, Engref, Nancy.
- ☞ Colwell J.E., **1974**. Vegetation canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, vol.30, pp.175-183.
- ☞ 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.
- ☞ Crippen R.E., **1990**. Calculating the Vegetation Index Faster, *Remote Sensing of Environment*, vol.34, pp.71-73.
- ☞ Curan P., **1980**. Remote sensing systems for monitoring crops and vegetation. *Progress in Physical Geography*, vol. 4, pp.315-341.
- ☞ Curran P.J., Dungan J.L., Macler B.A., Plummer S.E., Peterson D.L., **1992**. Reflectance spectroscopy of fresh whole leaves for the estimation of chemical concentration. *Remote Sensing of Environment*, vol.39, pp.153-166.
- ☞ Curran P.J., Williamson H.D., **1985**. The accuracy of ground data used in remote-sensing investigations. *International Journal of Remote Sensing*, vol.6, pp.1637-1651.
- ☞ Curran P.J., Williamson H.D., **1986**. Sample size for ground and remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, vol.20, pp.31-41.
- ☞ Da Silva Curiel A., Boland L., Cooksley J., Stephens P., Sun W., Sweeting M., **2003**. First steps in the disaster monitoring constellation. Surrey Space Centre, on line www.sstl.co.uk, 4 p.
- ☞ Danson F.M., Steven M.D., Malthus T.J., Clark J.A., **1992**. High-spectral resolution data for determining leaf water content. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, n°3, pp.461-470.
- ☞ Danson M., Bowyer P., **2003**. Preliminary Sensitivity Analysis and Estimation of FMC From Canopy Reflectance Model Inversion: PROSPECT, SAIL, GEOSAIL, Deliverable D123, Spread Project, 31 p.
- ☞ Datt B, **1999**. Remote sensing of water content in Eucalyptus leaves. *AUSTRALIAN JOURNAL OF BOTANY*, 47 (6): 909-923
- ☞ Dauriac F., Deshayes M., Coing P., **2003**. Fuel Moisture Content Estimation using Terra Modis sensor: a first approach in South-Eastern France. *Proceedings EARSeL (European Association of Remote Sensing Laboratories in Europe) symposium*, Ghent, Belgium, 5-7 June 2003.
- ☞ Dauriac F., Deshayes M., Gillon D., Roger J.-M., **2001**. Suivi de la teneur en eau de la végétation méditerranéenne par télédétection. Application au risque de feu de forêt. Colloque SIRNAT 2001 (Systèmes d'Information pour les Risques NATurels), Sophia Antipolis, 6-7 décembre 2001, 10 p.
- ☞ Dawson T.P., Curran P.J., North P.R.J., Plummer S.E., **1999**. The propagation of foliar biochemical absorption features in forest canopy reflectance: A theoretical analysis. *Remote Sensing of Environment*, vol.67, Elsevier Science Inc., New-York, USA, pp.147-159.
- ☞ Deeming J. E., Burgan R. E., Cohen J. D., **1977**. The National Fire Danger Rating System-1978. USDA Forest Service. General Technical Report INT-39 p. 63.

Bibliographie

- Deering D.W., Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., **1975**. Measuring "for age production" of grazing Units from Landsat MSS data. Proceedings of the 10th international symposium on remote sensing of environment, II, pp.1169-1178.
- Delabrazé P., **1990**. Les Débroussailllements. In Revue Forestière Française. N° spécial : Espaces Forestiers et Incendies. ENGREF. Nancy, pp.124-126
- Desbois N., Deshayes M., Beaudoin A., **1997**. Protocol for fuel moisture content measurements. *A Review of Remote Sensing Methods for the Study of Large Wildland Fires*, Edité par E. Chuvieco (Alcalá de Henares: Département de Géographie, Université d'Alcalá), pp.61-72.
- Deshayes, M., Chuvieco, E., Cocero, D., Karteris, M., Koutsias, N. & Stach, N. **1998**. Evaluation of different NOAA-AVHRR derived indices for fuel moisture content estimation: interest for short term fire risk assessment. III International Conference on Forest Fire Research, 16/20 November 1998, Vol I, Luso, Portugal: 1149-1167. ISBN 972-97973-0-7
- Diday E., **1971**. Une nouvelle méthode en classification automatique et reconnaissance des formes, la méthode des nuées dynamiques. *Revue de Statistique Appliquée*, vol.19, pp.19-33.
- DIREN Languedoc-Roussillon, **2002**. Facteurs Déterminants l'Evolution des Espaces Naturels et Ruraux, Objectifs de l'Etat en Région, Propositions par Type de Territoire Stratégique. Montpellier. On line, <http://www.environnement.gouv.fr/Languedoc-Roussillon/senr/P3.htm>
- Drouet J-C, Sol B, **1993**. Mise au point d'un indice numerique de risque meteorologique d'incendies de forêts. Forêt Méditerranéenne, vol.14, n°2, pp.155-162.
- Duchemin B., **1999**. NOAA/AVHRR Bidirectional reflectance : Modeling and application for the monitoring of a temperate forest. *Remote Sensing of Environment*, 67, 51-67.
- Duchemin B., Maisongrande P., Dedieu G., Leroy M., Roujean J.-L., Bicheron P., Hauteceur O., Lacaze R., **2000**. A 10-days compositing method accounting for bidirectional effects. *Proceedings of the VEGETATION 2000*, Belgirate, Italy (3-6 avril 2000), pp.313-318.
- Duwig C., **1994**. Élément de modélisation de l'interception des pluies par quatre espèces d'arbres de type méditerranéen. Mémoire de DEA de l'Université Joseph Fourier de Grenoble 1, Cemagref, Aix-en-Provence, 65 p.
- Elvidge C.D., Lyon R.J.P., **1985**. Estimation of the vegetation contribution to the 1.65/2.22µm ratio in air-borne thematic-mapper imagery of the Virginia Range, Nevada, *International Journal of Remote Sensing*, vol.6, pp.75-88.
- EUROSEP Instruments, **2001**. Manuel d'instructions de la sphère d'intégration externe LI-1800-12., Cergy St. Christophe.
- FAO, **1999**. Statistiques des Incendies de Forêt. In Bulletin du bois, vol.LII, n° 4. Nations Unies. Genève. On line, <http://www.unece.org/trade/timber/ff-stats/96-98/ff-96-98.pdf>
- FAO, **2000**. On line, <http://www.fao.org/forestry/fo/fra/index.jsp>
- FAO, **2001**. Modification de la Superficie Forestière, 1990-2000. In Situations des Forêts du Monde 2001. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome. Annexe 2 Tab.3
- Faria T., Silverio D., Breia E., Cabral R., Abadia A., Abadia J., Pereira J.S., Chaves M.M., **1998**. Differences in the Response of carbon assimilation to Summer stress (Water Deficits, High Light and Temperature) in Four Mediterranean Tree Species. *Physiologia Plantarum*. vol.102, issue 3, Elsevier Science, Amsterdam, pp.419-428.
- Fensholt R., Sandholt I., **2003**. Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and shortwave infrared data in a semiarid environment. *Remote Sensing Of Environment*, 87, 111-121.
- Ferreira L. G., Yoshioka H., Huete A., Sano E. E., **2003**. Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian Cerrado: An analysis within the Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazônia (LBA). *Remote Sensing Of Environment*, vol.87, pp.534-550.
- Foley W.J., McIlwee A., Lawler I., Aragones L., Woolnough A.P., Berding N., **1998**. Ecological applications of near infrared reflectance spectroscopy - a tool for rapid, cost-effective prediction of the composition of plant and animal tissues and aspects of animal performance. *Oecologia*, vol.116, pp.293-305.
- Fosberg M. A., Rothermel R. C., Andrews P. L., **1981**. Moisture content calculations for 1000-Hour Timelag Fuels. *Forest Sci.*, vol.27, n°1, pp.19-26.
- Fourty T., **1996**. Estimation du contenu biochimique d'un couvert végétal à partir de données haute résolution spectrale acquises au niveau satellitaire. Thèse université P. Sabattier, Toulouse, Francia.
- Fourty T., Baret F., **1998**. On spectral estimates of fresh leaf biochemistry. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 19 (N°7), Taylor & Francis, New York: 1283-1297.
- Friedl M. A., McIver D. K., Hodges J. C. F., Zhang X. Y., Muchoney D., Strahler A. H., Woodcock C. E., Gopal S., Schneider A., Cooper A., Baccini A., Gao F., Schaaf C., **2002**. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing Of Environment*, vol.83, pp.287-302.

1. Gao B.-C., **1996**. NDWI - A normalised difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, vol. 58, Elsevier Science Inc., New-York, USA, pp.257-266.
2. Gao F., Jin Y. F., Li X. W., Schaaf C. B., Strahler A. H., **2002**. Bidirectional NDVI and atmospherically resistant BRDF inversion for vegetation canopy. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, vol.40, n°6, pp.1269-1278.
3. Gao F., Schaaf C. B., Strahler A. H., Jin Y., Li X., **2003**. Detecting vegetation structure using a kernel-based BRDF model. *Remote Sensing Of Environment*, vol.86, pp.198-205
4. Gao X., Huete A. R., Didan K., **2003**. Multisensor comparisons and validation of MODIS vegetation indices at the semiarid Jornada experimental range. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 41 (10), 2368-2381.
5. Gao, F., X. Li, A. Strahler, and C. Schaaf, **1999**. Comparison and validation of the new Li-Transit Kernel, abstract, International Workshop on Multi-angular Measurements and Models (IWMMM-2), Ispra, Italy, 15-17 Sept, 1999.
6. Gates D.M., Keegan H.J. Schleter J.C. and Weidner R., **1965**. Spectral properties of plants, In *Applied Optics*, Vol. 4, pp 11-20.
7. Geladi P., **1995**. An overview of multivariate spectral data analysis. *Davies A.M.C. and Williams P. (eds), Near Infrared spectroscopy: The future waves*. NIR publications, Chichester, UK.
8. Gérard J., Thibaut B., Roda J.M., Fechtal M., Famiri A., **2003**. Value-added utilization of Holm Oak for wood products. IUFRO – All Division 5 Conference, Rotorua, New Zealand, 11-15 March 2003.
9. Giglio L., Descloitres J., Justice C. O., Kaufman Y. J., **2003**. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing Of Environment*, vol.87, pp.273-282.
10. Gillon D., Dauriac F., Deshayes M., Valette J.C. and Moro C., **2002**. Foliage moisture content and spectral characteristics using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *Proceedings of the IV International Conference of Forest Fire Research*, Luso, Coimbra, Portugal, 18-23 November 2002, abstract p.127, text on CD-Rom.
11. Gillon D., Hernando C., Valette J.C., Joffre R., **1997**. Fast estimation of the calorific values of forest fuels by near-infrared reflectance spectroscopy. *Canadian Journal of Forest Ressources*, vol.27, pp.760-765.
12. Gillon D., Joffre R., Dardenne P., **1993**. Predicting the stage of decay of decomposing leaves by near infrared reflectance spectroscopy. In *Canadian Journal of Forest Ressources*, 23: 2552-2559.
13. Gillon D., Joffre R., Ibrahima A., **1999**. Can litter decomposability be predicted by near infrared reflectance spectroscopy ? In *Ecology*, 80 : 175-186.
14. Girard M.C., Girard C., **1999**. *Traitement des Données de Télédétection*. Dunod. Paris.
15. GIS incendies de forêt, **2003**. Indices satellitaires et stress hydrique de la végétation méditerranéenne : du bosquet au pixel. Rapport final, novembre 2003, convention DERF 61.45.11/01, 59 p.+ annexes.
16. Gitelson A.A., Kaufman Y.J., Merzlyak M.N., **1996**. Use a Green Channel in Remote Sensing of Global Vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*. Vol 58. Issue 3. Elsevier Science. Amsterdam. p 286-296
17. Gonçalves Z.J., Lourenço L., **1990**. Meteorological index of forest fire risk in the portuguese mainland territory. In: *Proceedings of the International Conference on Forest Fire Research*, Coimbra, B.07-1/14.
18. González F., Cuevas J.M., Casanova J.L., Calle A. and Illera P., **1997**. A forest fire risk assessment using NOAA-AVHRR images in the Valencia area, Eastern Spain. In *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 18, Taylor & Francis, New York, pp 2201-2207.
19. Grace J., **1983**. *Plant water relationship*. Chapman and Hall, London.
20. Grossman, Y.L., Ustin, S.L., Jacquemoud, S., Sanderson, E.W., Schmuck, G. and Verdebout J., **1996**. Critique of stepwise multiple linear regression for the extraction of leaf biochemistry information from leaf reflectance data. *Remote Sensing Of Environment*, vol.56, pp.182-193.
21. Hansen M. C., DeFries R. S., Townshend J. R. G., Sohlberg R., Dimiceli C., Carroll M., **2002a**. Towards an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: examples using AVHRR and MODIS data. *Remote Sensing Of Environment*, vol.83, pp.303-319.
22. Hansen M. C., DeFries R. S., Townshend J. R. G., Marufu L., Sohlberg R., **2002b**. Development of a MODIS tree cover validation data set for Western Province, Zambia. *Remote Sensing Of Environment*, vol.83, pp.320-335.
23. Hardy C.C., Burgan R.E., **1999**. Evaluation of NDVI for monitoring live moisture in three vegetation types of the Western U.S., *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 65, pp.603-610.
24. Hart J.R., Norris K.H., Golumbic C., **1962**. Determination of the moisture content of seeds by near-infrared spectrophotometry of their methanol extracts. *Cereal Chem.*, vol.39, pp.94-99.
25. Hartley J., Marchant J., **1988**. Methods of determining the moisture content of wood. NSW For. Comm., Wood Technology and Forest Research Division, Technical Paper, No.41, 37 pp.

Bibliographie

- Heikinheimo M, Venäläinen A, and Tourula T. **1998**. A soil moisture index for the assessment of forest fire risk in the boreal zone. In: Dalezios, N.R. (ed.), EUR 18328-COST 77, 79, 711, Proceedings of the *International Symposium on Applied Agrometeorology and Agrocimatology*, pp.549-555.
- Hert S., Hoffmann M., Kettner L., Pion S., Seel M., **2001**. An adaptative and extensible geometry kernel. Rapport de recherche de l'INRIA, équipe PRISME, Sophia-Antipolis, 31 p.
- Hoff C., Rambal S., **1999**. Les Ecosystèmes Forestiers Méditerranéens face aux Changements Climatiques. In Impacts potentiels du changement climatique. On line, <http://www.agora21.org/mies/chan-clim13.html>
- Hu B., Lucht W., Li X., Strahler A. H., **1997**. Validation of kernel-driven models for global modeling of bidirectional reflectance. *Remote Sensing of Environment*, vol.62, pp.201-214.
- Huang C.Q., Townshend J.R.G., Liang S.L., Kalluri S.N.V., DeFries R.S., **2001**. Impact of sensor's point spread function on land cover characterization: assessment and deconvolution. *Remote Sensing Of Environment*, vol.80, pp.203-212
- Huang C.Q., Yang L., Homer C., Wylie B., Vogelmann J., De Felice T., **2002**. At-satellite reflectance: A first normalization of Landsat 7 ETM+ images, US département of interior, USGS, on line <http://landcover.usgs.gov/pdf/huang2.pdf>
- Huemmerich K.F., **2001**. The GeoSail model: a simple addition to the SAIL model to describe discontinuous canopy reflectance, *Remote Sensing of Environment*, vol.75, pp.423-431.
- Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E. P., Gao X., Ferreira L. G., **2002**. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing Of Environment*, vol.83, pp.195-213.
- Huete A.R., **1988**. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, vol.25, pp.295-309.
- Huete A.R., Liu H.Q., Batchily K., Van Leeuwen W., **1997**. A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of Images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*. Vol.59. Amsterdam. p 440-451
- Huete A.R., Qing Liu H., **1994**. An Error and Sensitivity Analysis of the Atmospheric and Soil Correcting Variants of the NDVI for the MODIS-EOS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, n° 4, pp.897-904.
- Hunt E.R., Rock B.N., **1989**. Detection of Changes in Leaf Water Content Using Near- and Middle-Infrared Reflectances. *Remote Sensing of Environment*, Vol 30, Issue 1, Elsevier Science Inc., Amsterdam, pp 43-54.
- Hunt E.R., Rock B.N., Nobel P.S., **1987**. Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote Sensing of Environment*, Vol.22, pp.429-435.
- Ibrahima A., **1995**. Approches expérimentale et spectroscopique de la décomposition de litières méditerranéennes. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II Sciences et Techniques.
- Ichoku C., Kaufman Y. J., Giglio L., Li Z., Fraser R. H., Jin J. Z., Park W. M., **2003**. Comparative analysis of daytime fire detection algorithms using AVHRR data for the 1995 fire season in Canada: perspective for MODIS. *International Journal Of Remote Sensing*, vol.24, n°8, pp.1669-1690.
- Icona, **1988**. Experimentación de un nuevo sistema para determinación del peligro de incendios forestales derivado de los combustibles. Instrucciones de calculo. Instrucciones revisadas 1988. ICONA. Madrid. 3 pp. + Annexes.
- Icona, **1993**. Manual de operaciones contra incendios forestales. Madrid, 5.1/65
- Iglesias A., **2003**. Aportación de la teledetección al estudio de combustibles en la vegetación mediterránea. Aplicación a la prevención del riesgo de incendio forestal. Proyecto Fin de Carrera ETSI Montes. Université Polytechnique de Madrid.
- Iglesias A., Gonzales G., Dauriac F., Deshayes M., **2003**. Tecnicas de teledeteccion mediante la utilizacion de vehiculos aéreos teledirigidos, *X Congreso Nacional de Teledeteccion, 17-19 September 2003*, Madrid, Spain, pp.381-384.
- Illera P., Fernández A. and Delgado J.A., **1996**. Temporal evolution of the NDVI as an indicator of forest fire danger. *International Journal of Remote Sensing*, vol.17, Taylor & Francis, New York, pp.1093-1105.
- INMG, **1988**. Nota explicativa sobre o Indice de Risco Meteorologico de Incendios Rurais. Divisao de Meteorologia Agrícola, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica
- INRA, **1997**. Evaluer le danger d'incendies de forêts grâce à la teneur en eau de la végétation. *Presse info Juin-Juillet-Août 1997*, Communiqué. Service de Presse et Relations Publiques, Paris, On line <http://www.inra.fr/presse/JUIN97/c1.htm>
- INSEE, **2003**. L'année économique et sociale 2002 en Languedoc-Roussillon.
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change, **2001**. Climate change 2001, the scientific basis. Cambridge University Press, 850 p.
- Isengard H.-D., **1994**. Le titrage Karl Fischer à températures élevées. *1994 Deauville Conference, 13th International Symposium on Microchemical Techniques and 2nd Symposium on Analytical Sciences*, Montreux, Suisse.
- Jackson R.D., **1982**. Canopy temperature and crop water stress. *Adv. Irrig.*, n°1, pág:45-85.
- Jacquemoud S. Baret F., **1990**. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 34, Elsevier Science Inc., New-York, USA, pp 75-91.

Bibliographie

- 📖 Jacquemoud S., Bacour C., Poilve H., Frangi J.-P., **2000**. Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance: Direct and inverse mode, *Remote Sensing of Environment*, vol.74, pp.471-481.
- 📖 Jacquemoud S., Ustin S. L., **2001**. Leaf Optical Properties : a State of the Art. Proceedings of 8th International Symposium Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Aussois, France, 8-12 janvier 2001, CNES, pp.223-232.
- 📖 Jappiot M., Mariel A., **1996**. Évaluation et cartographie du risque d'incendie de forêt dans le massif des Maures. Étude confiée au Cemagref par le SIVOM du Pays des Maures, 43 p. + annexes
- 📖 Jasinski M.F., Eagleson P.S., **1989**. The structure of red-infra-red scattergrams of semivegetated landscapes, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.27, n°4, pp.441-451.
- 📖 Jensen J.R., **1983**. Urban/Suburban land use analysis. Manual of Remote Sensing (Colwell, R.N., Ed.), American Society of Photogrammetry, Falls Church, USA.
- 📖 Jin Y. F., Schaaf C. B., Gao F., Li X. W., Strahler A. H., Lucht W., Liang S. L., **2003**. Consistency of MODIS surface bidirectional reflectance distribution function and albedo retrievals: 2. Validation. *Journal Of Geophysical Research-Atmospheres*, 108 (D5)
- 📖 Joffre, R., Ågren, G.I., Gillon, D. and Bosatta, E., **2001**. Organic matter quality in ecological studies : theory meets experiment. *Oikos*, 93 : 451-458.
- 📖 Joffre, R., Gillon, D., Dardenne, P., Agneessens, R. and Biston, R., **1992**. The use of near-infrared reflectance spectroscopy in litter decomposition studies. *Ann. Sci. For.*, 49: 481-488.
- 📖 Jordan C.F., **1969**. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, vol.50, pp.663-666.
- 📖 Justice C. O., Giglio L., Korontzi S., Owens J., Morissette J. T., Roy D., Descloitres J., Alleaume S., Petitcolin F., Kaufman Y., **2002**. The MODIS fire products. *Remote Sensing Of Environment*, 83, 244-262.
- 📖 Kang S. Y., Running S. W., Lim J. H., Zhao M. S., Park C. R., Loehman R., **2003**. A regional phenology model for detecting onset of greenness in temperate mixed forests, Korea: an application of MODIS leaf area index. *Remote Sensing Of Environment*, 86, 232-242
- 📖 Kaufman Y. J., Ichoku C., Giglio L., Korontzi S., Chu D. A., Hao W. M., Li R. R., Justice C. O., **2003**. Fire and smoke observed from the Earth Observing System MODIS instrument - products, validation, and operational use. *International Journal Of Remote Sensing*, 24 (8), 1765-1781.
- 📖 Kaufman Y.J., Tanré D., **1992**. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS, *Proceedings of IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium*, IEEE, New-York, pp.261-270.
- 📖 Keetch JJ, Byram GM., **1968** révisé en **1988**. A drought index for forest fire control. USDA Forest Service, Research Paper SE-38, 32p.
- 📖 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>
- 📖 Kneizys F.X., Shettle E.P., Abreu L.W., Chetwynd J.H., Anderson G.P., Gallery W.O., Selby J.E.A., Clough S.A., **1988**. User's guide to LOWTRAN-7, Report AFGL-TR-88-0177, E.R.P. 1010, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom Air Force Base, Massachusetts, 147p.
- 📖 Knipling E.B., **1970**. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment*, vol.1, pp.155-159.
- 📖 Kogan F.N., **1990**. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*, vol.11, pp.1405-1419.
- 📖 Krieger F.J., Malila W.A., Nalepka R.F., Richardson W., **1969**. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. *Proceedings of the sixth international symposium on remote sensing of environment*, University of Michigan, Ann Arbor, pp.97-131.
- 📖 Lacaze B., Joffre R., **1994**. Extracting biochemical information from visible and near infrared reflectance spectroscopy of fresh and dried leaves. *Journal of Plant Physiology*, vol.144, pp.277-281.
- 📖 Lahousse P., Piédanna V., **1998**. L'Outil Statistique en Géographie, Tome1 : Les Distributions à Une Dimension. Collection Synthèse. Série Géographie. Armand COLIN. Paris. p 76-77, 86
- 📖 Larcher W., **1995**. Ecophysiology and stress physiology of functional groups. *Physiological plant ecology*, 3rd edition, Springer, New-York, USA, pp 528.
- 📖 Latuv, **2002**. Incendios forestales. Laboratorio de télédétection de l'Université de Valladolid. On line, <http://www.latuv.uva.es/incendios/index>
- 📖 Lawlor, D.W. and Cornic, G., **2002**. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant Cell Environ.*, 25 : 275-294.

Bibliographie

- 📖 Lawrence W.T., **1988**. Using Satellite-based remote sensing to detect drought stress in vegetation canopies. Time scales and water stress. Proceedings of 5 International Conference on Mediterranean Ecosystems, pages 299-303.
- 📖 Lebart L., Morineau A., Piron M., **1997**. Statistique exploratoire multidimensionnelle. 2ème édition. Dunod, Paris, pp.148-154.
- 📖 Lehmann E.L., D'Abrera H.J.M., **1975**. Nonparametrics. Statistical methods based on ranks. Holden-Day, San Francisco, pp.204-210.
- 📖 Li X., Strahler A.H., **1992**. Geometric-optical bi-directional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy : effect on crown shape and mutual shadowing. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30, 276-292.
- 📖 Li, X., F. Gao, J. Wang, A. Strahler, **1999**. A Priori knowledge accumulation and its application to constrain inversion of kernel-driven linear BRDF models, abstract, International Workshop on Multi-angular Measurements and Models (IWMMM-2), Ispra, Italy, 15-17 Sept, 1999.
- 📖 Liang S. L., Fang H. L., Chen M. Z., Shuey C. J., Walthall C., Daughtry C., Morisette J., Schaaf C., Strahler A., **2002**. Validating MODIS land surface reflectance and albedo products: methods and preliminary results. *Remote Sensing Of Environment*, 83, 149-162.
- 📖 Lillesand T.M., Kiefer R.W., **1987**. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley and Sons.
- 📖 Lopez S., Gonzalez F., Llop R. and Cuevas J.M., **1991**. An evaluation of the utility of NOAA AVHRR images for monitoring forest fire risk in Spain. In International Journal of Remote Sensing, Vol. 12, Taylor & Francis, New York, pp 1841-1851.
- 📖 Lotsch A., Tian Y., Friedl M. A., Myneni R. B., **2002**. Land cover mapping in support of LAI and FPAR retrievals from EOS-MODIS and MISR: classification methods and sensitivities to errors. *International Journal Of Remote Sensing*, 24 (10), 1997-2016.
- 📖 Lucas R.M., Xiao X., Hagen S., Frolking S., **2002**. Evaluating TERRA-1 MODIS data for discrimination of tropical secondary forest regeneration stages in the Brazilian Legal Amazon. *Geophysical Research Letters*, vol.29, n°8.
- 📖 Lucht W., Schaaf C.B., Strahler A.H., **2000**. An Algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.38, pp.977-998.
- 📖 Lucht W., Lewis P., **2000**. Theoretical noise sensitivity of BRDF and albedo retrieval from the EOS-MODIS and MISR sensors with respect to angular sampling. *International Journal of Remote Sensing*, vol.21, pp.81-98.
- 📖 Lusch D.P., **1989**. Fundamental considerations for teaching the spectral reflectance characteristics of vegetation, soil and water. In Current trends in Remote Sensing Education (M. D. Nellis, R. Lougeay y K. Lulla, Eds.), Geocarto International Centre, Hong Kong, pág: 5-2.
- 📖 Lymburner L., Beggs P.J., Jacobson C.R., **2000**. Estimation of canopy-average surface-specific leaf area using Landsat TM data. *Photogrametric Engineering & Remote Sensing*, vol.66, pp.183-191.
- 📖 MAAPAR Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales, **2000**. Prévention des Incendies de Forêts – 2000, Les orientations de la politique de Prévention. Online, http://www.agriculture.gouv.fr/fore/fore/incendie2000_1.htm
- 📖 Maier S.W., **2000**. Modeling the radiative transfer in leaves in the 300nm to 2.5µm wavelength region taking into consideration chlorophyll fluorescence - The leaf model SLOPE, PhD Thesis, 110 p.
- 📖 Maillet A., **1996**. Un Réseau de Mesures de la Teneur en Eau des Combustibles Forestiers Méditerranéens. *Infos DFCI*. n°37. CEMAGREF. Aix-en-Provence, p. 3
- 📖 Marage D., **2001**. Introduction aux Analyses Multivariées. Support de Cours. UMR 1092 INRA-ENGREF Ressource Bois. Unité Ecosystèmes Forestiers et Dynamique des Paysages. p 1-25
- 📖 Marchal R., **1989**. Valorisation par tranchage et déroulage des bois de chênes méditerranéens (*Quercus ilex*, *Quercus pubescens*, *Quercus suber*). Thèse de l'INP de Lorraine - Sciences du bois, EMA -USTL, 294 p., 4 annexes.
- 📖 Marquaille C., **1999**. Analyse de l'occupation du sol à partir d'images SPOT, Apport à l'étude de l'environnement des zones humides du Baden-Württemberg, Cas de la Federsee, Mémoire d'ingénieur ENSAIS, 59 p.
- 📖 Martellacci C., Peroni P., d'Epifanio A., **1993**. Analysis of Bioclimate Factors to Evaluate Fire Risk Condition. In International Work shop Satellite Technology and GIS for Mediterranean Forest Mapping and Fire Management. European Commission. Luxembourg. p 179-193
- 📖 Martens, H. and Jensen, S.A., **1982**. Partial least squares regression: a new two-stage NIR calibration method. Proceedings of the 7th world cereal bread congress. Elsevier, Amsterdam, pp. 607-647.
- 📖 Martens, H. and Naes, T., **1989**. Multivariate calibration. Wiley. Chichester, UK.

Bibliographie

- McArthur A.G., **1967**. Fire behaviour in eucalypt forests. Commonwealth of Australian Forest and Timber Bureau, Leaflet Number 107, Canberra, Australian Capital Territory. 25 pages. In: Viney N.R. **1991** - A Review of Fine Fuel Moisture Modelling. *The International Journal of Wildland Fire* 1(4):215-234.
- Méthy M., Joffre R., Ourcival J.-M., **1998**. Two Ways of Assessing Absorbance of Fresh Leaves from Near-Infrared Reflectance Spectroscopy. *International Journal of Remote Sensing*, vol.19, n° 9, pp.1741-1750.
- Metropolis N., Ulam S., **1949**. The Monte Carlo Method. *J. Amer. Stat. Assoc.*, vol.44, pp.335-341.
- Meuret, M., Dardenne, P., Biston, R. and Poty, O., **1993**. The use of NIR in predicting nutritive value of Mediterranean tree and shrub foliage. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, vol.1, pp.45-54.
- Ministère de l'Intérieur, **2002**. DFCI. Communiqué du Ministère de l'Intérieur du 30/06/2002. On line, <http://www.ofme.org/index.php3?Page=0&Rub=1&ID=96&Arc=1&Mois=6&Annee=2002>
- Mogensen V.O., Jensen C.R., Poulsen H.-H., Mortensen G., Thage J.H., Koribidis J., **1997**. Reflectance index for early determination of water stress. *Acta Hort. (ISHS)*, vol.449, pp.393-400.
- Moisselin J.-M., **2003**. Les précipitations en France au XXème siècle. Programme International Géosphère Biosphère - Programme Mondial de Recherche sur le Climat (PIGB-PMRC), Lettre n°13, 3 p.
- Moran M.S., Clarke T.R., Inoue Y., Vidal A., **1994**. Estimation crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, vol.49, pp.246-263.
- Moreira da Silva J., **1990**. La Gestion et la Sylviculture de Prévention des Espaces Forestiers Menacés par les Incendies au Portugal. . In Revue Forestière Française. N° spécial : Espaces Forestiers et Incendies. ENGREF. Nancy. p 337-339
- Morgan, J.M., **1984**. Osmoregulation and water stress in higher plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 35: 299-319.
- Morisette J. T., Privette J. L., Justice C. O., **2002**. A framework for the validation of MODIS Land products. *Remote Sensing Of Environment*, vol.83, pp.77-96.
- Moro C., **1996**. Variation spatio-temporelle de l'indice de siccité de la bruyère arborescente et de l'arbousier dans le massif des Maures, campagnes des étés 1994, 1995 et 1996. INRA-PIF, Avignon, 56 p.
- Moro C., **2001**. Inflammabilité et siccité de la bruyère arborescente. Siccité de l'arbousier. Campagne été 2001. PIF2001-08, 30p.
- Moro C., **2002**. Inflammabilité et siccité de la bruyère arborescente. Siccité de l'arbousier. Campagne été 2002. PIF2002-10, 46p.
- Moro C., **2003**. Inflammabilité et siccité de la bruyère arborescente. Siccité de l'arbousier. Campagne été 2003. PIF2003-08, 38p.
- Myneni R. B., Hoffman S., Knyazikhin Y., Privette J. L., Glassy J., Tian Y., Wang Y., Song X., Zhang Y., Smith G. R., Lotsch A., Friedl M., Morisette J. T., Votava P., Nemani R. R., Running S. W., **2002**. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing Of Environment*, 83, 214-231.
- Nishida K., Nemani R. R., Glassy J. M., Running S. W., **2003**. Development of an evapotranspiration index from aqua/MODIS for monitoring surface moisture status. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 41 (2), 493-501.
- Noble I. R., Bary G. A. V., Gill A. M., **1980**. McArthur's fire-danger meters expressed as equations. *Australian Journal of Ecology*, 5, 201-203.
- Ollivier Y., **2002**. Des Parallèles à Bonne Distance et Les Projections (Tron)Coniques. *Les Projections Cartographiques*. Ecole Normale Supérieure. On line, <http://www.elevens.fr:8080/home/ollivier/carto/carto5.html> et [carto7.html](http://www.elevens.fr:8080/home/ollivier/carto/carto7.html)
- OMS, **1997**. L'OMS est profondément préoccupée par les Conséquences pour la Santé des Incendies de Forêt en Asie du Sud-Est. In Communiqué de presse OMS/70. On line, <http://www.who.int/archives/inf-pr-1997/fr/cp97-70.html>
- Orieux A., **1979**. Conditions météorologiques et incendies de forêts en région méditerranéenne. Ministère des Transports, Direction de la Météorologie, Note Technique du Service Météorologie Métropolitain.
- Ourcival, J.M., Joffre, R. and Rambal, S., **1999**. Exploring the relationships between reflectance and anatomical and biochemical properties in Quercus ilex leaves. *New Phytol.*, 143: 351-364.
- Palmer, W. C., **1968**. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new Crop Moisture Index, *Weatherwise*, 21:156-161.
- Palmieri S, Cozzi R, **1983**. Il ruolo della meteorologia nella prevenzione e controllo degli incendi boschivi. *Riv. Meteor. Aer.* XLIII, n.4.
- Palmieri S, Inghilesi R, Siani A, Martellacci C., **1992**. Un indice meteorologico di rischio per incendi boschivi. *Bollettino Geofisico* 15: 49-62.
- Palmieri S., Inghilesi R., Siani A.M., **1993**. Un indice meteorologico di rischio per incendi boschivi. *Proceedings from "Seminar on fighting forest fires" 26-28 April 1993 Tessaaloniki.*

Bibliographie

- 📖 Paltridge G.W. and Barber J., **1988**. Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA/AVHRR data. In *Remote Sensing of Environment*, Vol. 25, Elsevier Science Inc., New-York, USA, pp 381-395.
- 📖 Paltridge G.W. and Mitchell R.M., **1990**. Atmospheric and viewing angle correction of vegetation indices and grassland fuel moisture content derived from NOAA/AVHRR. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 31, Elsevier Science Inc., New-York, USA, pp 121-135.
- 📖 Papio C., **1988**. Summer Fluctuations of Water Content in Plant Components in Garraf (Barcelona) Garrigues and Pine Woodlands. Relationship with Fire Hazard. Time scales and water stress. *V International Conference on Mediterranean Ecosystems*, pp.233-237.
- 📖 Pearson R.L., Miller L.D., **1972**. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass Prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. *8th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, ERIM, Ann Arbor, MI: 1357-1381.
- 📖 Peñuelas J., Filella I., Biel C., Serrano L. and Save R., **1993**. The reflectance at the 950-970nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 14, N°10, Taylor & Francis, New York, pp 1887-1905.
- 📖 Peñuelas J., Piñol J., Ogaya R. and Filella I., **1997**. Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 18, N°13, Taylor & Francis, New York, pp 2869-2875.
- 📖 Pinty B., Verstraete M.M., **1991**. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetation*, vol.101, pp.15-20.
- 📖 Piñol J., Filella I., Ogaya R. and Peñuelas J., **1998**. Ground based spectroradiometric estimation of live fine fuel moisture of Mediterranean plants. In *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 90, pp 173-186.
- 📖 Plucinski M. P., Catchpole W.R., **2002**. Vertical development of fire in shrubland fuels. *Proceedings of the IV International Conference on Forest Fire Research. 2002 Wildland Fire Safety Summit*. Luso, Coimbra, Portugal. 18-23 novembre 2002, p.120.
- 📖 Pokrovsky O. M., Roujean J. L., **2002a**. Land surface albedo retrieval via kernel-based BRDF modeling: I. Statistical inversion method and models comparison. *Remote Sensing of Environment*, vol.84, pp.100-119.
- 📖 Pokrovsky O. M., Roujean J. L., **2002b**. Land surface albedo retrieval via kernel-based BRDF modeling: II. An optimal design scheme for the angular sampling. *Remote Sensing of Environment*, vol.84, pp.120-142.
- 📖 Prasertsan S, Krukanont P, **2003**. Implications of fuel moisture content and distribution on the fuel purchasing strategy of biomass cogeneration power plants. *BIOMASS & BIOENERGY*, 24 (1): 13-25
- 📖 Price J. C., **2003**. Comparing MODIS and ETM+ data for regional and global land classification. *Remote Sensing Of Environment*, 86, 491-499
- 📖 Privette J. L., Myneni R. B., Knyazikhin Y., Mukelabai M., Roberts G., Tian Y., Wang Y., Leblanc S. G., **2002**. Early spatial and temporal validation of MODIS LAI product in the Southern Africa Kalahari. *Remote Sensing Of Environment*, 83, 232-243.
- 📖 Prosper-Laget V., Douguédroit A. and Guinot J.P., **1994**. Mapping the risk of forest fire departure using NOAA satellite information. In *International Workshop on Satellite Technology and GIS for Mediterranean Forest Mapping and Fire Management*, Thessaloniki, pp 151-163.
- 📖 Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H., **1994**. Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI), *Remote Sensing of Environment*, vol.48, pp.119-126.
- 📖 Rahman H., Dedieu G., **1994**. SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum, *International Journal of Remote Sensing*, vol.15, No.1, pp.123-143.
- 📖 Richardson A.J., Everitt J.H., **1992**. Using spectra vegetation indices to estimate rangeland productivity, *Geocarto International*, vol.1, pp.63-69.
- 📖 Ripple W.J., **1986**. Spectral reflectance relationships to leaf water stress. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol.52, pp.1669-1675.
- 📖 Robin M., **1998**. La Télédétection. Nathan Université, Collec. Géographie. 2ème édition. Paris.
- 📖 Roda J.M., Gérard J., Gorse C., **2003**. Aspects économiques de la production de parquet massif de Chêne vert. *Revue Forestière Française*, volume LV, n°1, 2003, pp. 65-78.
- 📖 Roger J.-M., Sablayrolles J.-M., Steyer J.-P., Bellon-Maurel V., **2002**. Pattern analysis techniques to process fermentation curves: Application to discrimination of enological alcoholic fermentations. *Biotechnology and Bioengineering*, vol.79, Issue 7, pp.804-815.
- 📖 Roldán A. **2003**. Seguimiento mediante técnicas de Teledetección del contenido de humedad de la vegetación mediterránea para la prevención de incendios forestales. PFC de la ETSI Montes, UPM.

- 📖 Roldan A., Dauriac F., Deshayes M., Gonzalez F., **2003**. Cartografia de la variacion de la humedad de la vegetacion mediterranea a partir de imagenes Spot-HRVIR, *X Congreso Nacional de Teledeteccion*, 17-19 septembre 2003, Madrid, Spain, pp.241-244.
- 📖 Román Cuesta R., **2002**. Human and environmental factors influencing fire trends in different forest ecosystems, Thèse, CREA, Université autonome de Barcelone.
- 📖 Rothermel, R.C., Wilson, R.A., Morris, G.A. & Sackett, S.S. **1986**. Modelling moisture content of fine dead wildland fuels: input to BEHAVE fire prediction system. Research Paper INT-359, USDA Forest Service Intermountain Research Station, Ogden, Utah.
- 📖 Roujean J.L., Leroy M., Deschamps P.Y., **1992**. A bi-directional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 97, 20455-20468.
- 📖 Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., Harlan J.C., **1974**. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation, NASA/GSFC type III final report, Greenbelt, 371p.
- 📖 Roussel L., **1980**. Essences d'ombre et de lumière, *Revue Forestière Française*, n° 1, p.35.
- 📖 Roussel L.-J., **1961**. Physiologie comparée du chêne vert et du chêne pubescent. *Revue Forestière Française*, ENGREF, pp.634-637.
- 📖 Roy D. P., Borak J. S., Devadiga S., Wolfe R. E., Zheng M., Descloitres J., **2002a**. The MODIS Land product quality assessment approach. *Remote Sensing Of Environment*, vol.83, pp.62-76.
- 📖 Roy D. P., Lewis P. E., Justice C. O., **2002b**. Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data - a bi-directional reflectance model-based expectation approach. *Remote Sensing Of Environment*, vol.83, pp.263-286.
- 📖 Sa A. C. L., Pereira J. M. C., Vasconcelos M. J. P., Silva J. M. N., Ribeiro N., Awasse A., **2003**. Assessing the feasibility of sub-pixel burned area mapping in miombo woodlands of northern Mozambique using MODIS imagery. *International Journal Of Remote Sensing*, 24 (8), pp.1783-1796.
- 📖 Saltelli A., Tarantola S., Chan K.P.S., **1999**. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output, *Technometrics*, vol.41, n°1, pp.39-56.
- 📖 Schaaf C.B., Gao F., Strahler A.H., Lucht W., Li X., Tsang T., Strugnell N.C., Zhang X., Jin Y., Muller J.-P., Lewis P., Barnsley M., Hobson P., Disney M., Roberts G., Dunderdale M., Doll C., d'Entremont R.P., Hug B., Liang S., Privette J.L., Roy D., **2002**. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, vol.83, pp.135-148.
- 📖 Shabanov N. V., Wang Y., Buermann W., Dong J., Hoffman S., Smith G. R., Tian Y., Knyazikhin Y., Myneni R. B., **2003**. Effect of foliage spatial heterogeneity in the MODIS LAI and FPAR algorithm over broadleaf forests. *Remote Sensing Of Environment*, 85, 410-423
- 📖 Shenk J.S., Westerhaus M.O., **1991a**. ISI NIRS-2 software for near-infrared instruments. Infrasoftware International, Silverspring, USA.
- 📖 Shenk J.S., Westerhaus M.O., **1991b**. Population definition, sample selection, and calibration procedures for near-infrared reflectance spectroscopy. *Crop Sci.*, vol.31, pp.469-474.
- 📖 Simard, A.J. **1968**. The moisture content of forest fuels – A review of the basic concepts. Forest Fire Research Institute Information report FF-X-14, Ottawa, Ontario: 47.
- 📖 Simpson J.J., Gobat J.I., **1996**. Improved cloud detection for daytime AVHRR scenes over land. *Remote Sensing of Environment*, vol.55, pp.21-49.
- 📖 Sinclair T.R., Schreiber M.M., Hoffer R.M., **1973**. Diffuse reflectance hypothesis for the pathway of solar radiation through leaves, *Agron. Journal*, vol.65, pp.276-283.
- 📖 Sol B., **1990**. Estimation du Risque Météorologique d'Incendies de Forêts dans le Sud-Est de la France. In *Revue Forestière Française*. N° spécial : Espaces Forestiers et Incendies. ENGREF. Nancy. p 263-271
- 📖 Sol B., **2000**. The FIERS Program: Status of Vegetation Based on Satellite Remote Sensing. In *Euromediterranean Wildfire Meetings, Research Special Session Hyères les Palmiers (Var-France)*. CEREN, Entente. Gardanne. p 102-107
- 📖 SSTL Surrey Satellite Technology Ltd, **2002**. Disaster Monitoring Constellation (DMC) Consortium, Communiqué de presse, 8 mai 2002, SSTL, Guildford, Surrey, UK, 3 p.
- 📖 Strahler A.H., Muller J.-P., **1999**. MODIS BRDF/Albedo Product: Algorithm Theoretical Basis Document. Version 5.0, NASA. On line, http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod09.pdf, 53 p.
- 📖 Sweeting M.N., Chen Fang-yun, **1996**. Network of low cost small satellites for monitoring and mitigation of natural disasters. *47th International Astronautical Congress*, Beijing, october 7-11 1996, paper number IAF-96-C.1.09.
- 📖 Thomas J.R., Namken L.N., Oerther G.F. and Brown R.G., **1971**. Estimating leaf water content by reflectance measurements. In *Agronomy Journal*, Vol. 63, pp 845-847.

Bibliographie

- Trishchenko A. P., Cihlar J., Li Z. Q., **2002**. Effects of spectral response function on surface reflectance and NDVI measured with moderate resolution satellite sensors. *Remote Sensing Of Environment*, 81 (1), pp.1-18
- Tucker C.J., **1980**. Remote sensing of leaf water content in the near Infrared, *Remote Sensing of Environment*, vol.10, Elsevier Science Inc., New-York, pp.23-32.
- UN-ECE/FAO, **2000**. Southern Europe. In Forest ressources of Europe, CIS, North America, Australia, Japan and New Zealand : contribution to the global Forest Ressources Assessment 2000. Timber and Forest Study Papers 17. United Nations. New York et Genève. p 211-216. On line, <http://www.unece.org/trade/timber/fra/pdf/contents.htm>
- USGS, **2002**. MODIS Reprojection Tool User's Manual Release 2.3 May 20, 2002. On line: <http://edc.usgs.gov/programs/sddm/modisdist/index.shtml>
- Ustin S.L., Roberts D.S., Pinzon J., Jacquemoud S., Gardner M., Scheer B., Castañeda C.M., Palacios-Orueta A., **1998**. Estimating canopy water content of chaparral shrubs using optical methods. *Remote Sensing of Environment*, vol.65, pp.280-291.
- Van der Voet P., Van Diepen C.A., Voshaar J.O., **1994**. Spatial interpolation of daily meteorological data. A knowledge-based procedure for the region of the European Communities. Report 53.3, DLO Winand Staring Centre, Wageningen (The Netherlands) p.105.
- Van Wagner C.E., **1967**. Seasonal variation in moisture content of Eastern Canadian tree foliage and the possible effect on crown fires. Departmental Publication n° 1204, Forestry Branch, Canada.
- Van Wagner CE, **1987**. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian Forestry Service, Technical Report 35, pp 37.
- Vélez R., **1990**. La Sylviculture Préventive des Incendies en Espagne. *Revue Forestière Française*. N° spécial : Espaces Forestiers et Incendies. ENGREF. Nancy. p 320-326
- Vennetier M., **2000**. Accélération de la Vitesse de Croissance des Arbres. In Infos DFCI. N°44. CEMAGREF. Aix-en-Provence. p 4
- Verbesselt J., Fleck S., Coppin P., **2002**. Estimation of fuel moisture content towards fire risk assessment: a review. *Proceedings of the IV International Conference on Forest Fire Research. 2002 Wildland Fire Safety Summit*. Luso, Coimbra, Portugal. 18-23 novembre 2002. p.55.
- Verhoef W., **1984**. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modelling: the SAIL model, *Remote Sensing of Environment*, vol.16, pp.125-141.
- Verhoef W., **1985**. A scene radiation model based on four stream radiative transfer theory, *Proceedings of the 3rd International Colloquium on Spectral Signatures and Objects in Remote Sensing*, Les Arcs, France, pp.143-150.
- Vermote E. F., El Saleous N. Z., Justice C. O., **2002**. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. *Remote Sensing Of Environment*, 83, 97-111.
- Vermote E., Tanré D., Deuzé J.L., Herman M., Morcrette J.J., **1995**. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum (6S). Technical report, NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA, 216 p.
- Vermote E., Tanré D., Deuzé J.L., Herman M., Morcrette J.J., **1997**. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum (6S): an overview, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol.35, n°3, pp.675-686.
- Vermote E.F., Vermeulen A., **1999**. Algorithm Technical Background Document Atmospheric Correction Algorithm: Spectral Reflectances (Mod09), Version 4.0.
- Verney-Carron A., **2002**. Etalonnage de la sphère d'intégration externe LI-800-12 en transmittance. Avignon: INRA, 25.
- Verstraete M., **2001**. Vegetation Indices Page. *Science and Technology for Applied Remote Sensing (STARS)*. On line, <http://www.gvm.sai.jrc.it/stars/vis.htm>
- Vidal A., Pinglo F., Durand H., Devaux-Ros C. and Maillet A., **1994**. Evaluation of a temporal fire risk index in Mediterranean forest from NOAA thermal IR., *Remote Sensing of Environment*, Vol. 49, Elsevier Science Inc., New-York, pp 296-303.
- Viegas D. X., Pinol J., Viegas M.T., Ogaya R., **1998**. Moisture content of living forest fuels and their relationship with meteorological indices in the Iberian Peninsula. *III International Conference on forest Fire Research-14th Conference on Fire and Forest Meteorology*, édité par D.X. Viegas (Coimbra, Portugal, ADAI), pp.1029-1046.
- Viegas D.X., **2001**. Le Projet SPREAD. In EUROPEAN COMMISSION Research Directorates General shared cost RTD Proposal Form. ADAI. Coimbra.
- Viegas D.X., Viegas T.P., Ferreira A.D., **1992**. Moisture content of fine forest fuels and fire occurrence in Central Portugal. *The International Journal of Wildland Fire*, vol. 2, no.2, pp.69-85.
- Vikhamar D., Solberg R., **2003**. Snow-cover mapping in forests by constrained linear spectral unmixing of MODIS data. *Remote Sensing Of Environment*, 88, 309-323

Bibliographie

- 📖 Vincent R.K., **1972**. An ERTS Multispectral Scanner experiment for mapping iron compounds, *Proceedings of 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, Michigan, USA, pp.1239-1247.
- 📖 Viné P., 1997. Identification de l'hétérogénéité spatio-temporelle des comportements hydrologiques. Apports de la télédétection satellitale. Application aux bassins versants du Réal Collobrier (France) et de la Mare d'Oursi (Burkina-Faso), thèse de doctorat de l'INPG.
- 📖 Walthall C.L., Norman J.M., Welles J.M., Campbell G., Blad B.L., **1985**. Simple Equation to Approximate the Bidirectional Reflectance from Vegetative Canopies and Bare Surfaces. *Applied Optics*, vol.24, n°3, pp.383-387.
- 📖 Wan Z. M., Zhang Y. L., Zhang Q. C., Li Z. L., **2002**. Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing Of Environment*, 83, 163-180.
- 📖 Wan Z., Wang P., Li X., **2004**. Using MODIS Land Surface Temperature and Normalized Difference Vegetation Index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA. *International Journal Of Remote Sensing*, 25 (1), 61-72.
- 📖 Wanner W., Li X., Strahler A.H., **1995**. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. *Journal of Geophysical Research*, 100, 21077-21090.
- 📖 Williams P.C., **1990**. Variables affecting near-infrared reflectance spectroscopic analysis. In: P. Williams and K. Norris (Editors), *Near-infrared technology in the agricultural and food industries*. American association of cereal chemists Inc, Minnesota, USA, pp.143-167.
- 📖 Williams P.C., **1992**. The Phil Williams episode. *NIR news*, vol.3, pp.4-5.
- 📖 Williams P.C., Norris K., **1990**. Near-infrared technology in the agricultural and food industries. American association of cereal chemists Inc, Minnesota, USA.
- 📖 Wold S., **1978**. Cross validatory estimation of the number of components in factor and principal components models. *Technometrics*, n°4, pp.397-405.
- 📖 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. *SIAM Journal of Science and Statistical Computations*, vol.5, pp.735-743.
- 📖 Wold S., Sjostrom M. et al., **2001**. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, vol.58, n°2, pp.109-130.
- 📖 Woolley J.T., **1971**. Reflectance and transmittance of light by leaves, *Plant Physiology*, vol.47, pp.656-662.
- 📖 Yu, G.R., Miwa, T., Nakayama, K., Matsuoka, N. and Kon, H., **2000**. A proposal for universal formulas for estimating leaf water status of herbaceous and woody plants based on spectral reflectance properties. *Plant Soil*, vol.227, pp.47-58.
- 📖 Zarco-Tejada PJ, Rueda CA, Ustin SL, **2003**. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. *Remote Sensing of Environment*, vol.85, n°1, pp.109-124.
- 📖 Zhan X., Defries R., Townshend J. R. G., Dimiceli C., Hansen M., Huang C., Sohlberg R., **2000**. The 250 m global land cover change product from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer of NASA's Earth Observing System. *International Journal Of Remote Sensing* 21 (6-7), 1433-1460
- 📖 Zhan X., Sohlberg R. A., Townshend J. R. G., DiMiceli C., Carroll M. L., Eastman J. C., Hansen M. C., DeFries R. S., **2002**. Detection of land cover changes using MODIS 250m data. *Remote Sensing Of Environment*, 83, 336-350.
- 📖 Zhang XY, Friedl MA, Schaaf CB, Strahler AH, Hodges JCF, Gao F, Reed BC, Huete A., **2003**. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing Of Environment*, 84, 471-475.
- 📖 Zhou X., Li S., **2003**. Comparison between in situ and MODIS-derived spectral reflectances of snow and sea ice in the Amundsen Sea, Antarctica. *International Journal Of Remote Sensing*, 24 (24), 5011-5032.

ANNEXES

ANNEXE 1. QUELQUES PROJETS DE RECHERCHE EUROPÉENS SUR LES FEUX DE FORÊT...	PAGE II
ANNEXE 2. CARTOGRAPHIE DU SITE D'ÉTUDE PAR PHOTOGRAPHIE AÉRIENNE.....	PAGE III
ANNEXE 3. QUELQUES INDICES SATELLITAIRES DE VÉGÉTATION.....	PAGE IX
ANNEXE 4. PROTOCOLE COMMUN INRA-ONF.....	PAGE X
ANNEXE 5. TESTS STATISTIQUES DE SPEARMAN	PAGE XIV
ANNEXE 6. PUBLICATION EN SPECTROSCOPIE PROCHE INFRAROUGE.....	PAGE XV
ANNEXE 7. PROPRIÉTÉS SPECTRALES D'UNE GARRIGUE À L'AIDE D'UN RADIOMÈTRE CIMEL.....	PAGE XXVIII
ANNEXE 8. LE DRONE PIXY® ET LES PRISES DE VUES.....	PAGE XXXIV
ANNEXE 9. LE DRONE PIXY® ET LE TRAITEMENT DES VUES	PAGE XXXVI
ANNEXE 10. TABLE STATISTIQUE.....	PAGE XXXVII
ANNEXE 11. ÉTUDES AVEC LE CAPTEUR MODIS.....	PAGE XXXVIII
ANNEXE 12. ATTRIBUTS GLOBAUX DE QUALITÉ DES PRODUITS MODIS.....	PAGE XLI

ANNEXE 1. QUELQUES PROJETS DE RECHERCHE EUROPÉENS SUR LES FEUX DE FORÊT

Projet	Sujet	Période	Coordinateur
Comportement du feu			
EFAISTOS	Expérimentations et simulations pour l'amélioration et la validation des modèles de comportement des feux de forêt	11/1996-02/1998	Valette (France)
MEFISTO	Création d'un système d'aide à la décision pour le personnel de lutte fournissant des données en temps réel sur la propagation du feu	09/1997-12/2000	Paternò (Italie)
INFLAME	Modélisation de la propagation des feux de forêt, tester et valider les outils déjà existants	05/1998-04/2000	Viegas (Portugal)
SALTUS	Phénomène de sautes de feu : connaissances et modélisation	04/1998-03/2001	Colin (France)
FIRESTAR	Systèmes interactifs d'aide à la décision pour la gestion du combustible et la réduction du risque d'incendie en zones d'interfaces forêt-périurbain en région méditerranéenne	01/2002-12/2004	Valette (France)
WARM	Interfaces forêt-périurbain	01/2002-12/2004	Caballero (Espagne)
Gestion du feu et détection			
PROMETHEUS	Fournir aux gestionnaires un outil de réflexion innovant les aidant à transformer un milieu aux conditions de feu inacceptables en un milieu où l'impact du feu sur le milieu serait acceptable.	06/1998-03/2000	Eftichidis (Grèce)
FIRE-TORCH	Le brûlage dirigé, un outil pour la région méditerranéenne : une approche gestionnaire	06/1998-07/2000	Bothelo (Portugal)
FOMFIS	Gestion du feu de forêt et systèmes de protection		
DELFI-C.A.	Création d'une base de connaissance commune sur les feux de forêt		
PHOTON	Capteur hypersensible de photons pour les systèmes de détection précoce des feux de forêt		
AFFIRM	Systèmes autonomes de détection des feux de forêt et d'aide à la décision intégrant des terminaux multicapteurs télécommandés.		
RAPSODI	Détection rapide des fumées et contrôle des feux de forêt	10/1997-09/1999	Dierre (France)
FORFAIT-A	Risque d'incendie de forêt et évaluation de risque : une approche holistique	01/2000-06/2002	Gralewski (Royaume-Unis)
FIREGUARD	Surveillance des forêts au niveau d'unité de gestion pour le contrôle et la protection contre l'incendie		
Détection par satellite			
MEGAFIRES	Téledétection des grands feux de forêt dans le bassin Euro-méditerranéen	05/1996-04/1998	Chuvieco (Espagne)
INFLAME	Modélisation de la propagation des feux de forêt, tester et valider les outils déjà existants	09/1999-08/2002	Viegas (Portugal)
CONTROL-FIRE-SAT	Conception d'un cadre pour produire et fournir des services d'information basés sur l'observation de la terre, pour la gestion des feux de forêt aux niveaux européens et locaux	98-2001	Chuvieco (Espagne)
FIERS	Estimation du risque d'incendie par téledétection satellitaire	03/1998-12/1999	Cannizzaro (Italie)
FUEGO I & II	Mise au point d'un système de constellation satellitaire détectant les feux et suivant leur propagation, de façon continue, de jour comme de nuit.	2 projets 11/1996-04/2001	Gonzalo et Martin-Rico (Espagne)
SPREAD	Prévention et réduction de la propagation des incendies de forêt	01/2002-12/2004	Viegas (Portugal)
Lutte et impacts sur les écosystèmes			
ACRE	Améliorer la connaissance sur l'efficacité et les méthodes d'applications des additifs chimiques retardant	12/2000	Picard (France)
FIMEX	Méthodes de lutte contre les incendies de forêt avec des tuyaux explosifs remplis d'agent extincteurs		
Réseau d'excellence			
EUFIRELAB	Laboratoire Euro-Méditerranéen des Feux de Forêt : un Laboratoire sans murs pour les Sciences et les Technologies de l'Incendie de Forêt en Région Euro-Méditerranéenne	12/2003-	Valette (France)

ANNEXE 2. CARTOGRAPHIE DU SITE D'ÉTUDE PAR PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES

Des photographies aériennes de l'IGN et de l'IFN sont disponibles sur la zone d'étude avec des résolutions spatiales inférieures au mètre. L'image de l'IFN date de l'année 1992 et n'a pas été retenue du fait de son ancienneté. Pour l'IGN les photographies utilisées, prises par avion à 4 km d'altitude, datent des années 1996 et 2001. On pourra ainsi observer l'évolution du couvert végétal et quantifier la fermeture de la garrigue sur cette période.

Il nous est apparu intéressant de réduire encore cette résolution (5-10 cm) pour reproduire le plus finement possible la réalité. Ceci a été permis grâce au récent développement d'un aéronef télécommandé (drone Pixy®), développé par l'IRD, équipé de capteurs numériques. Cet appareil nous a permis d'acquérir des images du site d'étude en 2002.

Ainsi, à partir de données de télédétection aéroportée, nous essayons de répondre à deux objectifs bien distincts :

- cartographier de manière précise la zone d'étude pour servir de référence aux images satellitaires ;
- caractériser l'évolution de la zone entre 1996 et 2002.

Un travail important, non présenté dans ce document, consiste en notre participation aux développements et améliorations du drone. Plusieurs séries de tests ont permis de choisir les meilleures solutions techniques (capteurs, GPS, écran de visualisation au sol) et logicielles (suivi en temps réel de l'appareil sur SIG) pour répondre au cahier des charges (budget limité, appareil accessible au plus grand nombre). Depuis février 2004, Bruno Roux, ingénieur d'étude, développe un projet de création d'entreprise pour valoriser les missions du drone Pixy®. Il propose alors des produits à très haute résolution adaptés au suivi de l'environnement (cartes de végétation, de zones d'érosion, suivi d'inondations, Modèles Numériques de Terrain...). Ce projet est encadré par les incubateurs « *Minéa* » du CEMAGREF et « *Languedoc-Roussillon Incubation* » de la région, avec la mise à disposition de locaux et de matériels.

1. LE DRONE PIXY®

A. Les systèmes existants

Les images aériennes existent depuis plus d'un siècle et leur coût est très modéré (quelques euros par km²). On distingue plusieurs appareils (Tableau 1) :

Tableau 1. Caractéristiques des appareils d'observation aérienne

Type d'appareil	Avantages	Inconvénients
Cerfs-volants	- Faible coût - Rapidité d'exécution	- Sensible aux conditions météorologiques - Faible capacité de charge - Faible couverture spatiale
Avions et hélicoptères d'aéromodélisme	- Coût modéré - Rapidité d'exécution	- Dextérité de pilotage - Mauvaise stabilité lors de la prise de vue - Faible capacité de charge - Faible couverture spatiale (<1 ha)
Ballons troposphériques libres, tenus par un câble, dirigeables ou non...	- Bonne stabilité - Bonne capacité de charge - Coût modéré	- Couverture et résolution spatiale variable - Sensible aux conditions météorologiques - Plan de vol et réglementations spécifiques
Avions (entre 1 et 15 km d'altitude)	- Couverture de 5 à 200 km² - Bonne stabilité - Résolution submétrique - Forte capacité de charge	- Faible répétition (retour de 5 à 10 ans) - Coût élevé d'une mission - Plan de vol et réglementations spécifiques
Hélicoptères	- Bonne répétitivité - Couverture de 1 à 50 km² - Bonne stabilité - Résolution submétrique - Forte capacité de charge	- Coût élevé d'une mission - Plan de vol et réglementations spécifiques

L'appareil le mieux adapté à l'observation aérienne de la surface de la Terre à très haute résolution est de loin **l'hélicoptère**. Il répond exactement aux besoins de l'utilisateur : suivi d'une zone en un instant donné et en dynamique (par exemple suivi de l'évolution d'une crue), utilisation d'appareils de mesure volumineux (radiomètres, GPS, centrale à inertie...). Néanmoins sa limitation réside dans le coût de la mission (environ 1.000 € l'heure) et la nécessité de programmer des plans de vol à l'avance.

Nous précisons par la suite les besoins des utilisateurs et les caractéristiques du drone Pixy® développé.

B. Besoins des utilisateurs

Les utilisateurs potentiels du drone souhaitent disposer d'un appareil volant léger **facilement dirigeable**, couvrant une surface au sol suffisante (> 1 ha). La résolution spatiale des images doit être meilleure que les photos aériennes de l'IGN¹, soit **inférieure à 50 cm**. Le repérage cartographique des images doit être aisé (GPS embarqué et suivi de la trace en temps réel sur un écran)² pour une **acquisition** et un **traitement rapide** (format numérique).

¹ Pour une focale de 35 mm, à une altitude de vol de 100 m la couverture au sol est de 69 x 103 m. Pour un appareil photo de résolution 2048 x 1536, le pixel a une résolution d'environ 5 cm.

² Le signal GPS a une précision de 5-10 m en X-Y et de 10-20 m en Z, suffisante pour la visualisation de la trace du drone sur une carte.

Les systèmes optiques de prise de vue doivent s'adapter sans difficulté, afin de couvrir pour certaines applications une large gamme du spectre électromagnétique (des UV au proche infrarouge).

C. Caractéristiques du Pixy®

Le drone Pixy® (*annexe 8*) a été développé par Jean Asseline de l'unité Ambre de l'Institut de Recherche pour le Développement l'IRD de Montpellier (cf. www.drone-pixy.fr). La licence exclusive d'exploitation appartient à la société ABS Aerolight® (cf. www.absaerolight.com), spécialisée dans la conception et la production d'aéronefs pour l'observation de la Terre à haute résolution.

La Maison de la Télédétection de Montpellier s'est dotée d'un exemplaire du drone Pixy® pour un budget de moins de 10.000 €. C'est un nouvel outil de télédétection aérienne rapprochée, considéré comme un paramoteur lent, télécommandé à distance, voué au suivi de petites zones d'étude (< 50 ha) de manière répétée (45 minutes d'autonomie de vol), à l'aide de matériel de prise de vue à THRS (charge utile de 3 kg) (*Figure 1*).



Figure 1. Drone Pixy® et ses accessoires

La réglementation en vigueur n'impose pas d'altitude de vol mais nécessite de garder le drone à vue (limite d'environ 600 mètres d'altitude) et de voler à moins de 150 mètres en présence d'autres engins dans le ciel. La mise en service de l'appareil est relativement simple et rapide (environ 15 minutes de préparation, montage et tests avant envol). Le moteur et les accessoires sont entièrement démontables et transportables dans une valise de volume réduit (0,5 m³). Le drone est robuste et permet un usage intensif en conditions difficiles.

L'UMR 3S Cemagref-Engref participe à son développement en y intégrant une liaison radio pour connaître en temps réel la position GPS de l'appareil sur une interface SIG ainsi que la vision vidéo au sol des différentes zones à photographier. Ainsi le pilote dispose de l'ensemble des informations lui permettant de suivre la trajectoire et les paramètres du drone ; il peut donc optimiser au mieux la prise de vues. Grâce à l'appareil photo numérique haute capacité, le drone permet de prendre des clichés de très haute définition à un coût modique. Par exemple, à une altitude de vol de 150 m, une photo couvre une surface de 1,1 ha (90 x 120 m) avec une résolution de l'image de 5 cm.

Actuellement, le développement se penche vers le couplage d'un appareil photo argentique dédié à la prise de vues dans le domaine du proche infrarouge et de l'ultraviolet pour le suivi de la végétation.

De retour de mission, les clichés sont traités par géoréférencement et orthorectification (*annexe 9*) et sont ainsi rapidement exploitables.

2. CARTOGRAPHIE DE LA ZONE D'ÉTUDE DE GARRIGUE ET ÉVOLUTION ENTRE LES ANNÉES 1996 ET 2002

Dans la mesure où nous disposons d'images aériennes de 1996 (IGN), 2001 (IGN) et 2002 (drone) du site d'étude près de Montpellier, nos objectifs sont de réaliser une carte précise de l'occupation du sol et d'examiner la dynamique de la végétation en place sur les six années.

A. Données

Pour notre site d'étude du causse d'Aumelas, nous disposons des photographies aériennes de l'IGN prises en juin 1996 et juin 2001 (missions FD 30-34). Ces images sont à l'échelle du 1/25.000^{ème} et couvrent un carré d'environ 33 km². Elles peuvent être scannées à une résolution de 1200 dpi. Le coût de chaque image est limité : 35 € en tirage papier.

Nous détenons également les photographies numériques réalisées en juillet 2002 avec le drone Pixy®.

B. Traitements

Le premier traitement des images aériennes de l'IGN consiste à les numériser. En raison d'un changement de matériel pendant l'étude, l'image de 1996 est numérisée à une définition de 950 dpi (résolution du pixel de 67 cm) et l'image de 2001 à 1200 dpi (résolution du pixel de 53 cm). Concernant les photographies acquises par le drone en 2002, la précision est meilleure : résolution du pixel de 10 cm en moyenne. Le détail des opérations de traitement est présenté de manière générale en *annexe 9*. En quelques mots, nous pouvons dire que l'ensemble des images acquises par le drone sont corrigées radiométriquement (vignettage³) et géométriquement (déformations causées par l'objectif).

Un second traitement est le géoréférencement et l'orthorectification des images par l'intermédiaire du module Orthobase® du logiciel Erdas® Imagine®. Nous appliquons à toutes les images des corrections liées aux conditions de prise de vue et au relief (emploi d'un modèle numérique de terrain MNT et de points de contrôle D-GPS). Les photographies sont regroupées entre-elles (mosaïquage) et l'image finale peut ainsi être comparée aux autres sources d'information (images satellitaires, bases de données vecteur...).

Le troisième traitement correspond à la classification de l'occupation du sol selon les trois types d'occupation du sol majoritaire, à savoir la strate arbustive composée de chênes kermès, la strate herbacée composée de brachypodes rameux et les affleurements rocheux (sol nu). La classification est réalisée sur une partie de l'image seulement correspondant au site d'étude de 7 hectares.

³ Assombrissement des angles causé par l'objectif

Nous utilisons la méthode de classification supervisée qui consiste à attribuer à chaque pixel de l'image (codé sur 3 fois 8 bits) une unique classe d'affectation (selon la nomenclature) à partir d'une vérité de terrain.

C. Résultats

D'après Iglesias *et al.* (2003), après classification et élimination des pixels isolés, on dispose pour notre zone d'étude du Causse d'Aumelas (7 ha) d'une carte précise et récente (< 10 cm de l'été 2002) ainsi que de cartes moins précises permettant de décrire la dynamique spatiale du site de 1996 à 2002 (Figure 2) :

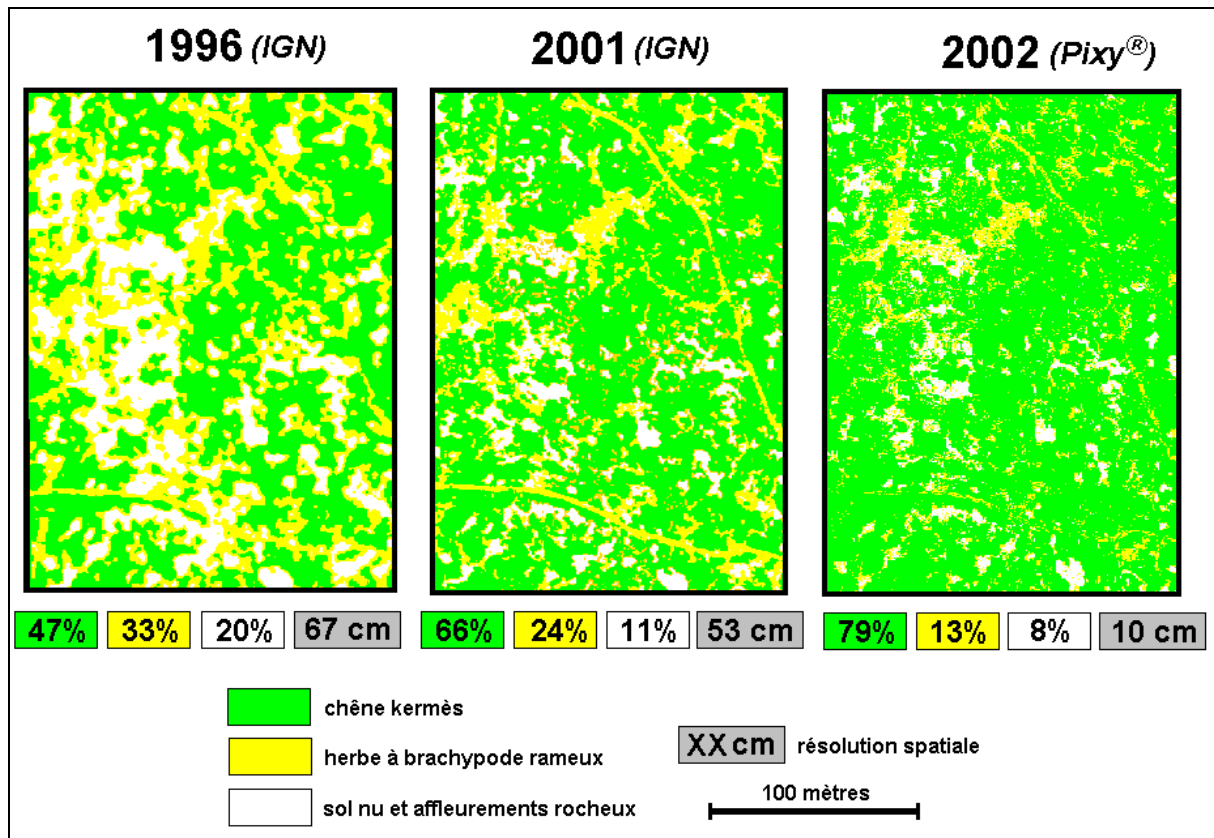


Figure 2. Cartes d'évolution de l'occupation du sol entre 1996 et 2002 sur le Causse d'Aumelas

Même si les trois images ont une résolution spatiale différente, on observe clairement sur les 7 hectares cartographiés une **fermeture progressive du milieu**. Les affleurements calcaires et la strate herbacée sont colonisés rapidement par le chêne kermès (de 47 à 79% en 6 ans). Le rythme de croissance des végétaux est directement lié aux conditions climatiques du site. Ainsi, l'année 2002 humide a permis une forte croissance de la végétation (+13% de chêne kermès en un an). A l'opposé, on peut logiquement penser qu'en 2003 l'occupation du sol a peu changé, en raison de la longue période de sécheresse pendant laquelle une partie de la population de chêne kermès a dépéri.

On remarque également que les chemins d'accès du site, enherbés en 1996, sont aujourd'hui recouverts de jeunes plants de chêne kermès. Autrefois pâturée, la zone de garrigue suivie est aujourd'hui laissée à l'abandon et le propriétaire (non agriculteur) n'effectue aucun entretien du milieu. Le brûlage « sauvage » est généralisé dans la zone du causse d'Aumelas : au cours des trois années de suivi, de nombreux feux de petites tailles ont été observés à proximité du site. La présence régulière du personnel de recherche sur la zone a interdit pour l'instant le débroussaillage par le feu du site ! Si le rythme d'extension de la végétation se poursuit, on peut envisager une fermeture complète du milieu pour 2006 si rien n'est fait pour l'empêcher.

A la fois le drone Pixy® et les campagnes régulières de vol de l'IGN permettent une analyse fine de l'évolution des paysages et des dynamiques rapides des couverts, déterminantes pour l'estimation du risque d'incendie.

ANNEXE 3. QUELQUES INDICES SATELLITAIRES DE VÉGÉTATION

Indice	Désignation	Références
ARND	<i>Accumulated Relative NDVI</i>	Lopez <i>et al.</i> , 1991
ARVI	<i>Atmospherically Resistant Vegetation Index</i>	Kaufman et Tanre, 1992
DVI	<i>Difference Vegetation Index</i>	Lillesand et Kiefer 1987, Richarson et Everitt, 1992
GARI	<i>Green Atmospherically Resistant Index</i>	Gitelson <i>et al.</i> , 1996
GEMI	<i>Global environmental monitoring index</i>	Pinty et Verstraete, 1991
GNDVI	<i>Green Normalized Difference Vegetation Index</i>	Gitelson <i>et al.</i> , 1996
GRARI	<i>Green-Red Atmospherically Resistant Index</i>	Gitelson <i>et al.</i> , 1996
GVMi	<i>Global Vegetation Moisture Index</i>	Ceccato <i>et al.</i> , 2001
IPVI	<i>Infrared Percentage Vegetation Index</i>	Crippen, 1990
LWCI	<i>Leaf Water Content Index</i>	Hunt <i>et al.</i> , 1987
MSARVI	<i>Modified Soil adjusted and Atmospherically Resistant Vegetation Index</i>	Huete et Liu, 1994
MSAVI	<i>Modified Soil Adjusted Vegetation Index</i>	Qi <i>et al.</i> , 1994
NDII	<i>Normalized Difference Infrared Index</i>	Hunt <i>et al.</i> , 1989
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>	Tucker 1980, Rouse <i>et al.</i> 1974, Krieger <i>et al.</i> 1969
RGRE	<i>Relative Greenness</i>	Kogan, 1990
RRI	<i>Relative Reflectance Index</i>	Mogensen <i>et al.</i> , 1997
RVI	<i>Ratio Vegetation Index</i>	Jordan, 1969
SARVI	<i>Soil adjusted and Atmospherically Resistant Vegetation Index</i>	Kaufman <i>et al.</i> , 1992
SARVI2	<i>Soil-adjusted and Atmospherically Resistant Vegetation Index 2</i>	Huete <i>et al.</i> , 1996
SAVI	<i>Soil-Adjusted Vegetation Index</i>	Huete, 1988
SLAVI	<i>Specific Leaf Area Vegetation Index</i>	Lymburner <i>et al.</i> , 2000
TVI	<i>Transformed Vegetation Index</i>	Deering <i>et al.</i> , 1975

(Voir aussi Verstraete, 2001)

ANNEXE 4. PROTOCOLE COMMUN INRA-ONF

1. PRÉLÈVEMENT DE LA VÉGÉTATION SUR LE TERRAIN

1.1. LA FRÉQUENCE DES PRÉLÈVEMENTS

Afin d'assurer un suivi régulier et de mettre en évidence soit de brutales variations soit des "plateaux", les prélèvements seront effectués, deux fois par semaine (tous les lundis et les jeudis).

Dans l'hypothèse où les conditions météorologiques ne permettent pas d'effectuer les prélèvements (jour de pluie, végétation détrempée), **l'opération n'est pas reportée au lendemain** afin de ne pas modifier le calendrier de prélèvement, une fiche de terrain est toutefois établie (voir ci-dessous). Le calendrier opérationnel (avec le N° des visites) sera établi pour la saison 2001 lorsque l'accord sera donné par la DRONF-PACA si l'opération est maintenue.

1.2. LE CIRCUIT DE PRÉLÈVEMENT

Dans le cas où une équipe est chargée d'effectuer les prélèvements sur deux ou trois sites, elle suivra systématiquement le circuit **dans le même sens** pour éviter d'introduire des variations d'un jour de prélèvement à l'autre.

Lorsque, sur un des sites, les prélèvements ne sont pas possibles, **la fiche de terrain est remplie (attention au N° de la fiche, voir calendrier opérationnel)** et l'absence de prélèvement est notée. L'équipe se rend quand même sur le(s) autre(s) site(s).

Afin d'éviter des variations à l'échelle de la journée, les prélèvements auront lieu **entre 13h et 16h**, sauf contrainte majeure. Ainsi les végétaux prélevés ont été exposés pendant plus de quatre heures en plein soleil et les opérations ont lieu durant les heures les plus chaudes et les plus sèches de la journée, donc a priori lorsque les risques d'éclosion d'incendies sont les plus élevés.

1.3. LES PHASES DU PRÉLÈVEMENT

Le prélèvement sur un site donné se décompose en cinq phases :

1. Collecte de la matière végétale de la première espèce E1
2. Conditionnement des cinq échantillons de la première espèce E1R1 à E1R5
3. Collecte de la matière végétale de la seconde espèce E2
4. Conditionnement des cinq échantillons de la seconde espèce E2R1 à E2R5
5. Etablissement de la fiche de terrain.

1.4. LE MATÉRIEL DE PRÉLÈVEMENT

Le matériel nécessaire à la collecte des échantillons végétaux se compose de :

1. un sécateur
2. un sac de collecte en papier kraft par espèce
3. cinq conteneurs par espèce
4. un porte-conteneurs (type porte bouteilles)
5. un rouleau de bande adhésive pour peintres ou carrossiers.

Le couvercle de chaque conteneur est associé à son corps ; **ne pas intervertir** les corps et les couvercles, les identifications du corps et de son couvercle doivent être identiques.

1.5. LE DÉROULEMENT D'UN PRÉLÈVEMENT

Les différentes étapes du prélèvement sont décrites ci-après.

1. A l'arrivée sur le site, veiller à ce que les conteneurs **ne soient pas exposés au soleil**.
2. Collecter les échantillons de la première espèce sur **plusieurs individus** étant au **même stade phénologique et hors de l'abri ou de l'ombre portée des arbres**. Prélever les 5 à 10 derniers centimètres **des pousses terminales et latérales de l'année**. Placer la matière végétale dans le sac en papier kraft au fur et à mesure de la récolte en évitant de l'exposer au soleil. Récolter environ cent grammes.

Échantillonnage dans le cas où les pousses d'une espèce bruniraient, en réaction à la sécheresse : *dans la mesure du possible, seules les pousses vertes doivent être récoltées*. Il ne faut surtout pas échantillonner en faisant une proportion "vert - sec". *L'agent évalue la part qu'occupent ces pousses "sèches" parmi la totalité des pousses*. Cette information est à inscrire dans la case remarque de la fiche terrain.

3. Retourner au véhicule. **Bien brasser la matière végétale dans le sac en papier kraft**.
 4. Prélever **de manière aléatoire** de quinze à vingt grammes de matière végétale et l'introduire **sans tasser** dans le conteneur préalablement identifié. Remettre le couvercle en place et le fixer avec la bande adhésive. Placer le conteneur dans le porte-conteneurs.
 5. Répéter l'opération 4 pour remplir les quatre autres conteneurs de l'espèce E1. Placer le porte-conteneurs à l'ombre dans le véhicule
 6. Répéter les points 2 à 5 pour l'espèce E2.
- Compléter la fiche de terrain.

1.6. LA FICHE DE TERRAIN

Des fiches de terrain, une par site, ont été établies à la suite de la visite des sites.

Ces fiches sont la mémoire des équipes de terrain qui les archivent. Elles sont **adressées à la DR-ONF de PACA** après la fin de la campagne.

Rappel : La fiche de terrain est établie même si le prélèvement n'est pas effectué ; il convient de le spécifier dans le cadre Remarques (Attention au N° de la fiche voir calendrier opérationnel).

1. Porter la date du jour de la collecte et le numéro d'ordre de cette collecte depuis le début de la campagne.
2. Indiquer la date, l'heure d'arrivée et l'heure de départ probable du site.
3. Cocher ou cercler les cases correspondantes à l'état du sol, à la couverture nuageuse, à la direction du vent et à sa vitesse.

Etat du sol : indiquer s'il est sec, humide ou détrempé.

Direction d'où vient le vent : préciser le secteur de la rose des vents d'où vient le vent.

Vitesse du vent : évaluer selon les indications portées sur la fiche la(les) note(s) Beaufort « terre ». Cette évaluation doit intégrer le vent sur la durée de présence sur le site et pas seulement lors de l'établissement de la fiche.

Couverture nuageuse : indiquer l'importance de cette couverture en observant la totalité de la voûte céleste et en estimant le couvert cumulé des nuages.

Pluviométrie : Noter la hauteur d'eau dans le pluviomètre. Conformément aux indications de la note technique d'utilisation, vider le seau dans l'éprouvette autant de fois que nécessaire. La hauteur de pluie sera égale au total des hauteurs successives.

Remettre en place l'éprouvette et le cône de réception (voir note technique).

Porter la date supposée à laquelle est survenue la pluie.

4. Si nécessaire, compléter le cadre "Remarque" : indiquer ou décrire des états ou des modifications de toute nature, observés sur le site (dessèchement, attaque d'insectes, phénomène météorologique particulier,...), éventuellement la proportion de pousses "sèches" si l'échantillonnage a été effectué sur une espèce "brunissante".

IMPORTANT : Lorsqu'une récolte a été effectuée sur une espèce "brunissante", il convient impérativement d'informer le laboratoire (lors du dépôt des conteneurs) de ce pourcentage. Celui-ci devra être inscrit sur la fiche "laboratoire" (fiche "faxée" au responsable DRONF-PACA le lendemain soir).

1.7. IDENTIFICATION DES CONTENEURS

Ils sont identifiés par neuf caractères :

1. DXX : D suivi du numéro minéralogique du département
 2. S1 ou S2 : selon que les opérations portent sur le site 1 ou le site 2
 3. E1 ou E2 : selon que le conteneur contient un échantillon de l'espèce 1 ou 2
- R1 à R5 : le conteneur correspond à l'une des cinq répétitions
(il est possible d'étiqueter le conteneur avec le nom de l'espèce pour éviter des erreurs.
Cette étiquette ne doit jamais être enlevée ensuite. Etiquette de 40 X 25 mm maximum)

2. LA DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN EAU AU LABORATOIRE

La teneur en eau de chaque prélèvement est déterminée après **un séjour de 24 heures à 60°C**.
N.B. : La tare T de chaque conteneur (corps et couvercle) doit être mesurée **à chaque fois**.

Pour ce faire, les opérations au laboratoire s'effectuent selon la procédure indiquée ci-après, les masses mesurées sont reportées au fur et à mesure sur la fiche de laboratoire.

Ces fiches seront archivées par la DRONF-PACA

2.1. OPÉRATIONS DE MISE À L'ÉTUVE

1. Vérifier l'horizontalité de la balance (niveau à bulle) et la calibrer.
2. Porter sur la fiche de laboratoire le numéro d'ordre du prélèvement, la date à laquelle la teneur en eau va être déterminée et le numéro du jour de l'année.
3. Sortir du porte-conteneurs le conteneur R1 de l'espèce E1 du site S1. L'essuyer avec un chiffon sec. Oter la bande adhésive en s'assurant que le couvercle reste bien en place.
4. Remettre la balance à zéro. Déposer le **conteneur fermé** sur le plateau de la balance. Rabattre le couvercle brise vent de la balance. Attendre que la masse affichée soit stable et la noter dans la case PV+T. Ranger le conteneur fermé.
5. Répéter les opérations 3 et 4 pour les conteneurs R2 à R5 de l'espèce E1 du site S1.
6. Répéter les opérations 3 à 5 pour les conteneurs R1 à R5 de l'espèce E2 du site S1.
7. Reprendre les dix conteneurs et les ouvrir en plaçant chaque corps dans son couvercle.
8. Placer les dix **conteneurs ouverts** sur les claies de l'étuve en veillant (i) à ne pas les superposer, (ii) à ce que la matière végétale ne "déborde" pas, (iii) à **ne pas la tasser** (circulation de l'air).
9. Répéter les opérations 3 à 8 pour les espèces E1 et E2 des sites S2 et S3 (lorsqu'ils existent).

2.2. OPÉRATIONS DU LENDEMAIN

Il convient de s'assurer que les échantillons sont bien restés à **60°C pendant 24 heures** (des coupures de courant peuvent survenir à la suite d'orages ou autres).

Le cas échéant, le séjour des échantillons à l'étuve sera prolongé d'autant, quitte à retarder la transmission des résultats.

1. Vérifier l'horizontalité de la balance (niveau à bulle) et la calibrer.
2. Remettre la balance à zéro. Placer sur le plateau de la balance le récipient de pesée. Rabattre le couvercle brise vent. Attendre que la masse affichée soit stable. Remettre la balance à zéro.
3. Sortir un conteneur de l'étuve.
4. Vider immédiatement le conteneur dans le récipient de pesée en s'aidant, éventuellement, d'un petit pinceau afin de ne rien y laisser. Rabattre le couvercle brise-vent. Attendre que la masse affichée soit stable. Noter rapidement cette masse dans la case PS. (Cette masse va ensuite augmenter significativement au fur et à mesure que la matière sèche se recharge en eau).
5. Placer le conteneur à refroidir sur la paillasse et vider le récipient de pesée.
6. Répéter les opérations 2 à 5 pour chaque échantillon.
7. Lorsque les conteneurs sont refroidis, remettre chaque couvercle sur son corps. Remettre la balance à zéro. Poser le conteneur sur le plateau de la balance. Rabattre le couvercle brise-vent. Noter la masse du conteneur dans la case T
8. Déterminer la teneur en eau de chaque échantillon par application de la formule $100 \times (PV - PS) / PV$
9. Calculer la moyenne arithmétique des teneurs en eau des cinq échantillons de chacune des espèces.

Ces fiches sont envoyées par télécopie à la D.D.A.F. du département, la DRONF de PACA au 04 42 17 57 61, le CIRCOSC au 04 42 94 94 39.

IMPORTANT : *Lorsqu'une récolte a été effectuée sur une espèce "brunissante" (information fournie par les agents de terrain lors du dépôt des conteneurs), il est impératif de reporter le pourcentage indiqué par ces agents sur la fiche laboratoire télécopiée.*

ANNEXE 5. TESTS STATISTIQUES DE SPEARMAN

Soit x_i une réalisation de la variable aléatoire X . Nous désirons savoir si les x_i peuvent être considérés comme des réalisations indépendantes les unes des autres. Pour cela, Spearman propose le raisonnement suivant : si les réalisations sont indépendantes, l'échantillon ne présente pas de structure, c'est-à-dire d'ordre privilégié. On testera donc la présence de dépendance en comparant l'ordre de l'échantillon recueilli avec celui issu d'une procédure de tri. Cette comparaison se fait grâce au coefficient de corrélation. Sous l'hypothèse H_0 d'indépendance, le coefficient de corrélation doit être nul. Ce test est souvent utilisé comme test de tendance de séries chronologiques.

Soit $R(x_i)$ le rang occupé par la réalisation x_i dans la série ordonnée des x_i (le rang initial étant bien sûr i). On note ρ_s le coefficient de corrélation de Spearman, donné par :

$$\rho_s = \frac{\text{Cov}(R(X_i), i)}{\sqrt{V(R(X_i))V(i)}} = \frac{\sum_i \left[R(X_i) - \frac{n+1}{2} \right] \left[i - \frac{n+1}{2} \right]}{\frac{n(n^2-1)}{12}} = 1 - \frac{6T}{n(n^2-1)}$$

$$\text{où } T = \sum_i [R(X_i) - i]^2$$

Soit r_s la valeur prise par ρ_s pour l'échantillon considéré. La distribution de ρ_s sous l'hypothèse H_0 est tabulée. Cependant, pour un échantillon de grande taille ($n > 30$) on peut considérer que la quantité $\sqrt{n-1} \rho_s$ est approximativement distribuée selon une loi normale centrée réduite. Si la quantité $|r_s|$ est inférieure au quantile α du coefficient de corrélation de Spearman, alors on accepte l'hypothèse H_0 , sinon il y a rejet. Si $n > 30$, on peut se servir des valeurs d'une table de la loi normale centrée réduite.

ANNEXE 6. PUBLICATION EN SPECTROSCOPIE PROCHE INFRAROUGE

Gillon D., Dauriac F., Deshayes M. Valette J.-C., Moro C., **2004**. Estimation of foliage moisture content using near infrared reflectance spectroscopy, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol.124, n°1-2, pp.51-62.

Estimation of foliage moisture content using near infrared reflectance spectroscopy

D. Gillon^{a,*}, F. Dauriac^{b,1}, M. Deshayes^{b,1}, J.C. Valette^{c,2}, C. Moro^{c,2}

^a Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE), CNRS, 1919 Route de Mende, 34293 Montpellier, Cedex 5, France

^b Structures et Systèmes Spatiaux, Cemagref-Engref Maison de la Télédétection, 500 rue J.F. Breton, 34093 Montpellier, Cedex 5, France

^c Recherches Forestières Méditerranéennes, INRA, 20 Avenue Antonio Vivaldi, 84000 Avignon, France

Received 3 July 2003; received in revised form 12 January 2004; accepted 15 January 2004

Abstract

This study explored the relationships between the initial moisture content of leaves and their spectral properties when dry. Foliage moisture content (FMC in % dry-weight (DW)) was measured in 864 samples of eight common Mediterranean tree and shrub species from two sites during the summers of 2001 and 2002. All samples were dried, ground and scanned using a near infrared reflectance spectrophotometer. There were close relationships between FMC and foliage absorbance in the 400–2500 nm spectral range. Calibrations involving search for predictive relationships between spectral data and FMC were performed using partial least squares (PLS) regression that took into account all the spectral information. Calibration on FMC in each species from each year was predictive when a sufficiently large range of FMC values were available ($R^2 = 0.93$ – 0.99 , standard error of cross-validation (SECV) = 2–7%). Moreover, calibration on FMC in all species combined, for each year or for both years together, was also predictive ($R^2 = 0.92$ – 0.95 , SECV = 7%). It was thus possible to estimate the initial moisture content of a fresh foliage sample from its spectral characteristics when dried, whatever the species. However, mean foliage spectral absorbance changed from 1 year to the other. Consequently, FMC in leaf samples from each year was not estimated with accuracy when using the calibration established on samples from the other year but was accurately estimated when using the calibration established on samples from both years together. These close relations between dried foliage spectral data and FMC meant that some biochemical properties of the leaves associated with the changes in leaf water status caused changes in spectral reflectance which was preserved in the dried samples.

© 2004 Elsevier B.V. All rights reserved.

Keywords: Foliage moisture content; Mediterranean species; Infrared spectroscopy; Statistical calibration

1. Introduction

Under a Mediterranean climate, hot dry summers make forests and shrublands susceptible to wildfires. Current fire prevention systems aim at forecasting and locating fire risk, and one of the important variables to take into account is fuel moisture content. Currently fuel moisture content is obtained from field surveys but this method is limited at a temporal and spatial local scale. Because many studies have shown that

* Corresponding author. Tel.: +33-4-6761-3292;
fax: +33-4-6741-2138.

E-mail addresses: dominique.gillon@cefe.cnrs-mop.fr (D. Gillon),
dauriac@teledetection.fr (F. Dauriac), deshayes@teledetection.fr
(M. Deshayes), jean-charles.valette@avignon.inra.fr (J.C. Valette),
claudio.moro@avignon.inra.fr (C. Moro).

¹ Fax: +33-4-6754-8700.

² Fax: +33-4-9013-5959.

foliage reflectance is related to its moisture content, remote sensor data could be a prime tool for measuring spatial and temporal variations in vegetation moisture content on larger areas. The ability to accurately estimate foliage moisture content (FMC) in vegetation using spectral reflectance measurements is an important goal for remote sensing research. It is important to increase knowledge at the leaf level for input into canopy reflectance models.

Water exhibits a number of absorption features in several spectral regions of fresh leaves. Several laboratory studies have found relationships between the amount of water contained in a leaf and its spectral reflectance in the optical region (see for example Thomas et al., 1971; Hunt et al., 1987; Hunt and Rock, 1989; Bowman, 1989; Carter, 1991; Cohen, 1991; Danson et al., 1992; Yu et al., 2000). These studies generally focused on the water absorption features of the spectrum in the visible to near infrared (VNIR: 400–1100 nm) and shortwave infrared (SWIR: 1100–2500 nm) of fresh leaves and many of them used spectral indices or ratios between reflectance values at specific wavelengths. They generally used detached leaves drying in the air to measure the changes in some spectral water absorption regions in relation to the decrease in leaf water content during the dehydration process. The changes in leaf spectral absorbance were then caused by the changes in the quantity of water and also in leaf structure and photosynthetic pigments; these spectral changes in detached leaves could not express any physiological or biochemical changes in the leaf due to the osmotic adjustment of the whole plant to water limitation. Variations among species and among individual leaves in leaf thickness, structure, dry matter and photosynthetic pigments gave rise to differences in leaf reflectance and contributed to the difficulty in relating reflectance measurements to the quantity of water in a leaf (Carter, 1991; Cohen, 1991; Ceccato et al., 2001). Moreover, when these spectral indices of leaf water content found in air-drying leaves were applied to leaves from plants subjected to water limitation, they were only affected by large changes in water content and could not detect the onset of leaf water stress (Thomas et al., 1971, Hunt et al., 1987). It is thus difficult to obtain relevant information about the spectral properties of the fresh leaf related to its physiological water status. The aim of this study was therefore to explore if, without using the spectral

features of water absorbance in leaves, the spectral data contained complementary information on the water status of leaves from plants experiencing water limitation in natural field conditions. In other terms, could the physiological and biochemical changes in the leaf due to the osmotic adjustment of the whole plant in response to water limitation be expressed by changes in its spectral absorbance? Using foliage from native Mediterranean plants growing in field conditions and subjected to summer water limitation, this study aimed at exploring the relationships between the spectral properties of dried leaves and their water status when fresh.

Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) of dried, ground samples in the 1100–2500 nm range has been widely used in agricultural and food research (Williams and Norris, 1990) and now covers a wider spectral band ranging from 400 to 2500 nm. In this range, light reflected by the organic matter gives a unique signature with important biochemical information about the character and number of functional groups such as $-CH$, $-OH$, and $-NH$ chemical bonds. Chemometric developments make it possible to unravel spectra and to calibrate NIRS signals, i.e., to relate the spectra of samples to their reference values. As the spectral reflectance in the visible and near infrared regions is closely related to the biochemical composition of a sample, NIRS is now not only widely used to determine plant biochemical composition but also has new applications in ecological studies (Foley et al., 1998).

In particular, it has been used to directly estimate some integrative parameters, like leaf tissue thickness and leaf mass per area (Ourcival et al., 1999), leaf age (Meuret et al., 1993), calorific value of forest fuels (Gillon et al., 1997), litter quality (Gillon et al., 1999; Joffre et al., 2001) and stage of decay (Gillon et al., 1993; Bouchard et al., 2003), without relying on estimates based on chemical composition. Any property that is suspected of being related to the chemical composition of plant material could potentially be modelled in this way. We thus made the assumption that the change in leaf moisture content due to soil water limitation was effectively related to change in its biochemical composition and therefore in its spectral properties. However, NIRS has never been used to estimate the fresh leaf moisture content from dried leaves.

To this end, spatial and temporal changes in the foliage moisture content of eight common Mediterranean species were measured in the summers of 2001 and 2002, at different sites in southern France. NIRS analyses were conducted on these samples when dried. Our objective was therefore to evaluate if the NIR spectral absorbance of these samples when dried was related to the initial moisture content of the fresh foliage in each species, and whatever the species or the year.

2. Materials and methods

2.1. Field data

Current year foliage samples from eight common Mediterranean tree and shrub species, *Quercus ilex* L. (QI, Fagaceae), *Q. coccifera* L. (QC), *Q. pubescens* Willd. (QP, only in 2002), *Cistus albidus* L. (CA, Cistaceae), *Juniperus oxycedrus* L. (JO, Cupressaceae), *Spartium junceum* L. (SJ, Leguminosae), *Arbutus unedo* L. (AU, Ericaceae), and *Erica arborea* L. (EA), were collected once or twice a week during summer 2001 and 2002. This foliage was representative of a range of characteristics: deciduous (QP) and evergreen (all other species) leaves, broad leaves (QI, QC, QP, CA, AU), acicular or needle-like leaves (JO, SJ, EA). Depending on year and species, samples were collected from June or July to September or October. QI, QC, QP, CA, JO and SJ samples were collected in a limestone region near Gignac (43°33'N, 3°39'E, 290 m a.s.l., 12 km NW from Montpellier) under a mesomediterranean bioclimate. AU and EA samples were collected at three different sites (A, B and C) located along an altitudinal gradient on the granite upland of the Maures massif (43°13'N, 6°22'E, 620 m a.s.l., 35 km NE from Toulon) under a supramediterranean bioclimate. Foliage samples were cut at mid-day, immediately put into hermetically sealed boxes, rapidly brought back to the laboratory and weighed; they were then oven-dried at 60 °C for 24 h, and weighed again. Foliage moisture content was calculated as % dry-weight (DW). At each sampling date in each site, FMC was measured on five random replicate samples of QI (in 2002), QC, CA, JO and SJ (2001 and 2002), and on seven (2001) and five (2002) replicate samples of AU and EA. In QI in 2001 and

QP in 2002, FMC was measured on composite leaf samples from individual trees without replicates. The reference method error (RME) was calculated for each species (except QI in 2001 and QP in 2002) and for all species combined as the mean standard deviation of differences between replicate samples in FMC values measured using the reference method (Williams, 1990), i.e. the weighing method in this study.

2.2. NIRS analysis

Depending on species, NIRS analyses were conducted on all samples collected or on at least 50 samples selected to cover the whole range of the FMC values. In this way, NIRS analyses took into account a total of 416 samples belonging to seven species in 2001 and 448 samples belonging to the same seven species plus QP in 2002 (Table 1). All these 864 dried samples were ground in a cyclone mill through a mesh size of 1 mm, and scanned using a NIR spectrophotometer (NIRSystems 6500, Silver Spring, MD, USA). For each measurement, 32 scans were made, at 2 mn intervals over a range from 400 to 2500 nm, to produce a mean spectrum with 1050 data points. Using a ceramic standard, an internal software evaluated the spectrum of the apparent reflectance (R). Then the spectral data recorded were processed and stored in absorbance units (A) equal to $\log(1/R)$. Data analysis was conducted using the ISI software system (Shenk and Westerhaus, 1991a).

2.3. Calibration procedures

The calibrations involved searching for predictive relationships between spectral data and FMC reference values. Calibration equations are mathematical transfer functions built using reference and spectral values of the calibration sample set and used to predict an unknown quantitative value Y from available spectroscopic measurements X (Martens and Naes, 1989).

Two calibration methods for FMC were compared on the 2001 samples (Gillon et al., 2002), one using stepwise regression on selected wavelengths and the other using partial least squares (PLS) regression that took into account all the spectral information. The PLS method of calibration was clearly more predictive than the stepwise method, as already demonstrated by Joffre et al. (1992), Bolster et al. (1996), Grossman

Table 1

Sample number, range, mean, standard deviation (S.D.) and reference method error (RME) of the measured values of foliage moisture content (in % dry-weight) in the sample sets collected during summer of 2001, 2002 and in all samples collected in both years

	<i>n</i>		Range		Mean		S.D.		RME	
	2001	2002	2001	2002	2001	2002	2001	2002	2001	2002
<i>Quercus ilex</i> (QI)	54	51	56–78	63–96	67.07	75.15	5.00	6.63	nd	1.47
<i>Quercus coccifera</i> (QC)	53	49	63–109	73–99	82.47	85.68	10.04	5.89	3.26	1.76
<i>Quercus pubescens</i> (QP)		39		84–126		99.38		8.66		nd
<i>Cistus albidus</i> (CA)	53	60	60–128	64–143	91.23	84.40	19.52	18.48	2.12	3.57
<i>Juniperus oxycedrus</i> (JO)	52	49	68–120	66–121	88.17	87.74	11.75	11.35	2.84	4.73
<i>Spartium junceum</i> (SJ)	52	50	89–133	103–149	110.36	118.21	12.69	11.69	3.44	3.13
<i>Arbutus unedo</i> (AU)	76	75	62–146	104–161	106.55	124.86	22.02	11.46	3.26	2.59
<i>Erica arborea</i> (EA)	76	75	38–119	75–124	73.37	93.86	22.70	13.04	1.89	1.80
All species	416	448	38–146	63–161	88.52	97.29	22.53	20.51	2.78	2.62
All species 2001 + 2002	864		38–161		93.07		21.94		2.72	

nd, not determined.

et al. (1996) and Ourcival et al. (1999). Moreover, after comparison of different procedures in the PLS regressions, FMC estimation was more accurate when (1) the full spectrum was taken into account rather than just the shortwave IR region (SWIR: 1100–2500 nm) or the visible to near infrared region (VNIR: 400–1100 nm), (2) pre-processing of the spectral data was applied and (3) when using the first or the second derivative of the spectral data rather than the raw data.

Consequently the PLS method of calibration (Martens and Jensen, 1982; Shenk and Westerhaus, 1991b) was chosen. PLS is a combination of principal component analysis and multiple linear regression. By reducing the large set of raw spectral data into a small number of orthogonal factors, PLS avoided problems of over-fitting and collinearity (Martens and Naes, 1989). Two methods of pre-processing the spectral data were applied, standard normal variate (SNV) and detrending transformation (Barnes et al., 1989). Pretreatment of the spectra by calculation of the SNV transformation scaled each spectrum so that it had a standard deviation of 1.0 to help to reduce particle size effects. De-trending removed the linear and quadratic curvature of each spectrum by using a second-degree polynomial regression. PLS calibrations on FMC were then performed using the first-order or second-order derivative data from the whole spectrum after a complete pre-processing (SNV + de-trend).

Two series of calibrations were processed:

- (1) Species-specific calibrations for each species and each year. Because of the low number of

samples of each species in each year (39–76), calibrations were developed for FMC on whole sets of each species to obtain species-specific calibration equations.

- (2) Multi-species calibrations for all species combined in each year and in both years together. The data sets were split into calibration sets (1/2 of the samples by taking every second sample) over which the multi-species calibrations were performed, and validation sets (other 1/2 of the samples) over which the calibration equations were applied.

For all species-specific and multi-species calibrations, cross-validation was used to estimate the optimal number of terms in the calibrations to avoid over-fitting. This consisted of selecting three-quarters of the samples in the calibration set to develop the model and one-quarter for the prediction. The algorithm was repeated four times, and all the residuals of the four predictions were pooled to provide a standard error of cross-validation (SECV) on independent samples. The minimum SECV determined the number of terms to be used. Samples with large cross-validation residuals are usually omitted, and the cross-validation performed again. The cycle of omitting samples with large residuals, followed by another cross-validation, was performed twice. The final model was then recalculated with all the samples to obtain the standard error of calibration (SEC). For each calibration, six mathematical treatments, corresponding to the first and second derivative and a gap of 4, 8 and 12 data points,

were compared. After comparison of the results of various treatments, the calibration equation that gave the best results in terms of SECV was selected. For the three multi-species calibrations (2001, 2002 and 2001 + 2002), the calibration equations were then applied to the validation sets to obtain a standard error of prediction (SEP).

2.4. Interpretation of statistical evaluation of NIR analysis

In the calibrations, the SEC and the coefficient of determination R^2 of the regression between the reference values and the values estimated by the model were measures of closeness of fit between reference and NIR data (Shenk and Westerhaus, 1996). On the other hand, SECV and SEP were true estimates of the prediction capability of the calibration equation because they were calculated on independent samples. According to Williams (1990), if the SECV or the SEP values approached the standard deviation (S.D.) of the

reference values, the NIRS calibration equation was not a very efficient predictor; ratios of S.D./SECV or S.D./SEP = 3 seemed to him a reasonable threshold above which to use NIRS calibration equations.

The error in estimating FMC from the NIR spectral data, measured by the values of SECV or SEP, was compared to the reference method error. Calculated from field replicate samples, RME was mainly representative of the heterogeneity of FMC in the plant material. The NIRS method cannot be more accurate than the reference method, so the RME is the practical lower limit for the SECV or SEP (Williams, 1990).

3. Results

3.1. Foliage moisture content

Summer climatic conditions in this study varied greatly, being much drier in 2001 than in 2002 and in the Maures region than in Gignac sites (Fig. 1).

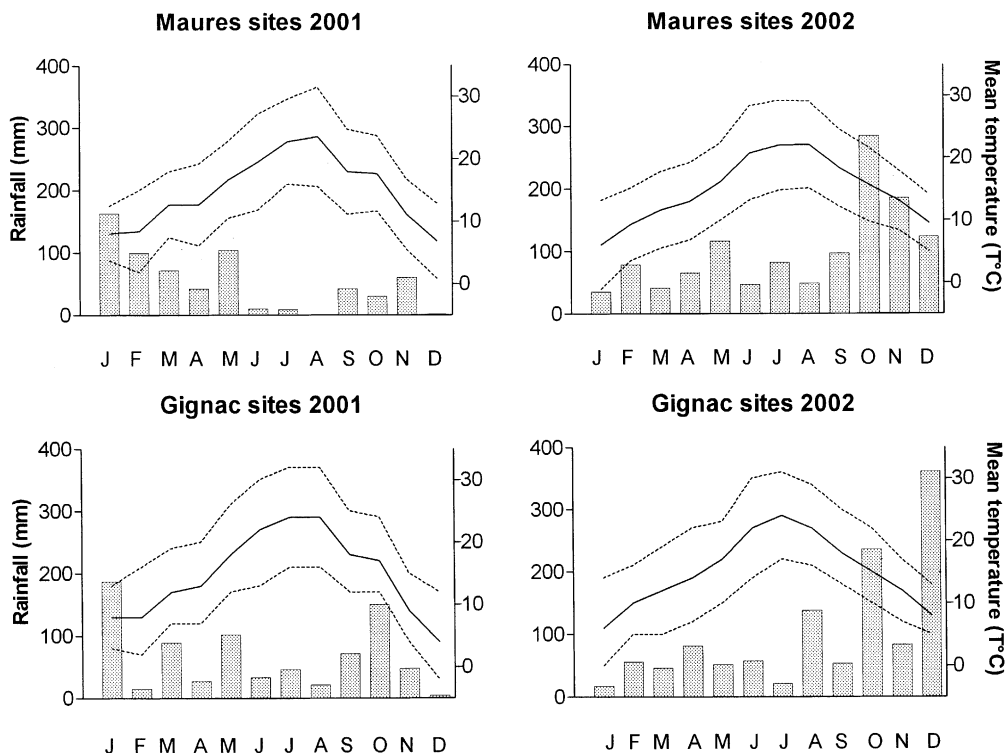


Fig. 1. Monthly rainfall, and minimum, mean, maximum temperatures in 2001 and 2002 near the sampling sites. Data from the Gignac meteorology station for the Gignac sites, and from the Ruscas meteorology station for the Maures massif sites.

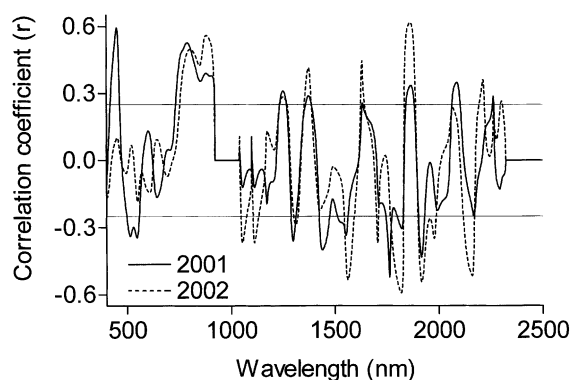


Fig. 2. Correlation between foliage moisture content from all samples collected in summer 2001 ($n = 416$) and 2002 ($n = 448$) and second derivative of dry foliage leaf absorbance at each wavelength. Ninety-nine percent confidence limits are shown at ± 0.25 .

Total rainfall of June, July and August, the hottest months, was 100 mm in 2001 compared to 216 mm in 2002 in the Gignac sites, and 19 mm in 2001 compared to 178 mm in 2002 in the Maures sites. During summer 2001, the measured FMC values in all seven species varied from 38 to 146%, i.e., a range of variation of 108%; but this range depended on the species

(Table 1). It was low in QI (22%), moderate in QC, CA, JO and SJ (44–68%), and large in AU and EA (more than 80%). During summer 2002, the mean FMC values in almost all species were higher. The range of values was low in QC, QI and QP (26–42%) and moderate in all other species (46–79%). The higher rainfall in summer 2002 resulted in a lower S.D. for the FMC reference values than in summer 2001.

3.2. Relations between FMC and spectral data

There were close relationships between FMC and spectral data from all species combined in each year (Fig. 2). Several spectral regions in the visible, near IR and shortwave IR domains were significantly correlated with FMC and they were almost the same regions for both years (for example 750–900 and 1800–1900 nm).

3.3. Species-specific PLS calibrations

PLS calibrations for FMC were first monitored on all samples of each species in each year (Table 2).

Table 2

Statistics of the species-specific partial least squares calibrations on foliage moisture content (in % dry-weight) in *Quercus ilex* (QI), *Q. coccifera* (QC), *Q. pubescens* (QP), *Cistus albidus* (CA), *Juniperus oxycedrus* (JO), *Spartium junceum* (SJ), *Arbutus unedo* (AU) and *Erica arborea* (EA)

Species	n	Mean	S.D.	SEC	R^2	SECV	S.D./SECV	SECV/RME	Math
2001									
QI	53	67.07	5.05	1.95	0.85	2.72	1.86	nd	1, 8, 4
QC	50	81.75	9.80	1.41	0.98	3.41	2.87	1.05	2, 4, 4
CA	50	90.29	18.45	2.43	0.98	5.19	3.55	2.44	2, 4, 4
JO	47	87.36	10.99	1.44	0.98	2.02	5.44	0.71	2, 12, 8
SJ	50	109.88	12.55	3.28	0.93	3.78	3.32	1.10	1, 12, 8
AU	73	106.21	22.40	4.25	0.96	5.69	3.94	1.75	1, 4, 4
EA	73	73.10	23.12	2.70	0.99	3.95	5.84	2.09	1, 4, 4
2002									
QI	47	73.92	5.17	2.78	0.71	2.90	1.79	1.97	1, 8, 8
QC	49	85.68	5.89	3.95	0.55	5.53	1.07	3.14	1, 12, 8
QP	39	99.38	8.66	1.90	0.95	3.73	2.32	nd	2, 4, 4
CA	58	83.21	17.10	3.22	0.96	6.58	2.60	1.84	2, 8, 4
JO	46	87.04	9.66	1.09	0.99	2.47	3.91	0.52	2, 4, 4
SJ	48	118.04	11.57	1.45	0.98	3.80	3.04	1.21	2, 4, 4
AU	72	124.04	10.63	2.84	0.93	4.00	2.66	1.54	1, 12, 4
EA	72	93.62	12.75	2.05	0.97	3.45	3.70	1.92	2, 8, 8

S.D., standard deviation of the measured values; SEC, standard error of calibration; SECV, standard error of cross-validation; RME, reference method error; math, indicates the mathematical transformation of the spectral data: the first number is the order of the derivative function, the second is the segment length in data points over which the derivative was taken, and the third is the segment length over which the function was smoothed. nd, not determined.

Table 3

Statistics of the multi-species partial least squares calibrations on foliage moisture content (FMC in % dry-weight) from the calibration sets containing half of the 2001, 2002, and 2001 + 2002 samples and of FMC estimation using the calibration equations on the independent samples of the validation sets containing the other half of the samples

	<i>n</i>	Mean	S.D.	SEC	SECV	SEP	Bias	R^2	S.D./SECV, S.D./SEP	SECV/RME, SEP/RME	Math
2001											
Calibration	200	87.48	22.46	5.43	6.62			0.94	3.39	2.38	2, 12, 12
Validation	200	88.49	22.19			7.15	0.09	0.90	3.10	2.57	
2002											
Calibration	213	96.97	20.39	4.78	6.54			0.95	3.12	2.50	1, 4, 4
Validation	214	95.85	19.58			6.47	0.01	0.89	3.03	2.47	
2001 + 2002											
Calibration	412	92.04	21.66	6.29	7.06			0.92	3.07	2.60	1, 4, 4
Validation	414	92.30	21.18			7.11	0.48	0.89	2.98	2.61	

S.D., standard deviation of the measured values; SEC, standard error of calibration; SECV, standard error of cross-validation; SEP, standard error of prediction; bias, mean difference between estimated and measured values; RME, reference method error; math, mathematical transformation of the spectral data (see Table 2).

Some samples with large cross-validation residuals were omitted. Except for QI in 2001 and for QI, QC and QP in 2002, the species-specific calibrations between spectral data and FMC values were predictive: R^2 of the linear regression between measured values and values estimated by the model varied from 0.93 to 0.99, SECV values from 2.0 to 6.6%, i.e., values 2.6–5.8 times lower than the standard deviation of the measured values. For QI in 2001 and for QI, QC and QP in 2002, due to the low range of FMC values, the calibration of FMC was less predictive (S.D./SECV < 2.5). Except for QC in 2002, the ratio of SECV to reference method error ranged from 0.5 to 2.4.

3.4. Multi-species PLS calibrations

PLS calibrations of FMC in all species combined from each year were predictive: R^2 of 0.94 and 0.95, SECV of 6.5 and 6.6%, S.D./SECV larger than 3 (Table 3). Using these calibration equations, estimation of FMC on the independent samples of the validation sets was accurate: R^2 of 0.89 and 0.90, SEP of 6.5 and 7.2%, bias near to zero, and S.D./SEP larger than 3. The predictive capability of FMC calibration on all species from both years together and the accuracy of FMC estimation in the validation set were of the same range (Table 3 and Fig. 3). Compared to RME, SECV and SEP values of these three multi-species calibrations were 2.4–2.6 times larger.

In estimating the predictive capability of the multi-species calibrations, it must be kept in mind that taking alternate samples for calibration and validation, as is commonly done in NIRS studies, can lead to an overestimate of the success of the predictions. In estimating FMC in the validation sets, SEP values were generally larger than SECV values of the calibrations, and R^2 values obtained were lower than the R^2 values of the calibrations. This result is common in NIRS studies because samples with large cross-validation residuals were omitted during the

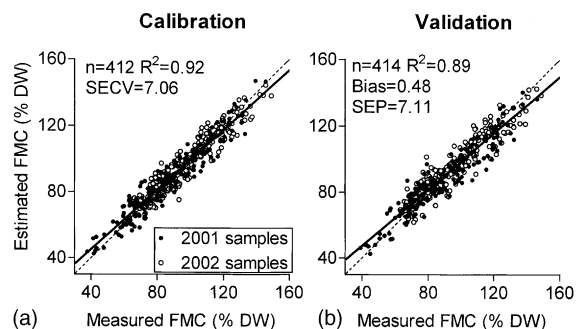


Fig. 3. (a) Multi-species partial least squares calibration on foliage moisture content (FMC in % dry-weight) from the calibration set containing half of the 2001 + 2002 samples and (b) FMC estimation using the calibration equation on the independent samples of the validation set containing the other half of the 2001 + 2002 samples. Dotted line, 1:1 line. SECV, standard error of cross-validation. SEP, standard error of prediction.

calibration process whereas all samples of the validation sets were used in the prediction process and then in the calculation of SEP and R^2 .

3.5. Comparison between the three multi-species calibration equations

The three multi-species calibration equations were applied to the independent samples of each of the 2001 and 2002 validation sets (Fig. 4). FMC estimation on the 2001 validation set was accurate when using the 2001 equation, but was inaccurate when using the 2002 equation (large SEP, low R^2).

In the same way, FMC estimation on the 2002 validation set was accurate when using the 2002 equation, but was inaccurate when using the 2001 equation. However, when using the 2001 + 2002 equation, FMC estimation in the 2001 and 2002 validation sets was accurate (SEP of 7.1%, bias < 1%, R^2 of 0.90

and 0.87, respectively, S.D./SEP of 3). Thus, FMC can be estimated by using a calibration equation established from sets including samples collected from the same year. For example, the large changes with time in FMC values of *Erica arborea* during summer 2001 were accurately estimated using the 2001 and 2001 + 2002 multi-species equations; in the same way the slight changes in FMC during summer 2002 were accurately estimated using the 2002 and the 2001 + 2002 calibration equations (Fig. 5).

4. Discussion

4.1. Relations between foliage moisture content and its spectral characteristics when dried

Foliage from the eight common species studied allowed us to take into account a large range of leaf

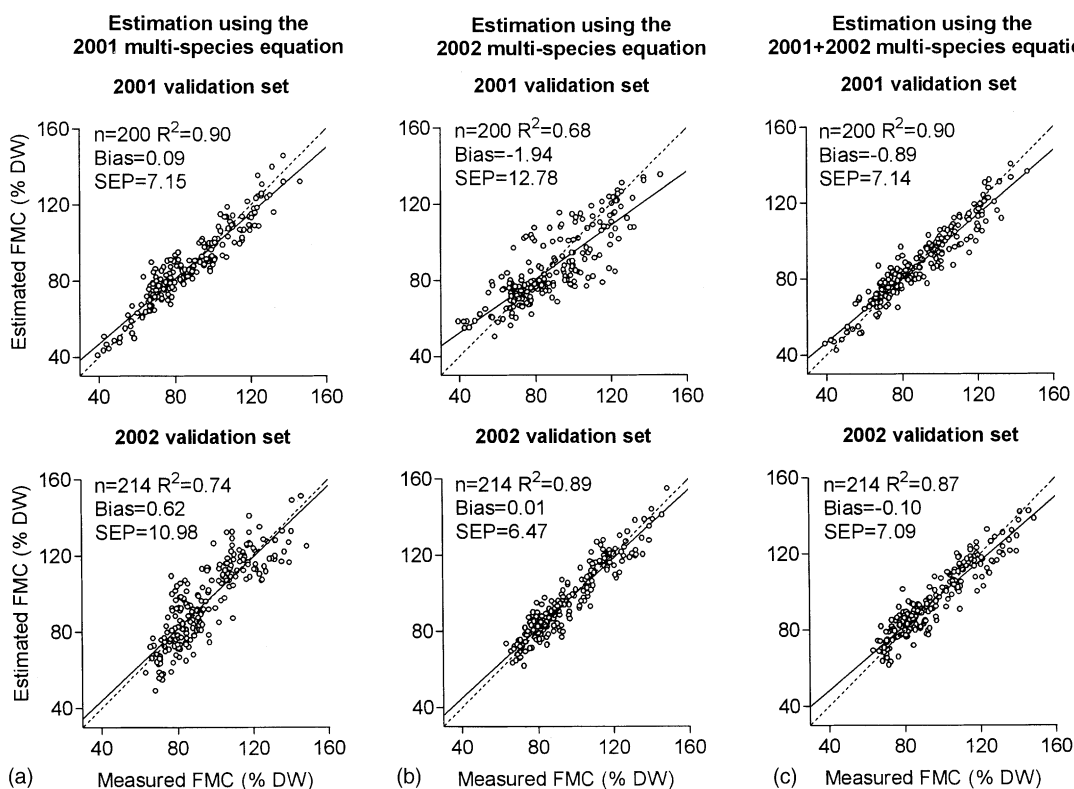


Fig. 4. Estimation of foliage moisture content (FMC in % dry-weight) on the independent samples of the 2001 and 2002 validation sets using (a) the 2001, (b) 2002 and (c) 2001 + 2002 multi-species calibration equations. Dotted line, 1:1 line. SEP, standard error of prediction.

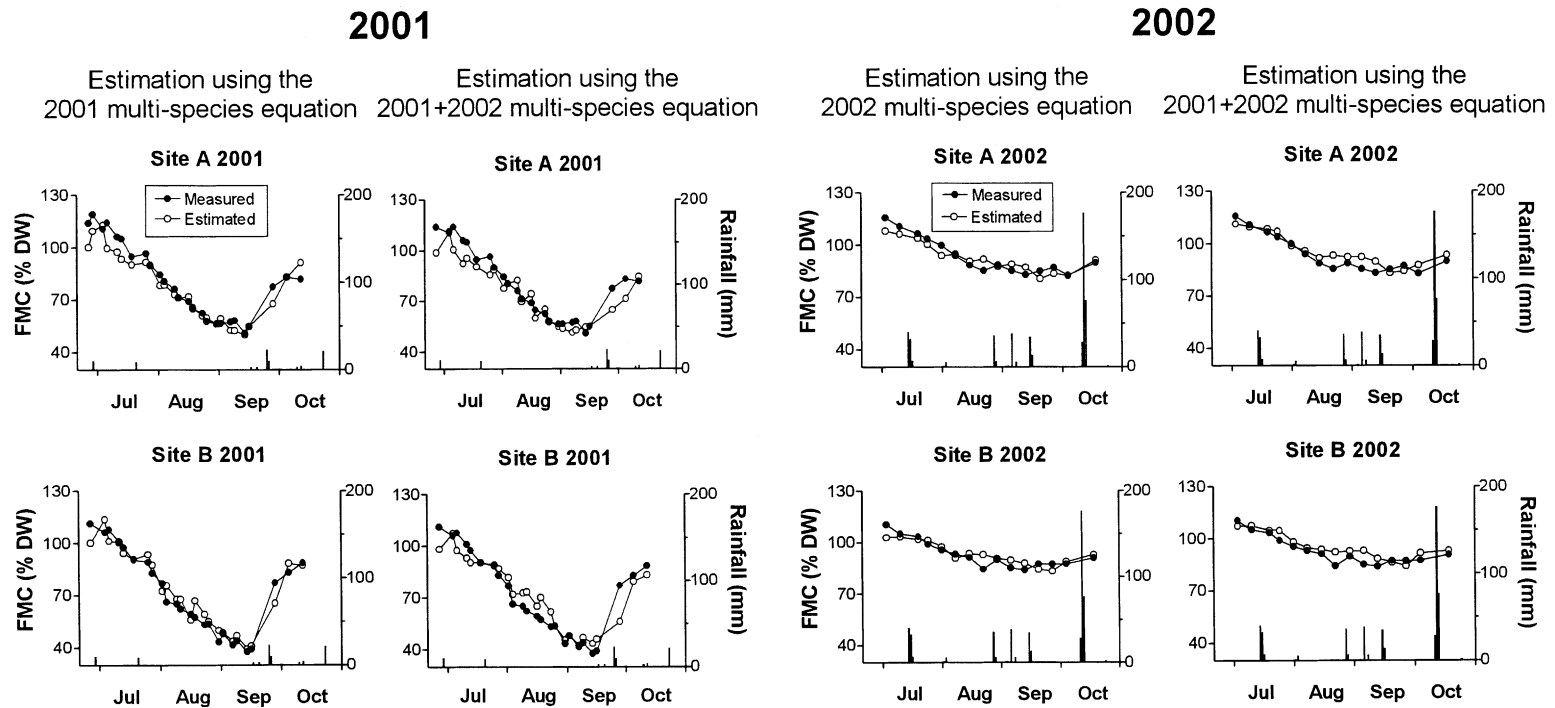


Fig. 5. Changes with time of the measured values of foliage moisture content (FMC in % dry-weight) in *Erica arborea* during summer of 2001 and 2002 from the sites A and B of the Maures massif and of the estimated values using the 2001, 2002, and 2001 + 2002 multi-species calibration equations.

characteristics (evergreen and deciduous, broad and needle-like leaves) from five different families, quite representative of the Mediterranean woody plant cover. It was collected in two different regions and throughout two summers with contrasting climatic conditions (Fig. 1), it was therefore representative of the variations in leaf water content during summer. The range of variation of the FMC values was large, from 38 to 161% DW (Table 1).

In all species together, leaf absorbance in several spectral regions was closely linked to foliage moisture content, and they were almost the same regions of the spectrum in both summers (Fig. 2). The initial moisture content of a fresh foliage sample was therefore closely related to its spectral characteristics when dried.

Using PLS methods, calibration of moisture content in each species in each year was predictive when a sufficient range of values was available. NIRS calibration of FMC was also predictive in all species combined, for each year and for both years together. This means that the spectral characteristics of the leaves varied in the same way in the different species according to their moisture content. It could be objected that the calibration equations took into account spectral characteristics related to the ageing process in leaves because, in most sets used in the calibrations, FMC values decreased with time during summer, and thus with leaf age. However, the recovery of NIRS estimated FMC values after the rains at the end of September 2001 in *Erica arborea* (Fig. 5), without the appearance of new leaves, demonstrated that the spectral characteristics taken into account in the calibrations were actually related to FMC. It is noteworthy that, compared to the measured values, a slight delay could be observed in the re-increase of the NIRS estimated values in September–October, as if the restoration of the spectral characteristics of the leaves after the first rains was processing more slowly than the input of water into leaf tissues. These results show that it was possible to estimate the initial moisture content of a fresh foliage sample from its spectral characteristics when dried, and this was true whatever the species. However, the error in the NIRS estimation of FMC was about 2.5 times larger than the error due to the heterogeneity of FMC in field plant material (error measured by the weighing method).

These close relations between foliage spectral data and FMC mean that some biochemical properties of the leaves varied in the same way in the different species in relation to their moisture content. A number of studies (see Lawlor and Cornic, 2002) have shown that plants experiencing a water deficit have a similar metabolic adjustment to maintain a positive turgor as cell water content and leaf water potential decrease. This osmotic adjustment generally involves an active increase in the number of solute molecules per cell. The fact that the same spectral information was related to the same level of leaf moisture content in the eight species studied could mean that some solute molecules involved in the osmotic adjustment were shared by all these species. Sugars and amino acids are major constituents of osmoregulation in leaves of many species; changes in potassium may also occur in concert with changes in sugars and amino acids (Morgan, 1984). Further studies would be needed to identify the chemical compounds involved in the shared changes in the leaf spectral absorbance in relation to FMC.

4.2. Between-year spectral differences in foliage

The mean spectrum of all species combined was different from 1 year to the other; in the summer of 2001 foliage absorbance was on average lower in almost all the spectral regions than in 2002 (not shown). This means that leaf biochemical composition changed from 2001 to 2002. The cause could be the differences in climatic conditions and soil water availability between summer 2001 and 2002, but probably also in the climatic conditions before summer that determined plant growth, leaf biochemical composition and phenological processes. It is now well known that the spectral characteristics of a foliage change with its phenological phase so much that it is possible to calibrate leaf-age using NIRS (Meuret et al., 1993). Consequently, the multi-species calibration equation performed on samples from 1 year was predictive for estimating FMC in samples from the same year, but estimated FMC values in samples from the other year with a large error (Fig. 4). The multi-species calibration carried out on the grouped 2001 and 2002 samples took into account these inter-annual spectral differences and selected from the FMC-related spectral data only that information that was shared by all samples from both years. This calibration

equation then allowed us to accurately estimate FMC in both the 2001 and 2002 samples. It is hoped that this 2-year multi-species calibration, established on samples which were subjected to contrasted summer climatic conditions, will be predictive for foliage under a range of different summer climatic conditions. To obtain an accurate calibration equation for each new year, it should be necessary to reintroduce new samples (NIR spectra with their reference values) in the calibration set and to perform a new calibration.

5. Conclusions

Foliage used in this study was representative of the plant cover of the Mediterranean region during summer. Leaf moisture content was measured on fresh leaves and spectral absorbance was measured on dried and ground leaves. This study showed that, in the spectral range from 400 to 2500 nm, there were close relations between spectral absorbance (or reflectance) of dried leaves and their moisture content when fresh, whatever the species. The biochemical changes associated with the changes in leaf water status caused changes in spectral reflectance which was preserved in the dried samples. Estimates of leaf water status derived from reflectance data without using the water absorption features could give new spatial and scale perspectives at the leaf and plant cover level.

Acknowledgements

We thank Angela Iglesias Rodrigo and Asuncion Roldan Zamarron for their help in field and laboratory work. We would like also to thank three anonymous reviewers and J.B. Stewart, Regional Editor, for their constructive comments. This study was a part of project from the SIG "Forest Wildfires" and was funded by the French Ministry of Agriculture (Contract No. 61.45.11/01).

References

- Barnes, R.J., Dhanoa, M.S., Lister, S.J., 1989. Standard normal variate transformation and detrending of NIR spectra. *Appl. Spectrosc.* 43, 772–777.
- Bolster, K.L., Martin, M.E., Aber, J.D., 1996. Determination of carbon fraction and nitrogen concentration in tree foliage by near infrared reflectance: a comparison of statistical methods. *Can. J. For. Res.* 26, 590–600.
- Bouchard, V., Gillon, D., Joffre, R., Lefeuvre, J.C., 2003. Actual litter decomposition rates in salt marshes measured using near-infrared reflectance spectroscopy. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 28, 1–15.
- Bowman, W.D., 1989. The relationship between leaf water status, gas exchange, and spectral reflectance in cotton leaves. *Remote Sens. Environ.* 30, 249–255.
- Carter, G.A., 1991. Primary and secondary effects of water content on spectral reflectance of leaves. *Am. J. Bot.* 78, 916–924.
- Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemoud, S., Gregoire, J.M., 2001. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sens. Environ.* 77, 22–33.
- Cohen, W.B., 1991. Temporal versus spatial variation in leaf reflectance under changing water stress conditions. *Int. J. Remote Sens.* 12, 1865–1876.
- Danson, F.M., Steven, M.D., Malthus, T.J., Clark, J.A., 1992. High-spectral resolution data for determining leaf water content. *Int. J. Remote Sens.* 13, 461–470.
- Foley, W.J., McIlwee, A., Lawler, I., Aragones, L., Woolnough, A.P., Berding, N., 1998. Ecological applications of near infrared reflectance spectroscopy—a tool for rapid, cost-effective prediction of the composition of plant and animal tissues and aspects of animal performance. *Oecologia* 116, 293–305.
- Gillon, D., Joffre, R., Dardenne, P., 1993. Predicting the stage of decay of decomposing leaves by near infrared reflectance spectroscopy. *Can. J. For. Res.* 23, 2552–2559.
- Gillon, D., Hernando, C., Valette, J.C., Joffre, R., 1997. Fast estimation of the calorific values of forest fuels by near-infrared reflectance spectroscopy. *Can. J. For. Res.* 27, 760–765.
- Gillon, D., Joffre, R., Ibrahima, A., 1999. Can litter decomposability be predicted by near infrared reflectance spectroscopy? *Ecology* 80, 175–186.
- Gillon, D., Dauriac F., Deshayes, M., Valette, J.C., Moro, C., 2002. Foliage moisture content and spectral characteristics using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS). In: IV International Conference on Forest Fire Research and Wildland Fire Safety. Millpress Science Publishers, Rotterdam, The Netherlands, p. 127 and CD-Rom.
- Grossman, Y.L., Ustin, S.L., Jacquemoud, S., Sandersen, E.W., Schmuck, G., Verdebout, J., 1996. Critique of stepwise multiple linear regression for the extraction of leaf biochemistry information from leaf reflectance data. *Remote Sens. Environ.* 56, 182–193.
- Hunt, E.R., Rock, B.N., 1989. Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances. *Remote Sens. Environ.* 30, 43–54.
- Hunt, E.R., Rock, B.N., Nobel, P.S., 1987. Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote Sens. Environ.* 22, 429–435.
- Joffre, R., Gillon, D., Dardenne, P., Agneessens, R., Biston, R., 1992. The use of near-infrared reflectance spectroscopy in litter decomposition studies. *Ann. Sci. For.* 49, 481–488.

- Joffre, R., Ågren, G.I., Gillon, D., Bosatta, E., 2001. Organic matter quality in ecological studies: theory meets experiment. *Oikos* 93, 451–458.
- Lawlor, D.W., Cornic, G., 2002. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant Cell Environ.* 25, 275–294.
- Martens, H., Jensen, S.A., 1982. Partial least squares regression: a new two-stage NIR calibration method. In: *Proceedings of the 7th World Cereal Bread Congress*. Elsevier, Amsterdam, pp. 607–647.
- Martens, H., Naes, T., 1989. *Multivariate Calibration*. Wiley, Chichester, UK.
- Meuret, M., Dardenne, P., Biston, R., Poty, O., 1993. The use of NIR in predicting nutritive value of Mediterranean tree and shrub foliage. *J. Near Infrared Spectrosc.* 1, 45–54.
- Morgan, J.M., 1984. Osmoregulation and water stress in higher plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 35, 299–319.
- Ourcival, J.M., Joffre, R., Rambal, S., 1999. Exploring the relationships between reflectance and anatomical and biochemical properties in *Quercus ilex* leaves. *New Phytol.* 143, 351–364.
- Shenk, J.S., Westerhaus, M.O., 1991a. ISI NIRS-2 software for near-infrared instruments. Infracore International, Silverspring, USA.
- Shenk, J.S., Westerhaus, M.O., 1991b. Population definition, sample selection, and calibration procedures for near-infrared reflectance spectroscopy. *Crop Sci.* 31, 469–474.
- Shenk, J.S., Westerhaus, M.O., 1996. Calibration the ISI way. In: Davies, A.M.C., Williams, P.C. (Eds.), *Near Infrared Spectroscopy: The Future Waves*. NIR publications, Chichester, UK, pp. 198–202.
- Thomas, J.R., Namken, L.N., Oerther, G.F., Brown, R.G., 1971. Estimating leaf water content by reflectance measurements. *Agron. J.* 63, 845–847.
- Williams, P.C., 1990. Variables affecting near-infrared reflectance spectroscopic analysis. In: Williams, P., Norris, K. (Eds.), *Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*. American Association of Cereal Chemists Inc, Minnesota, USA, pp. 143–167.
- Williams, P.C., Norris, K., 1990. *Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*. American Association of Cereal Chemists Inc, Minnesota, USA.
- Yu, G.R., Miwa, T., Nakayama, K., Matsuoka, N., Kon, H., 2000. A proposal for universal formulas for estimating leaf water status of herbaceous and woody plants based on spectral reflectance properties. *Plant Soil* 227, 47–58.

ANNEXE 7. PROPRIÉTÉS SPECTRALES D'UNE GARRIGUE À L'AIDE D'UN RADIOMÈTRE CIMEL

Le site d'étude est localisé près de Montpellier sur une zone de 2x2 km² (coordonnées du centre : 43°35'N-3°39'E) sur un plateau calcaire (cause d'Aumelas) de 300 mètres d'altitude. Ce site est principalement couvert d'une garrigue composée de chêne vert, chêne kermès, ciste, romarin, genêt, arbousier... Le climat est méditerranéen, caractérisé par une sécheresse estivale marquée. Les précipitations annuelles varient de 700 à 900 mm.

L'objectif de l'étude est d'étudier par radiométrie les propriétés spectrales d'une garrigue à **chêne kermès QC** (*Quercus coccifera*) et d'un **taillis de chêne vert QI** (*Quercus ilex*). On distingue quatre composantes principales de couverture du sol : des pieds de chêne kermès QC, des pieds de chêne vert QI, de l'herbe à brachypodes rameux HBR et des zones caillouteuses calcaires CC.

La réflectance de chaque objet « type » est mesurée au moyen d'un radiomètre CIMEL simulant le capteur HRV du satellite SPOT. Conjointement à ces données radiométriques, un suivi de terrain de la teneur en eau (FMC) des deux chênes QC et QI nous permet de déterminer la variabilité spatiale de la teneur en eau de la garrigue et du taillis.

1. PROTOCOLE D'ANALYSE

A. Le radiomètre CIMEL

Nous utilisons le radiomètre CIMEL CE 310, simulant SPOT-HRV, qui effectue des mesures dans le domaine spectral 400-1100 nm. Les bandes spectrales du radiomètre sont voisines de celles du capteur HRV, à savoir de 500 à 590 nm pour XS1, de 610 à 680 nm pour XS2 et de 790 à 890 nm pour XS3.

Il est composé d'une tête de mesure de luminance orientée vers le sol, d'un mât réglable de 4 mètres de haut pour soutenir cette tête et d'un boîtier de lecture directe de la luminance pour chacun des 3 canaux SPOT : XS1 (*Vert*), XS2 (*Rouge*) et XS3 (*Proche infrarouge*).

Chaque canal comprend une fenêtre d'entrée de champ de visée circulaire. Connaissant l'angle d'ouverture de la tête de mesure ainsi que la largeur du pixel au sol souhaitée, on détermine la hauteur du mât sur lequel sera attachée cette même tête (*Équation 1*).

$$\text{Équation 1.} \quad H = \frac{P}{2 \tan \frac{\alpha}{2}},$$

avec H la hauteur du mât en mètre,

P la longueur du côté du pixel au sol en mètre,

α l'angle d'ouverture circulaire de la tête de mesure en degré.

Ainsi, avec un angle de 12°, pour couvrir une surface au sol de 0,25 m² (pixel de 0,5 m de côté), la tête de mesure de luminance du radiomètre doit être située à 2,38 m de la cible.

Avant de calculer la réflectance des différents couverts présents sur le site d'étude, rappelons quelques notions de physique du rayonnement.

B. Notions sur le rayonnement solaire

L'éclairement

On caractérise le rayonnement qui arrive sur un objet par la notion d'**éclairement**. C'est une puissance reçue par unité de surface, d'unité le W.m^{-2} . L'éclairement global G , en un point sur une surface horizontale, est fonction des éclairements direct et diffus selon la relation suivante :

Équation 2. $G = I \cdot \sin h + D,$

avec h la hauteur angulaire du soleil en degré,

I l'éclairement direct en W.m^{-2} ,

D l'éclairement diffus en W.m^{-2} .

La Luminance

La luminance L est l'énergie renvoyée lors d'un éclairement par unité de surface :

Équation 3. $L = \frac{I}{da \cdot \cos \theta},$

avec I l'éclairement direct en W.m^{-2} ,

da l'unité de surface,

θ l'angle entre la verticale et la direction de propagation du faisceau réfléchi.

La réflectance

On caractérise la réflectance d'un objet comme étant le rapport de la luminance (Équation 3) sur l'éclairement (Équation 2). Ainsi :

Équation 4. $R = \frac{L}{G}.$

Hypothèses de simplification des calculs

En premier lieu, on considère le rayonnement direct comme étant majoritaire par rapport au diffus ($I \gg D$) qui est donc négligé. En second lieu, on néglige le rayonnement bidirectionnel en supposant une seule valeur d'éclairement selon la verticale $h = 90^\circ$ (soleil à la verticale). On a donc $\sin h = 1$. Ainsi dans l'Équation 2, $G = I$.

Les mesures radiométriques ont été effectuées en un laps de temps très court (quelques secondes), les conditions d'éclairement (ciel dégagé) sont donc restées inchangées pendant chaque mesure : G est considéré comme **stable**.

Détermination de la réflectance de terrain

Notre but premier est de déterminer la réflectance de terrain, à partir des données de luminance, d'éclairement et de réflectance énumérées précédemment.

Deux types de luminance sont mesurés par le radiomètre CIMEL : la luminance de terrain L_{ter} et la luminance de référence L_{ref} . L'Équation 4 devient :

Équation 5. $R_{ter} = \frac{L_{ter}}{G_t}$

Équation 6.
$$R_{réf} = \frac{L_{réf}}{G_{t+\varepsilon}}$$

Du fait des mesures effectuées en des temps t et $t + \varepsilon$ très proches, on a $G_t = G_{t+\varepsilon}$. On peut donc calculer la réflectance de terrain, en fonction de la réflectance de référence :

Équation 7.
$$R_{ter} = \frac{L_{ter} \cdot R_{réf}}{L_{réf}}$$

Ainsi, pour calculer la réflectance de terrain (Équation 7), nous avons besoin de connaître les paramètres de luminance et de réflectance d'une surface de référence. Nous utilisons comme référence un panneau Spectralon. Si la réflectance de cette surface de référence ne varie pas (diffuseur parfait), la luminance mesurée sur cette surface variera en fonction de la hauteur du soleil et des conditions atmosphériques (épaisseur optique).

C. Le panneau de réflectance Spectralon

D'une taille de 40 cm de côté, le panneau est recouvert d'une couche de polytétrafluoroéthylène (PTFE), qui procure une réflectance quasi unitaire ($R_{réf} > 99\%$ de 400 à 1300 nm) et lambertienne servant de référence. Son spectre de réflectance diffuse pour un éclairage à 8° . La courbe de calibration du panneau Spectralon (Figure 3) pour les longueurs d'ondes de 400 à 2450 nm permet de corriger les valeurs mesurées.

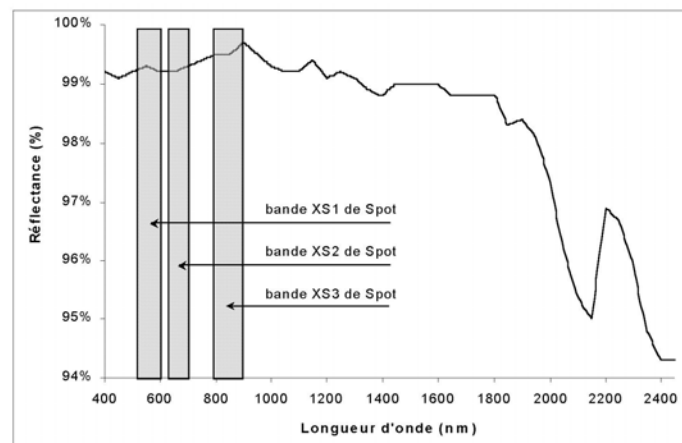


Figure 3. Réflectance du panneau Spectralon utilisée comme référence

La réflectance $R_{réf}$ du panneau varie de 94,3 à 99,8% sur la gamme 400-2400 nm.

Par intégration, on peut calculer le taux moyen de réflectance du panneau pour les trois bandes spectrales *Vert*, *Rouge* et *Proche infrarouge* du radiomètre simulant SPOT-HRV (Tableau 2).

Tableau 2. Réflectance moyenne du panneau Spectralon pour les trois bandes du radiomètre CIMEL

	V	R	PIR
Moyenne	99,25%	99,21%	99,53%

Ces valeurs nous permettent de corriger légèrement les mesures radiométriques du panneau et d'obtenir ainsi une vraie référence (réflectance à 100%) pour les trois canaux.

Ainsi en reprenant l'Équation 7, on peut calculer la réflectance de terrain pour chaque canal.

Application Numérique :

Valeur de luminance mesurée dans le canal 3 sur le panneau = 518

Valeur de luminance mesurée dans le canal 3 sur le terrain = 214

Réflectance moyenne du panneau dans le canal 3 = 99,53%

$$R_{ter} = \frac{L_{ter} \cdot R_{réf}}{L_{réf}} = \frac{214 \times 0,9953}{518} = 0,41 \text{ soit } 41\% \text{ de réflectance dans le canal XS3 (proche infrarouge).}$$

D. Précautions

Un simple voile nuageux peut changer radicalement le rayonnement diffus et donc par-là même la réflectance. Par conséquent, toutes les mesures ont été effectuées par temps parfaitement clair et en un même instant donné, ceci pour que l'éclairement G soit constant. Quatre séries de mesures ont été réalisées pendant l'été 2001 (20 et 26 juillet, 21 août et 17 septembre) représentant un total de 138 mesures (pour chaque canal).

Chronologiquement, pour chaque mesure il faut (Figure 4) :

- positionner le mât sur une zone de couvert homogène d'1 mètre carré minimum,
- placer la tête de luminance à 2,38 mètres au-dessus du couvert à mesurer,
- effectuer une mesure de référence en positionnant le panneau de Spectralon 50 cm sous la tête de mesure et noter la valeur de chaque canal,
- effectuer une mesure du couvert et noter la valeur de chaque canal,
- photographier le site,
- noter la position géographique (D-GPS, précision sub-métrique).



Figure 4. Instruments utilisés pour la mesure de réflectance d'un couvert

Un minimum de 10 répétitions par mesure et par type de couvert est nécessaire à chaque campagne pour pouvoir calculer une moyenne représentative.

Nous estimons les réflectances de surfaces homogènes (*Figure 5*) représentatives des composantes de l'occupation du sol (sol, cailloux, végétaux), dans le but de pouvoir calculer des réflectances caractéristiques de ces diverses composantes.

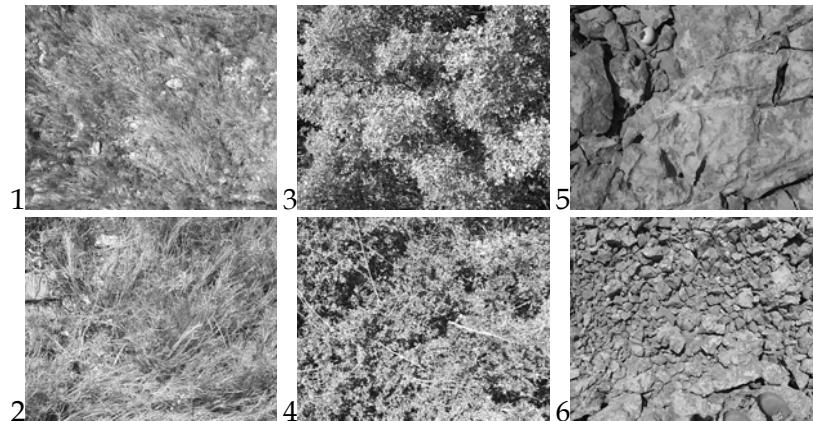


Figure 5. Exemple de photographies de couverts types (1-2 : herbe, 3-4 : chêne kermès, 5-6 : roches calcaires)

2. RÉSULTATS

A. Simplification du protocole

Au cours des premières mesures (20 et 26 juillet 2001), le canal *Vert* du radiomètre fonctionne par intermittence. De plus, lorsque ce canal enregistre des valeurs, on constate de grandes similitudes entre les réflectances des canaux *Vert* et *Rouge* du radiomètre (r^2 de 99% pour 63 mesures).

Pour les couverts végétaux, les deux bandes visibles de SPOT-HRV sont toujours fortement corrélées. Ce n'est donc pas gênant de ne conserver que les réflectances dans les canaux XS2 et XS3 (*Rouge* et *Proche infrarouge*) pour l'étude.

B. Réflectances des différents couverts

On différencie bien les quatre types de couvert d'après leurs réflectances relevées à différentes périodes (*Figure 6*).

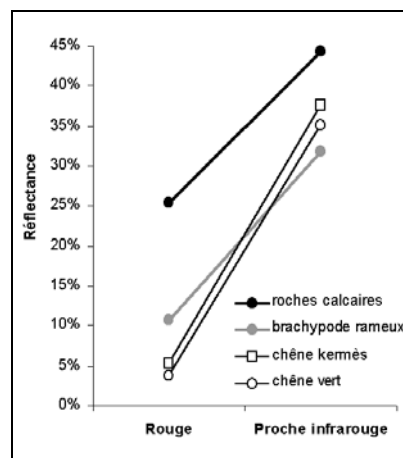


Figure 6. Réflectance moyenne par type de couvert dans le Rouge et le Proche infrarouge

Parmi les réflectances mesurées, nous distinguons aisément roches calcaires, pelouses à brachypodes rameux et chênes. Par contre les deux chênes ont des réflectances proches dans le *Rouge* et le *Proche infrarouge* et sont difficilement différenciables avec le radiomètre utilisé.

Une autre méthode de représentation tient compte des combinaisons des deux réflectances par le calcul de cinq indices de végétation.

Tableau 3. Indices de végétation moyens pour chaque type de couvert

		roches calcaires	brachypodes rameux	chêne kermès	chêne vert
indices	RVI	1,77	3,03	7,42	9,95
	NDVI	0,28	0,50	0,76	0,81
	SAVI	0,16	0,23	0,35	0,35
	GEMI	0,51	0,64	0,79	0,77
	TVI	0,88	1,00	1,12	1,14
effectifs		29	26	45	25

L'indice RVI, d'une grande amplitude, est le seul à différencier les deux types de chêne.

3. DISCUSSION

Les mesures radiométriques rendent compte du couple de réflectances R-PIR d'objets précis dans la zone de garrigue. Ces mesures peuvent servir de référence vis-à-vis des images satellitaires pour la même période (été 2001) et la même zone d'étude (causse d'Aumelas). L'utilisation du radiomètre sur le terrain a ainsi permis de fournir une information, certes grossière, indicative des ordres de grandeur des réflectances des objets composant le paysage de garrigue.

D'autres sources d'informations permettent de caractériser une zone de travail. Ainsi dans la prochaine partie, nous allons cartographier le site d'étude près de Montpellier à partir d'images aériennes à différentes distances d'observation.

ANNEXE 8. LE DRONE PIXY® ET LES PRISES DE VUES (Bruno Roux, UMR 3S)

Le Drone " Pixy "

Conçu au sein de l'IRD, le Pixy est un drone lent évoluant à basse altitude en vue de recueillir des images à très haute résolution spatiale et temporelle. Sa voilure souple le dote d'un pilotage très facile.

Conceived by the IRD, the Pixy is a slow and easy to pilot drone for high resolution imaging.

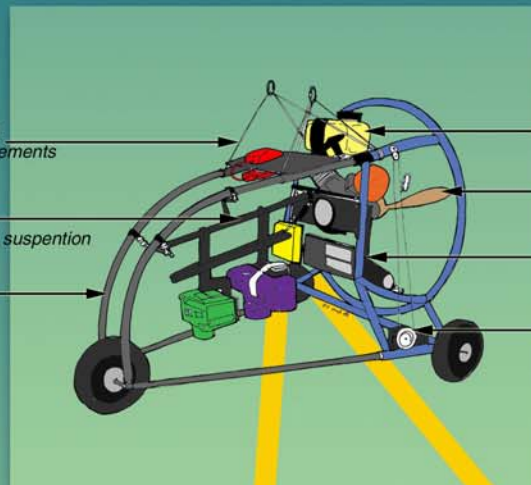


Caractéristiques :

Envergure, *wing-span* : 3 m.
Masse totale, *weight* : 12 kg.
Charge utile, *pay-load* : 3 kg.
Rayon d'action, *range* : 1000 m.
Plafond, *ceiling*: 800m.
Cylindrée, *power*: 23 cm³.
Vitesse de vol, *flight-speed* : 15-35km/h.

Brevet IRD : France, USA, Europe en cours.

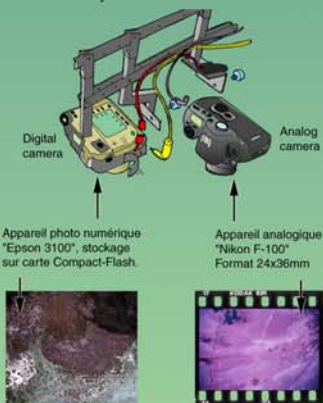
Accrochage des suspentes de la voilure. *Cables attachments*
Potence pendulaire sur amortisseurs à baign d'huile. *Oil-damped suspension*
Structure légère en aluminium et zycral. *Light tube frame*
Montage sur silents-blocs



Réservoir 1/2 litre (autonomie 30minutes). *fuel tank*
Hélice propulsive Push-prop
Moteur 22cm³ (puissance : 1.5 cv à 8000t/min) *Engine*
Servo-treuil de la voilure *Control-winch*

1 Capteurs

3 Kg de capteurs peuvent être embarqués à bord du Pixy.



2 Image de contrôle

Live image feed on a ground screen coming from the digital camera in video-mode.



L'image cadrée par l'appareil photo numérique est codée par un module HF et transmise sur un écran au sol.

3 Suivi de trajectoire

Trajectory of the drone, followed with transmission of position each two seconds.

La trajectoire du Pixy peut être suivie en direct sur un fond de plan (extension "Tracking-Analyst" sous Arc-View).



Type de vues

Type of views



Couverture et précision :
Cover and precision

La surface couverte est liée à la focale et à l'altitude du drone au moment de la prise de vue.

La précision de l'image dépend de la résolution d'analyse :

- taille du capteur CCD pour les vues numériques.
- Résolution d'analyse du scanner à film pour les vues argentiques.

The area covered is linked to the angle of of the camera's lens and the altitude. The spatial resolution of images is linked to the size of the CCD array (digital) and the scanning resolution of the film (analog).

Exemple A :
Vue 24x36 argentique, focale 24mm, altitude 350m, scanner à 4000dpi :

surface couverte(cover) : 8 hectares, taille du pixel (resolution) : 10cm/pixel.



A : analog 24x36, 24mm lens, height : 350m scanner 4000dpi.

Exemple B :
Vue numérique, focale 36mm, altitude : 150m, capteur 2048x1904 :

surface couverte (cover) : 1,3 hectare, taille du pixel (resolution) : 7cm/pixel.



B : Digital, lens 36mm height 150m, receiver : 2048x1904.

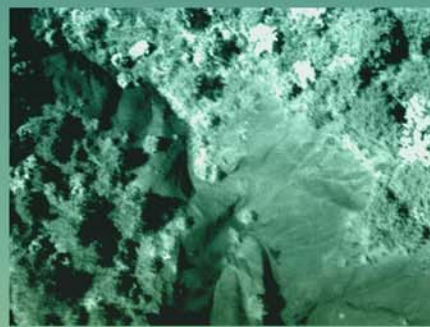
Exemples de vues utilisant différentes combinaisons de filtres et capteurs.

Examples of views using different devices and filters.

Vues numériques :
Digital views.



Minolta 7Hi couleurs naturelles natural colors composition

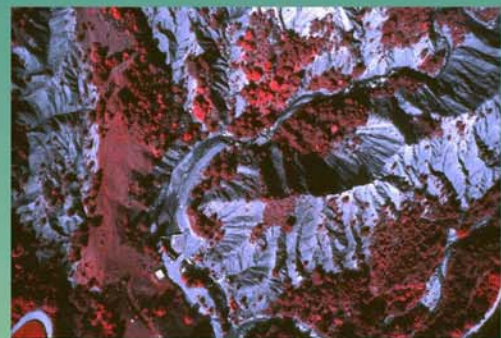


Fuji Finepix pro + filtre 98C Black and white digital (filtered with W89C)

Vue analogiques :
Analog views



Fuji color negative natural colors. Nikon F100 + 24mm + Fuji Sensia 200 + scan à 2400 dpi.



Kodak infrared false colors positive. Nikon F100 + 24mm + Kodak EIR fausses couleurs + filtre W12 + chimie E6 diapo

Tests de photographies dans l'ultra-violet / tests of UV photography

Epson 3100



Camescope Canon en mode photo



Objectif 24x36 spécial UV



Vue analogique sur film T-max 3200 + filtre Schott glass UV.



Vues numériques filtrées (filtre Schott glass UV).



LISAH
Laboratoire d'étude des Interactions
Sol - Atmosphère - Hydrologie



Cemagref



IRD
Institut de recherche
pour le développement



IFR ILEE



UMR 35

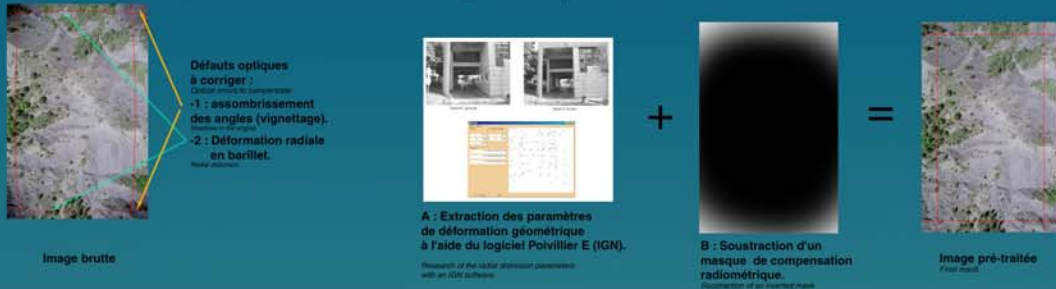
MTDUMRCS sept 2003

ANNEXE 9. LE DRONE PIXY® ET LE TRAITEMENT DES VUES (Bruno Roux, UMR 3S)

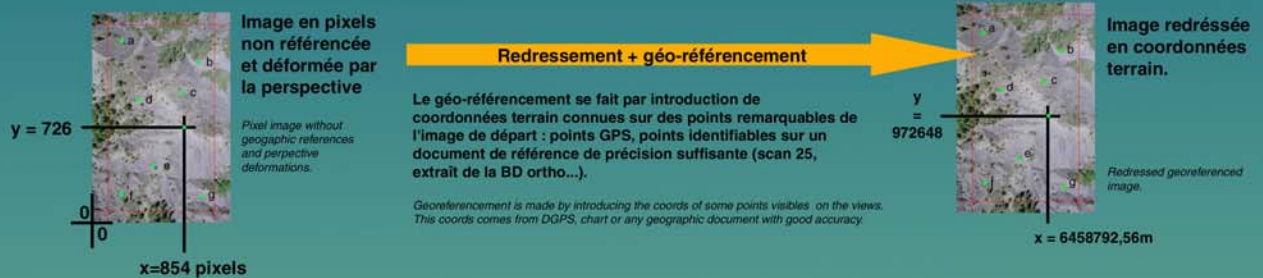
Traitement des vues

Treatments of the views

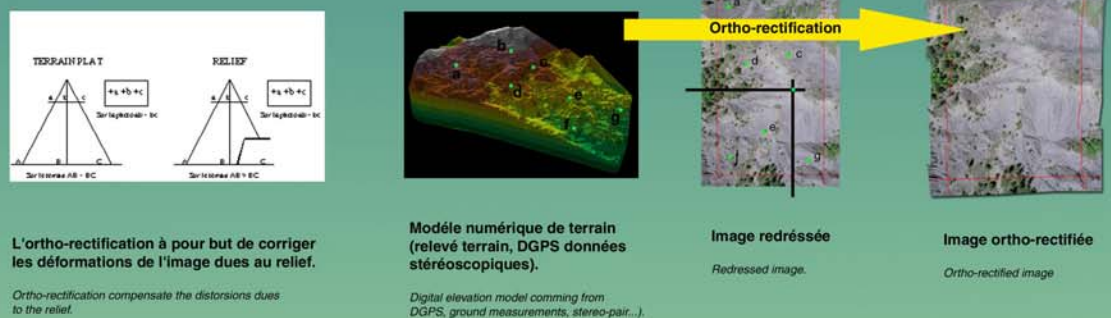
Traitement de base : correction géométrique et radiométrique.
First treatment : radiometric and geometric compensation from camera distortions.



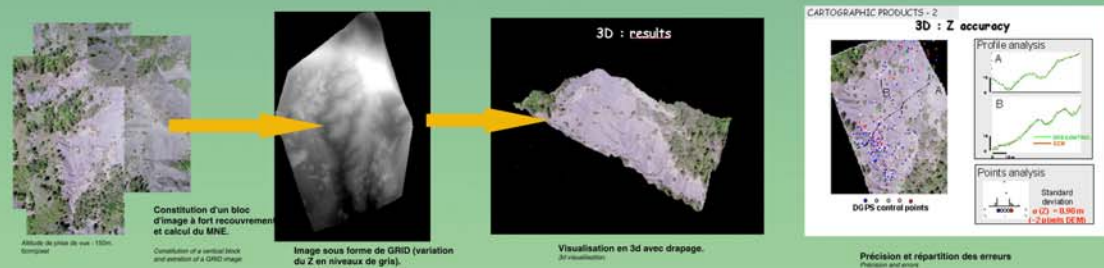
Traitement stade 2 : redressement des vues et géo-référencement
Treatment phase 2 : redress and georeferencing of the views.



Traitement stade 3 : ortho-rectification (correction du relief).
Treatment phase 3 : ortho-rectification.



Extraction de MNE (Modèle numérique de surface) :
Generation of DEM (Digital Elevation Model)



ANNEXE 10. TABLE STATISTIQUE

LIMITES D'ACCEPTATION DU COEFFICIENT
DE CORRÉLATION LINÉAIRE r LORSQUE $\rho = 0$

Cette table donne, en fonction d'un paramètre ν et du risque α de 1^{ère} espèce, la limite d'acceptation de l'hypothèse $\rho = 0$ (contre l'hypothèse $\rho \neq 0$) de la valeur absolue $|r|$ du coefficient de corrélation linéaire calculé sur un échantillon de taille n .

- 1) Pour une population normale à 2 variables : $\nu = n - 2$.
- 2) Pour une population normale à k variables, cette table pourra s'appliquer aussi au coefficient de corrélation partielle d'ordre s , où s des $(k - 2)$ autres variables sont fixées; dans ce cas on prendra : $\nu = n - 2 - s$.

$\nu \backslash \alpha$	0,10	0,05	0,02	0,01
1	0,9877	0,9969	0,9995	0,9999
2	0,9000	0,9500	0,9800	0,9900
3	0,8054	0,8783	0,9343	0,9587
4	0,7293	0,8114	0,8822	0,9172
5	0,6694	0,7545	0,8329	0,8745
6	0,6215	0,7067	0,7887	0,8343
7	0,5822	0,6664	0,7498	0,7977
8	0,5494	0,6319	0,7155	0,7646
9	0,5214	0,6021	0,6851	0,7348
10	0,4973	0,5760	0,6581	0,7079
11	0,4762	0,5529	0,6339	0,6835
12	0,4575	0,5324	0,6120	0,6614
13	0,4409	0,5139	0,5923	0,6411
14	0,4259	0,4973	0,5742	0,6226
15	0,4124	0,4821	0,5577	0,6055
16	0,4000	0,4683	0,5425	0,5897
17	0,3887	0,4555	0,5285	0,5751
18	0,3783	0,4438	0,5155	0,5614
19	0,3687	0,4329	0,5034	0,5487
20	0,3598	0,4227	0,4921	0,5368
25	0,3233	0,3809	0,4451	0,4869
30	0,2960	0,3494	0,4093	0,4487
35	0,2746	0,3246	0,3810	0,4182
40	0,2573	0,3044	0,3578	0,3932
45	0,2428	0,2875	0,3384	0,3721
50	0,2306	0,2732	0,3218	0,3541
60	0,2108	0,2500	0,2948	0,3248
70	0,1954	0,2319	0,2737	0,3017
80	0,1829	0,2172	0,2565	0,2830
90	0,1726	0,2050	0,2422	0,2673
100	0,1638	0,1946	0,2301	0,2540

Source : CERESTA (1986)

ANNEXE 11. ÉTUDES AVEC LE CAPTEUR MODIS

1. Qualité des produits du capteur MODIS

Lorsqu'un nouveau produit du capteur MODIS est proposé par la NASA, sa qualité n'a été étudiée que par un nombre restreint de chercheurs, le plus souvent par des simulations numériques. Les premiers utilisateurs de ces données sont alors de grands demandeurs de la qualité des produits proposés, afin d'identifier ceux qui correspondent à leurs besoins et ceux pour lesquels une amélioration est nécessaire. En règle générale les erreurs proviennent de sources multiples (Roy *et al.*, 2002a) : instrumentation, transmission du capteur aux stations de réception, calibrage incomplet du capteur, données anciennes imprécises, erreurs sur le codage des programmes informatiques, sensibilité des algorithmes de surface, variations des conditions atmosphériques, erreurs provoquées par les procédures de production, d'archivage et de distribution des images...

Pour valider les données fournies par le capteur MODIS, il est nécessaire de réaliser des campagnes locales de terrain et de comparer ces mesures ponctuelles aux pixels satellitaires (d'une surface de 6,25 à 100 hectares). Afin de résoudre cette **différence d'échelle**, on utilise souvent un prototype du capteur à lancer en effectuant des missions aériennes, à haute résolution (Morissette *et al.*, 2002). On peut également passer à une **échelle intermédiaire** par le biais d'un capteur haute résolution déjà en orbite. Ainsi dans leur étude, Hansen *et al.* (2002a) cartographient une forêt à partir de données de réflectances mensuelles.

La phase de validation passe par deux capteurs de résolution intermédiaire (IKONOS et ETM+) pour ajuster les mesures ponctuelles de terrain aux pixels MODIS (Hansen *et al.*, 2002b). De la même manière, Liang *et al.* (2002) valident les images de réflectance MODIS (produits n°9 et 43) en utilisant comme référence au sol des images acquises par LANDSAT-ETM+. Une première étape de leur travail consiste à calibrer ces images haute résolution à partir de mesures ponctuelles de terrain, puis à créer un produit dérivé à haute résolution. Les pixels ETM+ sont ensuite agrégés à l'échelle du pixel MODIS pour être comparés. Les résultats montrent une précision correcte des données MODIS, malgré une faible correction de l'effet des aérosols.

En effet, les premières versions des produits MODIS souffrent d'une **faible correction des perturbations atmosphériques et des effets de réflectance bidirectionnelle BRDF** (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*). Vermote *et al.* (2002) précisent, d'une part, la qualité des corrections atmosphériques appliquées aux produits de réflectance de surface (n°9) et proposent, d'autre part, d'améliorer ces données en corrigeant les effets de voisinage et les effets de BRDF. Ces effets bidirectionnels sont quantifiables (Gao *et al.*, 2002) pour certaines images. Sur ce point, Jin *et al.* (2003) analysent la qualité des produits dérivés de la BRDF en examinant les statistiques du contrôle-qualité de MODIS (produit QA fourni par la NASA) et en les comparant à d'autres sources (*Clouds and Earth's Radiant Energy System CERES, Advanced Very High Resolution Radiometer AVHRR, Earth and Radiation Budget Experiment ERBE*). Cette étude démontre la pertinence du modèle *RossThick LiSparse-Reciprocal* de correction des effets de BRDF proposé pour certains produits MODIS.

2. MODIS pour la cartographie de l'occupation du sol

La première application des données MODIS est la **cartographie de l'occupation du sol**. Le plus souvent la classification supervisée est réalisée au travers du produit n°12 de MODIS (*MOD12=Land Cover / Land Change*), en utilisant des méthodes de régressions multiples et des réseaux artificiels de neurones. Ce produit est basé sur des données de réflectance, de BRDF, de température de surface et un modèle numérique de terrain MNT (Friedl *et al.*, 2002). Braswell *et al.* (2003) ont quant à eux utilisé les réseaux neuronaux pour déterminer l'occupation du sol à l'intérieur d'un pixel (classification intrapixellaire), grâce à la combinaison des bandes du moyen infrarouge de MODIS et des données de réflectance multi-angulaire (9 angles de visée par pixel) du capteur MISR (*Multi-angle Imaging SpectroRadiometer*) embarqué sur TERRA.

La principale limite de l'utilisation de MODIS pour la cartographie de l'occupation du sol réside dans la taille des objets à cartographier ! Les pixels MODIS de 250 à 1000 mètres sont presque toujours composés de plusieurs types de couverts et non d'un seul. Les capteurs à haute résolution (SPOT-HRVIR, LANDSAT-ETM+) restent donc toujours d'actualité (Price, 2003). Pour les données à 250 mètres de résolution (réflectances dans le *Rouge* et le *Proche infrarouge*), même si l'on observe beaucoup d'effets de bord (influence des pixels voisins) (Huang *et al.*, 2001), la mise à disposition des premières images gratuites fut une vraie révolution, permettant ainsi de **suivre quotidiennement avec une bonne précision les changements d'occupation du sol** comme les surfaces brûlées, les zones inondées, les zones de déforestation (Zhan *et al.*, 2000 et 2002)...

Cette dynamique de l'occupation des sols dépend des actions de l'Homme et des événements naturels. Les changements les plus sévères sont causés par les feux de forêt, qui ont des répercussions sur tout un écosystème (dynamique végétale, flore, faune, cycle de l'eau, du carbone...). Le capteur MODIS est adapté à la détection des fronts de feu, avec des bandes saturant pour des hautes températures de brillance (Kaufman *et al.*, 2003). L'algorithme est basé sur l'application de différents seuils sur les bandes thermiques autour des longueurs d'onde de 4 et 11 μm (Justice *et al.*, 2002). Deux problèmes cohabitent : de fausses alarmes en zones désertiques et bien entendu l'omission des feux de petite taille (< 50 ha) (Giglio *et al.*, 2003). Des études comparatives menées avec les mêmes algorithmes (Ichoku *et al.*, 2003) montrent que le capteur MODIS oublie plus de feux que le capteur AVHRR mais présente beaucoup moins de fausses alertes.

Toutefois, il faut garder à l'esprit que l'usage des satellites à basse résolution pour la détection des incendies de forêt présente l'inconvénient de ne percevoir que les feux actifs pendant le passage du satellite (4 fois par jour pour MODIS) et dans la mesure où il n'y a pas de couverture nuageuse masquant le feu ! En revanche la cartographie des surfaces brûlées ne pose pas de problème majeur et plusieurs auteurs proposent des méthodes pour estimer la sévérité des feux (Roy *et al.* 2002b, Sa *et al.* 2003). Selon eux, les bandes spectrales les plus discriminantes pour identifier des pixels brûlés par seuillage sont les canaux 5 (*Moyen infrarouge 1*), 2 (*Proche infrarouge*) et 6 (*Moyen infrarouge 2*) de MODIS.

3. MODIS pour la dynamique et la structure de la végétation

D'autres études testent la validité des produits proposés pour décrire la végétation : **indices de végétation** (Huete *et al.*, 2002, Trishchenko *et al.*, 2002, Gao *et al.*, 2003), **température de surface** (Wan *et al.*, 2002), **LAI** (*Leaf Area Index*) et **FPAR** (*Fraction of Photosynthetically Active Radiation*) (Myneni *et al.*, 2002, Privette *et al.*, 2002, Lotsch *et al.*, 2002, Shabanov *et al.*, 2003)... L'ensemble de ces études permet de préciser le niveau de qualité des produits MODIS que nous utiliserons à l'occasion de notre étude du suivi de la teneur en eau de la végétation méditerranéenne.

Les données MODIS peuvent également servir à la **détection des surfaces enneigées** (Zhou et Li, 2003, Vikhamar et Solberg 2003) et au suivi de la dynamique et de la structure globale de la végétation (Zhang *et al.*, 2003). Lucas *et al.* (2002), par exemple, différencie les étapes de régénération de la forêt secondaire tropicale amazonienne. Le suivi de la dynamique de la végétation à partir d'indices de végétation est réalisé pour différents capteurs. MODIS se révèle meilleur que AVHRR (Ferreira *et al.*, 2003). Par ailleurs, le produit de LAI de MODIS (produit n°15) se montre performant pour décrire la variabilité spatio-temporelle des végétaux (Kang *et al.*, 2003). Gao *et al.* (2003) travaillent quant à eux sur les types de végétaux et leur structure à partir des données de BRDF de MODIS.

4. MODIS pour le suivi de l'état hydrique des plantes

Pour estimer l'état hydrique des végétaux, les bandes situées dans le *Moyen infrarouge* semblent primordiales (Ceccato *et al.*, 2001). A partir des données de MODIS, différents indices ont été mis en relation avec l'état hydrique des plantes :

- le NDWI (*Normalized Difference Water Index*) (Zarco-Tejada *et al.*, 2003) ;
- le SRWI (*Simple Ratio Water Index*) (Zarco-Tejada *et al.*, 2003) ;
- le SIWSI (*Shorwave Infrared Water Stress Index*) (Fensholt et Sandholt, 2003) ;
- le VTCI (*Vegetation Temperature Condition Index*) (Wan *et al.*, 2004).

Le NDWI, le SRWI et le SIWSI utilisent les bandes MODIS du *Moyen infrarouge* tandis que le VTCI est un rapport entre la température de la surface et le NDVI.

Enfin une autre méthode pour l'estimation de l'état hydrique est l'évaluation de l'évapotranspiration proposée par Nishida *et al.* (2003). Un nouvel indice est proposé, lié au rapport entre les évaporations réelle et potentielle (également présenté par Moran *et al.*, 1994).

Le nouveau capteur MODIS est donc à l'origine de nombreuses études, publiées ou en cours, sur de nouvelles applications environnementales, notamment par le biais des bandes du *Moyen infrarouge* sensibles à l'état physiologique de la végétation. Il ne faut tout de même pas oublier que la disponibilité des données est liée aux vicissitudes du capteur. On note ainsi régulièrement des erreurs pour certains mois, dues au mauvais étalonnage du capteur, aux erreurs d'orbite... La NASA met au service des utilisateurs sur Internet ses informations d'archive (http://terra.nasa.gov/Events/weekly_archive.html).

ANNEXE 12. ATTRIBUTS GLOBAUX DE QUALITÉ DES PRODUITS MODIS

Tableaux présentant des exemples de détail des attributs globaux de qualité (HFA info) pour différents produits MODIS

MODGHK jour 185 année 2001

Image Version 4	Image Version 3
<pre> struct MODISHeader { char GRIDNAME[15] = "MOD_Grid_L2g_2d" char LOCALGRANULEID[46] = "MOD09GHK.A2001185.h18v04.004.2003123094611.hdf" char PRODUCTIONDATETIME[24] = "2003-05- 03T09:46:11.000Z" char DAYNIGHTFLAG[3] = "Day" char REPROCESSINGACTUAL[11] = "reprocessed" char LOCALVERSIONID[10] = "SCF V4.0.2" char REPROCESSINGPLANNED[29] = "further update is anticipated" char PARAMETERNAME1[8] = "MOD09GHK" char SCIENCEQUALITYFLAG1[16] = "Not Investigated" char AUTOMATICQUALITYFLAGEXPLANATION1[127] = ""Failed' if there is no valid land data contained within; 'Suspect if the majority of pixels are at a high solar zenith angle." char AUTOMATICQUALITYFLAG1[6] = "Passed" long QAPERCENTMISSINGDATA1 = 0 long VERSIONID = 4 char SHORTNAME[8] = "MOD09GHK" char INPUTPOINTER[229] = "MODPTHKM.A2001185.h18v04.004.2003123094053.hdf", "MOD09.A2001185.1000.004.2003123011212.hdf", "MOD09.A2001185.1005.004.2003123012211.hdf", "MOD09.A2001185.1140.004.2003123013345.hdf", "MOD09.A2001185.1145.004.2003123014444.hdf", " char ADDITIONALATTRIBUTENAME1[20] = "QAPERCENTGOODQUALITY" long PARAMETERVALUE1 = 90 char ADDITIONALATTRIBUTENAME2[21] = "QAPERCENTOTHERQUALITY" long PARAMETERVALUE2 = 6 char ADDITIONALATTRIBUTENAME3[25] = "QAPERCENTNOTPRODUCEDCLOUD" long PARAMETERVALUE3 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME4[25] = "QAPERCENTNOTPRODUCEDOTHER" long PARAMETERVALUE4 = 4 char ADDITIONALATTRIBUTENAME8[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND3" long PARAMETERVALUE8 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME9[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND4" long PARAMETERVALUE9 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME10[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND5" long PARAMETERVALUE10 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME11[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND6" long PARAMETERVALUE11 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME12[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND7" long PARAMETERVALUE12 = 0 char BRDFCORRECTIONATTEMPTED[2] = "no" </pre>	<pre> struct MODISHeader { char GRIDNAME[15] = "MOD_Grid_L2g_2d" char LOCALGRANULEID[46] = "MOD09GHK.A2001185.h18v04.003.2001310044841.hdf" char PRODUCTIONDATETIME[24] = "2001-11- 06T04:48:41.000Z" char DAYNIGHTFLAG[3] = "Day" char REPROCESSINGACTUAL[11] = "reprocessed" char LOCALVERSIONID[5] = "3.0.4" char REPROCESSINGPLANNED[29] = "further update is anticipated" char PARAMETERNAME1[8] = "MOD09GHK" char SCIENCEQUALITYFLAG1[16] = "Not Investigated" char AUTOMATICQUALITYFLAGEXPLANATION1[127] = ""Failed' if there is no valid land data contained within; 'Suspect if the majority of pixels are at a high solar zenith angle." char AUTOMATICQUALITYFLAG1[6] = "Passed" long QAPERCENTMISSINGDATA1 = 0 long VERSIONID = 3 char SHORTNAME[8] = "MOD09GHK" char INPUTPOINTER[229] = "MODPTHKM.A2001185.h18v04.003.2001310042356.hdf", "MOD09.A2001185.1000.003.2001309063504.hdf", "MOD09.A2001185.1005.003.2001309064942.hdf", "MOD09.A2001185.1140.003.2001309065320.hdf", "MOD09.A2001185.1145.003.2001309070901.hdf", " char ADDITIONALATTRIBUTENAME1[20] = "QAPERCENTGOODQUALITY" long PARAMETERVALUE1 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME2[21] = "QAPERCENTOTHERQUALITY" long PARAMETERVALUE2 = 95 char ADDITIONALATTRIBUTENAME3[25] = "QAPERCENTNOTPRODUCEDCLOUD" long PARAMETERVALUE3 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME4[25] = "QAPERCENTNOTPRODUCEDOTHER" long PARAMETERVALUE4 = 5 char ADDITIONALATTRIBUTENAME8[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND3" long PARAMETERVALUE8 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME9[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND4" long PARAMETERVALUE9 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME10[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND5" long PARAMETERVALUE10 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME11[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND6" long PARAMETERVALUE11 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME12[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND7" long PARAMETERVALUE12 = 0 char BRDFCORRECTIONATTEMPTED[2] = "no" </pre>

char ATMOSPHERICCORRECTIONATTEMPTED[3] = "yes" char ADJACENCYCORRECTIONATTEMPTED[2] = "no" char SEAPROCESSED[3] = "yes" long PERCENTNOTSEA = 96 long NUMBEROFHIGHSSOLARZENITHPIXELS1KM = -1 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND3[16] = 99, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND4[16] = 100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND5[16] = 92, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 7, 0 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND6[16] = 100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND7[16] = 100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0	char ATMOSPHERICCORRECTIONATTEMPTED[3] = "yes" char ADJACENCYCORRECTIONATTEMPTED[2] = "no" char SEAPROCESSED[3] = "yes" long PERCENTNOTSEA = 97 long NUMBEROFHIGHSSOLARZENITHPIXELS1KM = -1 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND3[16] = 96, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 4, 0, 0 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND4[16] = 99, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND5[16] = 95, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 5, 0 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND6[16] = 100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND7[16] = 100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0
---	--

MODGHK jour 236 année 2001

Image Version 4	Image Version 3
struct MODISHeader { char GRIDNAME[15] = "MOD_Grid_L2g_2d" char LOCALGRANULEID[46] = "MOD09GHK.A2001236.h18v04.004.2003140115716.hdf" char PRODUCTION_DATE_TIME[24] = "2003-05- 20T11:57:16.000Z" char DAYNIGHT_FLAG[3] = "Day" char REPROCESSING_ACTUAL[11] = "reprocessed" char LOCAL_VERSIONID[10] = "SCF V4.0.2" char REPROCESSINGPLANNED[29] = "further update is anticipated" char PARAMETERNAME1[8] = "MOD09GHK" char SCIENCEQUALITYFLAG1[16] = "Not Investigated" char AUTOMATIC_QUALITY_FLAG_EXPLANATION1[127] = "'Failed' if there is no valid land data contained within; 'Suspect' if the majority of pixels are at a high solar zenith angle." char AUTOMATICQUALITYFLAG1[6] = "Passed" long QAPERCENTMISSINGDATA1 = 0 long VERSIONID = 4 char SHORTNAME[8] = "MOD09GHK" char INPUTPOINTER[181] = "MODPTHKM.A2001236.h18v04.004.2003140115401.hdf", "MOD09.A2001236.1030.004.2003134072620.hdf", "MOD09.A2001236.1035.004.2003134073812.hdf", "MOD09.A2001236.1210.004.2003134080749.hdf" char ADDITIONALATTRIBUTENAME1[20] = "QAPERCENTGOODQUALITY" long PARAMETERVALUE1 = 89 char ADDITIONALATTRIBUTENAME2[21] = "QAPERCENTOTHERQUALITY" long PARAMETERVALUE2 = 11 char ADDITIONALATTRIBUTENAME3[25] = "QAPERCENTNOTPRODUCEDCLOUD" long PARAMETERVALUE3 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME4[25] = "QAPERCENTNOTPRODUCEDOTHER" long PARAMETERVALUE4 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME8[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND3" long PARAMETERVALUE8 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME9[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND4"	struct MODISHeader { char GRIDNAME[15] = "MOD_Grid_L2g_2d" char LOCALGRANULEID[46] = "MOD09GHK.A2001236.h18v04.003.2001340074544.hdf" char PRODUCTIONDATETIME[24] = "2001-12- 06T07:45:44.000Z" char DAYNIGHT_FLAG[3] = "Day" char REPROCESSING_ACTUAL[11] = "reprocessed" char LOCAL_VERSION_ID[5] = "3.0.5" char REPROCESSING_PLANNED[29] = "further update is anticipated" char PARAMETER_NAME1[8] = "MOD09GHK" char SCIENCE_QUALITY_FLAG1[16] = "Not Investigated" char AUTOMATIC_QUALITY_FLAG_EXPLANATION1[127] = "'Failed' if there is no valid land data contained within; 'Suspect' if the majority of pixels are at a high solar zenith angle." char AUTOMATICQUALITYFLAG1[6] = "Passed" long QAPERCENTMISSINGDATA1 = 0 long VERSIONID = 3 char SHORTNAME[8] = "MOD09GHK" char INPUTPOINTER[181] = "MODPTHKM.A2001236.h18v04.003.2001340074218.hdf", "MOD09.A2001236.1030.003.2001339192907.hdf", "MOD09.A2001236.1035.003.2001339193851.hdf", "MOD09.A2001236.1210.003.2001339192935.hdf" char ADDITIONALATTRIBUTENAME1[20] = "QAPERCENTGOODQUALITY" long PARAMETERVALUE1 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME2[21] = "QAPERCENTOTHERQUALITY" long PARAMETERVALUE2 = 100 char ADDITIONALATTRIBUTENAME3[25] = "QAPERCENTNOTPRODUCEDCLOUD" long PARAMETERVALUE3 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME4[25] = "QAPERCENTNOTPRODUCEDOTHER" long PARAMETERVALUE4 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME8[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND3" long PARAMETERVALUE8 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME9[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND4"

long PARAMETERVALUE9 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME10[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND5" long PARAMETERVALUE10 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME11[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND6" long PARAMETERVALUE11 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME12[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND7" long PARAMETERVALUE12 = 0 char BRDFCORRECTIONATTEMPTED[2] = "no" char ATMOSPHERICCORRECTIONATTEMPTED[3] = "yes" char ADJACENCYCORRECTIONATTEMPTED[2] = "no" char SEAPROCESSED[3] = "yes" long PERCENTNOTSEA = 97 long NUMBEROFHIGHSOLARZENITHPIXELS1KM = -1 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND3[16] = 99, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND4[16] = 100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND5[16] = 94, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 5, 0 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND6[16] = 100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND7[16] = 100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0	long PARAMETERVALUE9 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME10[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND5" long PARAMETERVALUE10 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME11[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND6" long PARAMETERVALUE11 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME12[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND7" long PARAMETERVALUE12 = 0 char BRDFCORRECTIONATTEMPTED[2] = "no" char ATMOSPHERICCORRECTIONATTEMPTED[3] = "yes" char ADJACENCYCORRECTIONATTEMPTED[2] = "no" char SEAPROCESSED[3] = "yes" long PERCENTNOTSEA = 97 long NUMBEROFHIGHSOLARZENITHPIXELS1KM = -1 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND3[16] = 98, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 0, 0 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND4[16] = 100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND5[16] = 98, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 0, 0 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND6[16] = 100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND7[16] = 100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0
---	---

MOD09A1A jours 233-240, année 2001

Image Version 4	Image Version 3
struct MODISHeader { char GRIDNAME[33] = "MOD_Grid_500m_Surface_Reflectance" char LOCALGRANULEID[45] = "MOD09A1.A2001233.h18v04.004.2003141170135.hdf" char PRODUCTIONDATETIME[24] = "2003-05- 21T17:01:35.000Z" char DAYNIGHTFLAG[3] = "Day" char REPROCESSINGACTUAL[11] = "reprocessed" char LOCALVERSIONID[5] = "4.0.6" char REPROCESSINGPLANNED[29] = "further update is anticipated" char PARAMETERNAME1[7] = "MOD09A1" char SCIENCEQUALITYFLAG1[16] = "Not Investigated" char AUTOMATICQUALITYFLAGEXPLANATION1[13] = "Always Passed" char AUTOMATICQUALITYFLAG1[6] = "Passed" long QAPERCENTMISSINGDATA1 = 18 long QAPERCENTOUTOFBOUNDSDATA1 = 0 long QAPERCENTINTERPOLATEDDATA1 = 0 long VERSIONID = 4 char SHORTNAME[7] = "MOD09A1" char INPUTPOINTER[249] = "MOD09GQK.A2001233.h18v04.004.2003139215051.hdf", "MOD09GQK.A2001234.h18v04.004.2003140044035.hdf", "MOD09GQK.A2001235.h18v04.004.2003140054717.hdf", "MOD09GQK.A2001236.h18v04.004.2003140115613.hdf", "MOD09GQK.A2001237.h18v04.004.2003140155414.hdf", " char PGEVERSION[5] = "4.0.7" char ADDITIONALATTRIBUTENAME1[20] = "QAPERCENTGOODQUALITY"	struct MODISHeader { char GRIDNAME[33] = "MOD_Grid_500m_Surface_Reflectance" char LOCALGRANULEID[45] = "MOD09A1.A2001233.h18v04.003.2001342043758.hdf" char PRODUCTIONDATETIME[24] = "2001-12- 08T04:37:59.000Z" char DAYNIGHTFLAG[3] = "Day" char REPROCESSINGACTUAL[11] = "reprocessed" char LOCALVERSIONID[6] = "v3.0.4" char REPROCESSINGPLANNED[29] = "further update is anticipated" char PARAMETERNAME1[7] = "MOD09A1" char SCIENCEQUALITYFLAG1[16] = "Not Investigated" char AUTOMATICQUALITYFLAGEXPLANATION1[13] = "Always Passed" char AUTOMATICQUALITYFLAG1[6] = "Passed" long QAPERCENTMISSINGDATA1 = 18 long QAPERCENTOUTOFBOUNDSDATA1 = 0 long QAPERCENTINTERPOLATEDDATA1 = 0 long VERSIONID = 3 char SHORTNAME[7] = "MOD09A1" char INPUTPOINTER[249] = "MOD09GHK.A2001233.h18v04.003.2001336173149.hdf", "MOD09GHK.A2001234.h18v04.003.2001340002753.hdf", "MOD09GHK.A2001235.h18v04.003.2001337172436.hdf", "MOD09GHK.A2001236.h18v04.003.2001340074544.hdf", "MOD09GHK.A2001237.h18v04.003.2001338043248.hdf", " char PGEVERSION[5] = "3.0.5" char ADDITIONALATTRIBUTENAME1[20] = "QAPERCENTGOODQUALITY"

long PARAMETERVALUE1 = 81 char ADDITIONALATTRIBUTENAME2[21] = "QAPERCENTOTHERQUALITY" long PARAMETERVALUE2 = 1 char ADDITIONALATTRIBUTENAME3[25] = "QAPERCENTNOTPRODUCEDCLOUD" long PARAMETERVALUE3 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME4[25] = "QAPERCENTNOTPRODUCEDOTHER" long PARAMETERVALUE4 = 18 char ADDITIONALATTRIBUTENAME8[14] = "PROCESSVERSION" char PARAMETERVALUE8[5] = "4.0.6" char ADDITIONALATTRIBUTENAME9[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT250MBAND1" long PARAMETERVALUE9 = 1 char ADDITIONALATTRIBUTENAME10[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT250MBAND2" long PARAMETERVALUE10 = 1 char ADDITIONALATTRIBUTENAME11[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND3" long PARAMETERVALUE11 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME12[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND4" long PARAMETERVALUE12 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME13[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND5" long PARAMETERVALUE13 = 2 char ADDITIONALATTRIBUTENAME14[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND6" long PARAMETERVALUE14 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME15[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND7" long PARAMETERVALUE15 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME16[20] = long QUALITYCLASSPERCENTAGE250MBAND1[16] = 81, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 18 long QUALITYCLASSPERCENTAGE250MBAND2[16] = 81, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 18 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND3[16] = 82, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 18 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND4[16] = 82, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 18 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND5[16] = 76, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 4, 18 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND6[16] = 82, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 18 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND7[16] = 82, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 18 long PERCENTDIFFERENTORBIT250M = 6 long PERCENTPROCESSED = 100 long PERCENTLAND = 72 long PERCENTCLOUDY = 0 long PERCENTSHADOW = 0 long PERCENTLOWSUN = 0 long PERCENTLANDSEAMASKCLASS[8] = 5, 72, 2, 0, 0, 0, 3, 18	long PARAMETERVALUE1 = 82 char ADDITIONALATTRIBUTENAME2[21] = "QAPERCENTOTHERQUALITY" long PARAMETERVALUE2 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME3[25] = "QAPERCENTNOTPRODUCEDCLOUD" long PARAMETERVALUE3 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME4[25] = "QAPERCENTNOTPRODUCEDOTHER" long PARAMETERVALUE4 = 18 char ADDITIONALATTRIBUTENAME8[14] = "PROCESSVERSION" char PARAMETERVALUE8[5] = "3.0.4" char ADDITIONALATTRIBUTENAME9[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT250MBAND1" long PARAMETERVALUE9 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME10[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT250MBAND2" long PARAMETERVALUE10 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME11[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND3" long PARAMETERVALUE11 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME12[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND4" long PARAMETERVALUE12 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME13[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND5" long PARAMETERVALUE13 = 3 char ADDITIONALATTRIBUTENAME14[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND6" long PARAMETERVALUE14 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME15[28] = "QAPERCENTPOOROUTPUT500MBAND7" long PARAMETERVALUE15 = 0 char ADDITIONALATTRIBUTENAME16[20] = long QUALITYCLASSPERCENTAGE250MBAND1[16] = 82, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 18 long QUALITYCLASSPERCENTAGE250MBAND2[16] = 82, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 18 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND3[16] = 82, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 18 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND4[16] = 82, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 18 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND5[16] = 79, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 3, 0, 18 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND6[16] = 82, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 18 long QUALITYCLASSPERCENTAGE500MBAND7[16] = 82, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 18 long PERCENTDIFFERENTORBIT250M = 0 long PERCENTPROCESSED = 100 long PERCENTLAND = 72 long PERCENTCLOUDY = 17 long PERCENTSHADOW = 0 long PERCENTLOWSUN = 0 long PERCENTLANDSEAMASKCLASS[8] = 5, 72, 2, 0, 0, 0, 3, 18
--	---

TABLE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

A : Absorptance
ABI : *Advanced Baseline Imager*
ABS : *Advanced Baseline Sounder*
ACM : Analyse des Correspondances Multiples
ACP : Analyse en Composantes Principales
AFC : Analyse Factorielle Discriminante
ANOVA : analyse de variance
AOI : *Area Of Interest*
ARVI : *Atmospherically Resistant Vegetation Index*
ASDFCI : Associations Syndicales Communales de Défense contre les Incendies
ATSR : *Along Track Scanning Radiometer*
AU : *Arbutus Unedo* (arbousier commun)
AVHRR : *Advanced Very High Resolution Radiometer*
B : Bleu
BRDF : *Bidirectional Reflectance Diffusion Function*
BRS : Basse Résolution Spatiale
BUI : *Build Up Index*
CA : *Cistus Albidus* (ciste cotonneux)
CC : zone Caillouteuse Calcaire
CCFF : Comités Communaux de Feux de Forêts
CEFE : Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive
CEMAGREF : Centre d'Étude du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
CEOS : *Committee on Earth Observation Satellites*
CEREN : Centre d'Etudes et de Recherche de l'Entente
CERES : *Clouds and Earth's Radiant Energy System*
CIE : Commission Internationale de l'Éclairage
CLC : *CORINE Land Cover*
CMI : *Crop Moisture Index*
CNES : Centre National d'Études Spatiales
CNRS : Centre National de Recherche Scientifique
COZ : Centre Opérationnel de Zone
CSE : Climat, Sol et Environnement
CTE : Contrats Territoriaux d'Exploitation
CWSI : *Crop Water Stress Index*
DC : *Duff Code*
DFCI : Défense des Forêts Contre l'Incendie
D-GPS : *Differential-Global Positioning System*
DMC : *Drought Moisture Code*
DMSG : *Disaster Management Support Group*
DN : *Digital Number*
DPAI-DEOT : Direction des Programmes et des Affaires Industrielles, Délégation à l'Étude et l'Observation de la Terre
DPFM : Délégation pour la Protection de la Forêt Méditerranéenne
DR PACA : Direction Régionale Provence Alpes Côtes d'Azur
DVI : *Difference Vegetation Index*
EA : *Erica Arborea* (bruyère arborescente)
EFAST : *Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test*
EIPFEI : Entente Interdépartementale en vue de la Protection de la Forêt contre l'Incendie
EMC : *Equilibrium Moisture Content*
ERBE : *Earth and Radiation Budget Experiment*
ESA : *European Space Agency* (agence spatiale européenne)
ETM : évapotranspiration maximale
ETP : évapotranspiration potentielle
ETR : évapotranspiration réelle
EWI : *Equivalent Water Thickness*
FDFSE : Feux De Forêts Sud-Est
FFFI : *Finnish Forest Fire Index*
FFMC : *Fine Fuel Moisture Code*
FIERS : Estimation du risque d'incendie par télédétection satellitaire (projet Européen)

FMC : *Foliage Moisture Content* ou *Fuel Moisture Content*
FMM : *Fuel Moisture Model*
FPAR : *Fraction of Photosynthetically Active Radiation*
FWI : *Fire Weather Index*
GARI : *Green Atmospherically Resistant Index*
GEMI : *Global environmental monitoring index*
GFDM : *Global Fire Danger Meters*
GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GIS : Groupement d'Intérêt Scientifique
GMES : *Global Monitoring of Environment and Security*
GNDVI : *Green Normalized Difference Vegetation Index*
GPS : *Global Positioning System*
GRARI : *Green-Red Atmospherically Resistant Index*
GVMi : *Global Vegetation Moisture Index*
HBR : Herbe à Brachypodes Rameux
HDF-EOS : *Hierarchical Data Format - Earth Observing System*
HRPT : *High Resolution Picture Transmission*
HRS : Haute Résolution Spatiale
HRV : Haute Résolution Visible
HRVIR : Haute Résolution Visible et Infra Rouge
ICD : Indice de Combustible Disponible
ICL : Indice du Combustible Léger
IFEN : Institut Français de l'Environnement
IFM : Indice Forêt Météo
IFN : Institut Forestier National
IGN : Institut Géographique National
IH : Indice d'Humus
IJS : l'Indice Journalier de Sévérité
IMPI : *Indice Meteorologico di Prevenzione per Incendi*
INRA : Institut National de Recherche Agronomique
IPCC : *Intergovernmental Panel on Climate Change*
IPi : Indice de Propagation Initiale
IPVI : *Infrared Percentage Vegetation Index*
IRD : Institut de Recherche et de Développement (ex ORSTOM)
IRT : InfraRouge Thermique
IS : Indice de Sécheresse (indice météorologique)
IS : Indice de Siccité (indice de stress hydrique)
ISI : *Initial Spread Index*
ITAP : Information et Technologies pour les Agro-procédés
JO : *Juniperus Oxycedrus* (genévrier oxycèdre)
KBDC : *Keetch-Byram Drought Code*
KBDI : *Keetch-Byram Dryness Index*
LAI : *Leaf Area Index*
LCWI : *Leaf Water Content Index*
Ll_e : Lambert II étendue (projection)
MAAPAR : Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires Rurales
MDI : Délai Moyen d'Inflammation
MFDIP : *Meteorological Fire Danger Index Processor*
MIR : Moyen InfraRouge
MLR : *Multiple Linear Regression*
MNT : Modèle Numérique de Terrain
MODIS : *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*
MSARVI : *Modified Soil adjusted and Atmospherically Resistant Vegetation Index*
MSAVI : *Modified Soil Adjusted Vegetation Index*
NASA : *National Aeronautic and Space Administration*
NBAR : *nadir BRDF-adjusted reflectance*
NDII : *Normalized Difference Infrared Index*
NDVI : *Normalized Difference Vegetation Index*
NDWI : *Normalized Difference Water Index*
NFDRS : *National Fire Danger Rating System*
NIRS : *Near InfraRed Spectroscopy*
NOAA : *National Oceanic and Atmospheric Administration*

NTF : Nouvelle Triangulation Française
ONF : Office National des Forêts
PAR : *Photosynthetically Active Radiation*
PCR : *Principle Component Regression*
PDPFI : Plans Départementaux de Protection de la Forêt contre l'Incendie
PIDAF : Plans Intercommunaux de Débroussaillage et d'Aménagement Forestier
PIR : Proche InfraRouge
PLS : *Partial Least Square* (régression aux moindres carrés partiels)
PLU : Plans Locaux d'Urbanisation
POS : Plans d'Occupation des Sols
PPRIF : Plans de Prévention des Risques relatifs aux Incendies de Forêt
PZSIF : Plans de Zones Sensibles aux Incendies de Forêt
QC : *Quercus Coccifera* (chêne kermès)
QI : *Quercus Ilex* (chêne vert)
QP : *Quercus pubescens* (chêne blanc)
R : Réflectance ou Rouge
RFM-PIF : Recherches Forestières Méditerranéennes, Prévention des Incendies de Forêt
RGRE : *Relative Greenness*
RME : *Reference Method Error* (écart-type moyen des répétitions)
RMN : résonance magnétique nucléaire
RMSEP : *Root Mean Square Error of Prediction*
RRI : *Relative Reflectance Index*
RVB : Rouge Vert Bleu
RVI : *Ratio Vegetation Index*
SARVI : *Soil adjusted and Atmospherically Resistant Vegetation Index*
SAVI : *Soil-Adjusted Vegetation Index*
SD : *Standard Deviation* (écart-type)
SDAFI : Schémas Départementaux d'Aménagement des Forêts contre l'Incendie
SDIS : Services Départementaux d'Incendie et de Secours
SEC : *Standard Error of Calibration*
SECV : *Standard Error of Cross Validation*
SEP : *Standard Error of Prediction*
SIG : Systèmes d'Informations Géographiques
SIWSI : *Shorwave Infrared Water Stress Index*
SJ : *Spartium Junceum* (genêt d'Espagne)
SLAVI : *Specific Leaf Area Vegetation Index*
SLW : *Specific Leaf Weight* (teneur en matière sèche)
SM : Spectroscopie de Masse
SMAC : *Simplified Method for Atmospheric Correction*
SNV : *Standard Normal Variate*
SPFCI : Schémas de Prévention des Forêts Contre l'Incendie
SPOT : Satellite Pour l'Observation de la Terre
SRWI : *Simple Ratio Water Index*
6S : *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*
SSTL : *Surrey Small Satellite Technology*
SZA : *Solar Zenith Angle* (angle zénithal solaire)
T : Transmittance
THRS : Très Haute Résolution Spatiale
TIES : *Telford Institute of Environmental Systems*
TM : *Thematic Mapper*
TS : Température de Surface
TVI : *Transformed Vegetation Index*
UV : Ultra Violet
V : Vert
VGT : VEGETATION (capteur satellitaire)
VHI : *Vegetation Health Index*
VIIRS : *Visible Infrared Image Radiometer Suite*
VITO : *Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek*
VTCl : *Vegetation Temperature Condition Index*
WDI : *Water Deficit Index*
WI : *Water Index*
WSI : *Water Stress Index*

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS.....	1
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	2

CHAPITRE 1.

LE RISQUE DE FEU DE FORÊT ET LE RÔLE DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION

1. CONTEXTE DES INCENDIES DE FORÊT EN EUROPE ET EN FRANCE.....	7
1.1. La vulnérabilité des zones méditerranéennes.....	7
1.1.1. Importance et conséquences des feu de forêt.....	7
1.1.2. Un niveau de risque en augmentation.....	8
1.1.2.1. La modification de l'occupation des sols.....	8
1.1.2.2. Les contraintes anthropiques.....	9
1.1.2.3. Le changement climatique.....	10
1.2. Les moyens mis en œuvre pour lutter contre le risque de feu.....	10
1.2.1. La spécificité du risque de feu de forêt.....	10
1.2.2. L'information et l'éducation des populations.....	11
1.2.3. L'aménagement et l'entretien de l'espace.....	11
1.2.4. La surveillance des massifs.....	12
1.2.5. Nouvelles connaissances en sciences forestières et moyens de lutte.....	12
1.2.6. Participation de l'État.....	13
1.2.7. Effets de la politique de prévention.....	14
1.3. Conclusion.....	14
2. LA GESTION DU RISQUE DE FEU DE FORÊT EN FRANCE.....	15
2.1. Le risque et la cartographie des aléas.....	15
2.2. Le système opérationnel de risque météorologique.....	18
2.2.1. Les indices de risque météorologiques.....	19
2.2.2. L'Indice Forêt Météo IFM.....	21
2.2.3. Les indices météorologiques et l'état hydrique de la végétation.....	22
3. LES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS.....	24
3.1. Le comportement du feu.....	24
3.2. Le stress hydrique du végétal.....	25
3.2.1. Le cycle de l'eau en forêt.....	25
3.2.2. La végétation méditerranéenne.....	26
3.2.3. Processus physiologiques.....	27
3.2.4. Indices de stress hydrique.....	28

4.	LA TÉLÉDÉTECTION SPATIALE.....	29
4.1.	Le spectre électromagnétique.....	29
4.1.1.	Définition.....	29
4.1.2.	Interception du rayonnement.....	30
4.2.	Capteurs disponibles.....	33
4.2.1.	Caractéristiques techniques.....	33
4.2.2.	Les nouveaux systèmes.....	34
4.3.	La télédétection de l'état hydrique de la végétation.....	34
4.3.1.	Détermination indirecte par télédétection de l'état hydrique de la végétation.....	35
4.3.2.	Détermination directe par télédétection de l'état hydrique de la végétation	37
5.	CONCLUSION.....	38

CHAPITRE 2.

SUIVI DE TERRAIN DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION

1.	PROTOCOLES SPÉCIFIQUES DE MESURE DE L'ÉTAT HYDRIQUE DES PLANTES.....	41
1.1.	Techniques pour mesurer l'état hydrique d'une plante.....	41
1.1.1.	Mesure par étuvage.....	41
1.1.2.	Mesure de propriétés électriques.....	41
1.1.3.	Mesure mécanique.....	42
1.1.4.	Mesure chimique.....	42
1.1.5.	La méthode retenue et les indices associés.....	43
1.2.	Caractéristiques du matériel végétal.....	45
1.2.1.	L'âge du feuillage.....	46
1.2.2.	Localisation et orientation des feuilles.....	46
1.2.2.1.	<i>Feuilles de lumière ou feuilles d'ombre.....</i>	<i>47</i>
1.2.2.2.	<i>Exposition du feuillage.....</i>	<i>48</i>
1.2.3.	Synthèse sur le feuillage à prélever.....	48
1.3.	Caractéristiques temporelles des prélèvements.....	48
1.3.1.	Variations journalières.....	48
1.3.1.1.	<i>Études existantes.....</i>	<i>48</i>
1.3.1.2.	<i>Protocole mis en œuvre.....</i>	<i>50</i>
1.3.1.3.	<i>Lien avec les paramètres météorologiques.....</i>	<i>51</i>
1.3.1.4.	<i>Conclusion.....</i>	<i>52</i>
1.3.2.	Variations saisonnières.....	53

1.4.	Caractéristiques spatiales des prélèvements.....	58
1.4.1.	État de l'art.....	58
1.4.2.	Choix des sites : garrigue et maquis.....	58
1.4.2.1.	<i>Causse d'Aumelas dans l'Hérault.....</i>	<i>59</i>
1.4.2.2.	<i>Massif des Maures dans le Var.....</i>	<i>60</i>
1.4.3.	Suivi multi-échelle.....	61
1.4.3.1.	<i>Variation d'un individu à l'autre.....</i>	<i>61</i>
1.4.3.2.	<i>Variation d'un bouquet à l'autre.....</i>	<i>61</i>
2.	INDICES DE RISQUE MÉTÉOROLOGIQUE ET TENEUR EN EAU DE LA VÉGÉTATION.....	62
3.	COMPORTEMENT SPATIAL DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION MÉDITERRANÉENNE.....	65
3.1.	Contexte.....	65
3.2.	Analyse géostatistique.....	66
3.3.	Statistiques descriptives du comportement spatial.....	69
3.3.1.	Effet de la station de mesure.....	69
3.3.2.	Effet de l'individu.....	71
3.4.	Conclusion.....	71
4.	COMPORTEMENT TEMPOREL DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION MÉDITERRANÉENNE.....	72
4.1.	Analyse de tendance.....	73
4.2.	Statistiques descriptives du comportement temporel.....	73
4.3.	Analyses de variance et factorielles.....	74
4.4.	Conclusion.....	74
5.	SYNTHÈSE	75

CHAPITRE 3.

SPECTROSCOPIE PROCHE INFRAROUGE DE LA TENEUR EN EAU DES FEUILLES

1.	LA SPECTROSCOPIE PROCHE INFRAROUGE.....	78
1.1.	Réflectance, absorptance et transmittance.....	78
1.2.	Le spectre de l'eau.....	80
1.2.1.	La molécule H ₂ O.....	80
1.2.2.	Les liaisons.....	81
1.2.3.	Quantification de l'énergie des atomes.....	81
1.2.4.	Le spectre de l'eau dans la plante.....	84

1.3.	Le stress hydrique par spectroscopie.....	85
1.3.1.	Contexte.....	85
1.3.2.	Modélisation radiative appliquée.....	86
1.3.2.1.	<i>Modèle à l'échelle de la feuille.....</i>	<i>86</i>
1.3.2.2.	<i>Modèle à l'échelle du couvert végétal.....</i>	<i>86</i>
1.3.2.3.	<i>Traitements et résultats.....</i>	<i>87</i>
2.	CHIMIOMÉTRIE.....	89
2.1.	Étalonnage des données.....	90
2.1.1.	Méthodes factorielles.....	91
2.1.1.1.	<i>Choix et réduction du nombre de facteurs.....</i>	<i>91</i>
2.1.1.2.	<i>La régression Partial Least Square PLS.....</i>	<i>91</i>
2.1.2.	Méthode sélective de régression multiple pas à pas.....	91
2.2.	Validation des modèles.....	92
2.2.1.	Écart-type d'étalonnage.....	92
2.2.2.	Écart-type de prédiction.....	93
2.2.3.	Écart-type de validation croisée.....	94
3.	SPECTROSCOPIE PROCHE INFRAROUGE DES FEUILLES FRAÎCHES DE VÉGÉTATION MÉDITERRANÉENNE ET SIMULATION DES CAPTEURS SATELLITAIRES.....	95
3.1.	État de l'art.....	95
3.2.	Protocoles et matériels.....	96
3.2.1.	Le matériel végétal à prélever.....	96
3.2.2.	Protocoles de mesure.....	96
3.2.2.1.	<i>Étude du comportement spectral des feuilles de deux chênes méditerranéens.....</i>	<i>96</i>
3.2.2.2.	<i>Mesure de la réflectance de feuilles par spectroscopie et calcul de leur état hydrique.....</i>	<i>96</i>
3.2.3.	Matériels expérimentaux.....	97
3.2.3.1.	<i>Le spectroradiomètre.....</i>	<i>97</i>
3.2.3.2.	<i>Le couplage d'une sphère d'intégration.....</i>	<i>97</i>
3.2.3.3.	<i>Autres matériels.....</i>	<i>99</i>
3.2.3.4.	<i>Erreurs et incertitudes.....</i>	<i>99</i>
3.2.3.4.1.	<i>Étalonnage et correction des mesures de transmittance.....</i>	<i>99</i>
3.2.3.4.2.	<i>Précision des mesures spectrales.....</i>	<i>101</i>
3.2.3.4.3.	<i>Précision des indices de teneur en eau.....</i>	<i>101</i>

3.3.	Résultats.....	102
3.3.1.	Réflectance, absorptance et transmittance de feuilles types.....	102
3.3.2.	Modélisation des spectres de réflectance pour estimer l'état hydrique des feuilles.....	103
3.3.2.1.	<i>Données initiales.....</i>	103
3.3.2.2.	<i>Corrélation des spectres aux indices d'état hydrique.....</i>	105
3.3.2.3.	<i>Pré-traitement des spectres.....</i>	106
3.3.2.4.	<i>Méthode d'étalonnage-validation retenue.....</i>	106
3.3.2.5.	<i>Résultats des modèles d'étalonnage MLR.....</i>	107
3.3.2.6.	<i>Conclusion.....</i>	107
3.3.3.	Simulation des capteurs satellitaires à partir des spectres de réflectance...	108
3.3.3.1.	<i>Caractéristiques des capteurs satellitaires.....</i>	108
3.3.3.2.	<i>Spectres moyens.....</i>	109
3.3.3.3.	<i>Prédiction avec l'ensemble des bandes.....</i>	109
3.3.3.4.	<i>Prédiction sans les canaux vert et bleu.....</i>	111
3.4.	Discussion.....	111
4.	SPECTROSCOPIE PROCHE INFRAROUGE DES FEUILLES SÈCHES DE VÉGÉTATION MÉDITERRANÉENNE.....	113
4.1.	État de l'art.....	113
4.2.	Protocoles et matériels.....	114
4.2.1.	État hydrique foliaire de terrain.....	114
4.2.2.	Spectrométrie proche infrarouge.....	115
4.2.3.	Phases d'étalonnage et pré-traitements.....	116
4.2.4.	Interprétation statistique de la qualité de la modélisation.....	117
4.3.	Résultats.....	118
4.3.1.	Teneur en eau FMC.....	118
4.3.2.	Relation entre l'indice FMC et les spectres.....	118
4.3.3.	Étalonnage PLS par espèce.....	119
4.3.4.	Étalonnage PLS toutes espèces confondues.....	120
4.3.5.	Comparaison des trois équations globales d'étalonnage.....	121
4.4.	Discussion.....	122
4.4.1.	Relation entre la teneur en eau d'une feuille et ses propriétés spectrales à l'état sec.....	122
4.4.2.	Différences spectrales inter-annuelles du feuillage.....	123
4.4.3.	Perspectives.....	123
5.	SYNTHÈSE.....	125

CHAPITRE 4.

TÉLÉDÉTECTION À HAUTE RÉOLUTION DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION

1.	ÉTAT DE L'ART.....	129
2.	CARTOGRAPHIE ET ESTIMATION DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION PAR SPOT-HRVIR.....	131
2.1.	Contexte et objectifs.....	131
2.2.	Données.....	132
2.2.1.	Teneur en eau de référence.....	132
2.2.2.	Images SPOT-HRVIR.....	133
2.3.	Traitements des images.....	135
2.3.1.	Sélection des zones à risque par l'intermédiaire des données CORINE Land Cover.....	135
2.3.2.	Transformation des luminances en réflectances.....	136
2.3.3.	Corrections atmosphériques.....	137
2.3.3.1.	Absorption et diffusion du rayonnement par l'atmosphère....	137
2.3.3.2.	Qualité des images.....	137
2.3.3.3.	Méthodes de correction.....	138
2.3.3.3.1.	Modèles globaux.....	138
2.3.3.3.2.	Méthode Dark Object Subtraction DOS.....	139
2.3.3.3.3.	Méthode COST.....	139
2.3.3.3.4.	Méthode retenue.....	140
2.3.4.	Calcul des indices satellitaires.....	140
2.4.	Résultats.....	141
2.4.1.	Cartographie de la variation de l'état hydrique.....	141
2.4.2.	Estimation de l'état hydrique à partir des réflectances SPOT-HRVIR.....	142
2.4.2.1.	Indice FMC de référence.....	143
2.4.2.2.	Relation entre la FMC et les autres indices satellitaires.....	144
2.4.2.3.	Régression multiple entre l'indice FMC et les bandes spectrales de SPOT-HRVIR.....	144
2.5.	Discussion.....	146
2.5.1.	Cartographie des zones de forte variation de l'état hydrique.....	146
2.5.2.	Estimation de l'état hydrique de la végétation à partir des réflectances de SPOT-HRVIR.....	147
3.	RÉSOLUTION SPATIALE RÉELLE D'UN PIXEL PAR SPOT-HRVIR À PARTIR D'IMAGES DU DRONE PIXY®.....	148
3.1.	Données.....	148
3.2.	Méthodes.....	149
3.3.	Résultats.....	150
3.4.	Discussion.....	151

CHAPITRE 5.

TÉLÉDÉTECTION À BASSE RÉOLUTION DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE LA VÉGÉTATION

1.	CONTEXTE DE L'ÉTUDE.....	155
1.1.	Des études spécifiques et de nombreux indices.....	155
1.2.	Intérêt de NOAA-AVHRR pour le suivi de la végétation.....	156
1.2.1.	Le capteur.....	156
1.2.2.	Les études.....	157
1.3.	Intérêt de SPOT-VÉGÉTATION pour le suivi de la végétation.....	157
1.3.1.	Les capteurs.....	157
1.3.2.	Les produits.....	158
1.3.2.1.	Les images journalières : produit P.....	158
1.3.2.2.	Les synthèses à 10 jours : produits S10 et D10.....	159
1.3.3.	Les études.....	160
1.4.	Intérêt du nouveau capteur MODIS pour le suivi de la végétation.....	160
1.4.1.	Le capteur.....	160
1.4.2.	Les produits.....	161
1.4.2.1.	Produit MOD09A, réflectances journalières.....	161
1.4.2.2.	Produit MOD09A1, synthèse sur 8 jours.....	162
1.4.2.3.	Produit MOD43, BRDF/Albédo, synthèse sur 16 jours.....	163
1.4.2.4.	Produit MOD11, température de surface quotidienne.....	164
1.4.3.	Les études.....	164
2.	TENEUR EN EAU DE RÉFÉRENCE.....	165
2.1.	Réseau opérationnel de l'Office National des Forêts.....	165
2.2.	Deux sites à vocation de recherche.....	166
2.3.	Qualité des données.....	166
2.4.	Pré-traitement des données de référence.....	168
3.	DONNÉES ET MÉTHODES.....	169
3.1.	Indices satellitaires.....	169
3.2.	Base de données.....	170
3.3.	Pré-traitement des images satellitaires.....	171
3.3.1.	Coordonnées spatiales et projection.....	171
3.3.2.	Autres pré-traitements.....	172
3.3.3.	Pré-traitement NOAA.....	173
3.3.4.	Pré-traitement VEGETATION.....	174
3.3.5.	Pré-traitement MODIS.....	174
3.3.5.1.	Données de réflectance 1 et 8 jours.....	174
3.3.5.2.	Données de température de surface 1 jour.....	175
3.3.5.3.	Données de réflectance 16 jours.....	175

4.	RÉSULTATS.....	176
4.1.	Analyse multivariée des sites et des espèces suivies.....	176
4.1.1.	Méthodes statistiques.....	176
4.1.1.1.	<i>Analyse des Composantes Multiples.....</i>	<i>176</i>
4.1.1.2.	<i>Analyse Factorielle des Correspondances.....</i>	<i>176</i>
4.1.1.3.	<i>Analyse en Nuées dynamiques.....</i>	<i>177</i>
4.1.2.	Résultats des analyses multivariées.....	177
4.1.2.1.	<i>Les variables abiotiques et la teneur en eau FMC....</i>	<i>177</i>
4.1.2.2.	<i>Les variables biotiques et la teneur en eau FMC.....</i>	<i>178</i>
4.2.	NOAA-AVHRR pour suivre l'état hydrique de la végétation.....	179
4.2.1.	Données initiales utilisées.....	179
4.2.2.	Relations entre la teneur en eau FMC et les données satellitaires journalières.....	181
4.2.3.	Relations entre la teneur en eau FMC et les images satellitaires de synthèse à 9 jours.....	182
4.2.4.	Prévision de la teneur en eau FMC par régressions multiples.....	183
4.2.5.	Conclusion.....	185
4.3.	SPOT-VEGETATION pour suivre l'état hydrique de la végétation.....	186
4.3.1.	Relation entre la teneur en eau FMC et les images satellitaires journalières.....	186
4.3.2.	Relation entre la teneur en eau FMC et les images de synthèse à 10 jours.....	187
4.3.3.	Prévision de la teneur en eau.....	189
4.3.4.	Cartographie de la variation de l'état hydrique à partir des images de synthèse à 10 jours.....	189
4.3.5.	Conclusion.....	190
4.4.	TERRA-MODIS pour suivre l'état hydrique de la végétation.....	191
4.4.1.	Relation entre la teneur en eau FMC et les images satellitaires MODIS de niveau 3.....	191
4.4.2.	Nouveaux produits MODIS de qualité améliorée.....	192
4.4.2.1.	<i>Principaux changements.....</i>	<i>193</i>
4.4.2.2.	<i>Méthodologie.....</i>	<i>194</i>
4.4.2.3.	<i>Réflectances journalières de l'été 2001 en niveaux 3 et 4...194</i>	
4.4.2.4.	<i>Réflectances de 8 jours de l'été 2001 en niveaux 3 et 4.....194</i>	
4.4.2.5.	<i>Période ensoleillée du 21 au 28 août 2001(J 233 à J 240)...195</i>	
4.4.2.6.	<i>Période nuageuse du 4 au 11 juillet 2001 (J 185 à J 192)...195</i>	
4.4.2.7.	<i>Réflectances de 16 jours de l'été 2001 en niveaux 3 et 4....196</i>	
4.4.2.8.	<i>Réflectances à 16 jours de l'été 2003 en niveau 4.....199</i>	
4.4.2.9.	<i>Synthèse.....</i>	<i>200</i>
4.4.2.9.1.	Produit MOD09GHK, réflectances journalières.....	200
4.4.2.9.2.	Produit MOD09A1A, synthèse à 8 jours.....	200
4.4.2.9.3.	Produit MOD43B4, NBAR.....	200

4.4.3.	Correction des effets bidirectionnels des données journalières MODIS.....	201
4.4.3.1.	Généralité.....	201
4.4.3.2.	Modèle de correction de la NASA.....	202
4.4.3.3.	Inversion du modèle.....	203
4.4.3.4.	Résultats.....	203
4.4.3.5.	Conclusion.....	204
5.	SYNTHÈSE.....	206

CHAPITRE 6.

DISCUSSION GÉNÉRALE : CONTRIBUTIONS PRATIQUES ET THÉORIQUES

1.	DISCUSSION DES RÉSULTATS.....	209
1.1.	Protocole de terrain optimisé.....	209
1.2.	Importance du Moyen Infrarouge Réflectif.....	209
1.3.	Estimation de l'état hydrique par télédétection.....	209
2.	DISCUSSION DES MÉTHODES.....	211
2.1.	Notion d'échelles d'observation.....	211
2.2.	Notion de résolutions.....	212
2.2.1.	Résolution spatiale.....	212
2.2.2.	Résolution temporelle.....	212
2.2.3.	Résolution spectrale.....	212
3.	PERSPECTIVES.....	213
3.1.	Vers un système opérationnel intégré.....	213
3.1.1.	Le système existant.....	213
3.1.2.	Intégration de la télédétection.....	213
3.1.3.	Amélioration du découpage du risque météorologique.....	214
3.1.4.	Un système d'information géographique de l'état hydrique de la végétation.....	215
3.2.	La télédétection et les projets futurs.....	215
3.2.1.	La végétation et les anciens capteurs.....	215
3.2.2.	Le capteur VEGETATION de SPOT.....	216
3.2.3.	Les améliorations de MODIS.....	217
3.2.4.	Les capteurs en projet.....	217
3.2.4.1.	Le projet RHEA.....	218
3.2.4.2.	Le projet SPECTRA.....	218
3.2.4.3.	Autres projets.....	218
3.2.5.	La gestion mondiale des catastrophes.....	219
3.2.5.1.	Estimation des besoins.....	219
3.2.5.2.	Le projet Disaster Monitoring Constellation DMC.....	219
4.	CONCLUSION.....	221