
**INDICES SATELLITAUX ET STRESS HYDRIQUE DE LA VEGETATION MEDITERRANEENNE :
DU BOSQUET AU PIXEL**

Responsable scientifique : DESHAYES Michel

laboratoire: UMR Cemagref-ENGREF Structures et Systèmes spatiaux

Maison de la Télédétection

500, rue Jean-François Breton

34093 Montpellier Cedex

Tél. 04 67 54 87 51/54

Fax. 04 67 54 87 00

e mail : michel.deshayes@cemagref.fr

Personnel détaillé par laboratoire et fonction dans le projet :

Nom	laboratoire	fonction
DESHAYES Michel	Cemagref	Enseignant chercheur, chef du projet
DEVAUX Nicolas	Cemagref	Ingénieur d'étude Cemagref
XX	Cemagref	Stagiaire Cemagref
VALETTE Jean-Charles	INRA	IR INRA, responsable INRA
MORO Claude	INRA	Technicien INRA
XX	INRA	Stagiaire INRA
RAMBAL Serge	CEFE/CNRS	Ingénieur de Recherches CNRS
JOFFRE Richard	CEFE/CNRS	Chargé de Recherches CNRS
GILLON Dominique	CEFE/CNRS	Chargée de Recherches CNRS
METHY Maurice	CEFE/CNRS	Ingénieur de Recherches CNRS
XX	CEFE/CNRS	Stagiaire CNRS
MAILLET Albert	ONF	Ingénieur, responsable ONF

SOMMAIRE

Résumé du projet, résultats attendus	1
Indices satellitaires et stress hydrique de la végétation méditerranéenne : du bosquet au pixel.....	3
1. Situation du sujet de recherche	3
2. Etat de l'art.....	4
3. Travaux effectués par les équipes proposant le projet	5
4. Plan de recherche	6
4.1 Objectifs.....	6
4.2 Méthode.....	6
4.2.1 Sélection des sites kilométriques	6
4.2.2 Grille de prélèvement dans chaque site kilométrique.....	6
4.2.3 Localisation des parcelles kilométriques	7
4.2.4 Prélèvements	7
4.2.5 Séchage et pesage.....	7
4.2.6 Analyse des résultats des mesures d'humidité de terrain	7
4.2.7 Mesure de la variabilité spatiale des caractéristiques spectrales	7
4.2.8 Suivi des caractéristiques spectrales de la végétation sous stress hydrique	7
4.2.9 Confrontation avec les indices satellitaires.....	8
4.3 Innovation et avantages escomptés.....	8

RESUME DU PROJET, RESULTATS ATTENDUS

L'ensemble des recherches et études conduites sur le risque feux de forêts depuis une trentaine d'années tant en France qu'à l'étranger, ont permis de préciser le rôle de la composante hydrique du combustible sans toutefois déboucher sur sa prise en compte satisfaisante dans la détermination opérationnelle et officielle du niveau de risque.

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

- l'utilisation d'indices météorologiques spatialisés par sous-régions d'environ 1 000 km², intégrant un état de la végétation simulé par un calcul de bilan hydrique,
- La mesure de l'humidité de certains végétaux sur des placettes de l'ordre de la dizaine de m².

Depuis le début des années 90, des études ont montré l'intérêt potentiel d'indices dérivés des données satellitales NOAA-AVHRR. Après des démonstrations de la variabilité spatio-temporelle de ces indices, un premier type de validation (validation indirecte) a été expérimenté à partir des incendies passés.

Rapidement, les utilisateurs ont fait part de leur souhait de baser la validation sur des mesures d'humidité de végétaux, à partir de deux dispositifs :

- un dispositif piloté par l'INRA, qui comprend 13 stations visitées 2 fois par semaine,
- et un second dispositif, géré par l'ONF, couvrant les 15 départements méditerranéens français, et comprenant 30 stations.

Ce type de validation directe vient d'être réalisée dans le cadre du projet européen MEGAFIREs pour les étés 96 et 97. Les résultats sont globalement satisfaisants, avec par exemple des corrélations aux deux tiers significatives (Deshayes & Stach 1998, Deshayes et al, 1998).

Cependant ces résultats présentent une variabilité inexplicée : certains sites présentent des corrélations plus basses et selon les pays, le type d'indice le plus efficace est variable (NDVI, Ts...). Deux types de raison ont été évoqués : une représentativité insuffisante des mesures de terrain, et la non prise en compte des effets directionnels et atmosphériques sur la qualité des données.

La présente proposition vise à mettre en œuvre une nouvelle validation directe, qui d'une part tienne compte de ces deux problèmes, et qui d'autre part teste aussi l'intérêt de données améliorées, données VEGETATION et données ATSR2.

Pour ce faire, l'objectif de cette étude est quintuple :

- produire des mesures de l'humidité des végétaux représentatives à l'échelle du pixel NOAA (humidité "kilométrique") sur quelques sites homogènes et à partir d'un échantillonnage de terrain, défini *a priori*, économique mais représentatif à l'échelle du km² (une dizaine de placettes carrées de 50 m espacées de 250 m environ (humidité hectométrique), avec mesure sur chaque placette d'un (ou plusieurs) échantillon(s) somme de 10 prélèvements aléatoires sur la placette),
- effectuer des mesures d'humidité des végétaux sur un dispositif emboîté à l'intérieur du premier : sur 2 à 3 des sites précédents, mini-placettes de 10 m contiguës sur 200 à 250 mètres (humidité décimétrique),
- étudier les variabilités spatiales décimétrique et hectométrique de l'humidité des végétaux, et vérifier ainsi *a posteriori* l'adéquation du dispositif à son objectif,
- mesurer par spectrométrie de réflexion proche infrarouge, chez différentes espèces végétales, les modifications de la réflectance dans le visible et le proche infrarouge en fonction de la contrainte hydrique, et corrélérer ces caractéristiques spectrales aux niveaux de stress hydrique de la végétation,
- tester l'intérêt d'indices satellitaires dérivés de différents capteurs (NOAA-AVHRR, VEGETATION, ATSR2) pour l'estimation du stress hydrique en les corrélant avec les humidités kilométriques et les caractéristiques spectrales produites auparavant. Une attention particulière sera portée à la correction des effets directionnels et atmosphériques.

Sur le plan de l'innovation, l'étude est innovante sur plusieurs points:

- pour clarifier un problème de changement d'échelle, elle se propose d'approfondir certains aspects des variabilités décimétrique, hectométrique et kilométrique de l'humidité de la végétation méditerranéenne, non étudiés à ce jour,
- elle fera des mesures de spectroradiométrie au niveau élémentaire de la feuille, qui permettront de se prononcer sur le comportement spectral d'un élément clé du couvert,
- elle utilisera non seulement des données NOAA-AVHRR, mais aussi des données de meilleure qualité, VEGETATION, ATSR2, et TERRA-MODIS.

-
- un ensemble d'indices classiques sera testé, mais une attention particulière sera portée aux corrections des effets atmosphériques et directionnels, ce qui devrait améliorer la qualité de ceux-ci,
 - à partir des résultats de la spectrométrie de terrain et des performances des indices existants, un nouvel indice pourra être proposé qui combine optimalement les bandes spectrales qui montreront les variations les plus significatives.

C'est l'addition des améliorations et la cohérence de l'ensemble qui doit permettre d'obtenir une validation adaptée aux indices produits afin de pouvoir éventuellement déboucher sur une nouvelle application opérationnelle des données satellitaires.

En effet une information spatialisée sur le stress hydrique serait utile car elle permettrait de compléter et optimiser les réseaux actuels de mesures ponctuelles sur le terrain. Elle peut aussi contribuer à optimiser les dispositifs de prévention de terrain.

À plus long terme, l'évolution technologique va permettre des résolutions spatiales améliorées, dans un premier temps au moins dans la partie non-thermique du spectre : VEGETATION présente déjà une résolution constante de 1km sur tout la largeur de sa fauchée, TERRA-MODIS lancé en décembre 1999 possède 5 bandes avec une résolution de 500m du visible au moyen infrarouge (et même 2 bandes à 250m dans le visible et le proche infrarouge), tandis que le satellite européen ENVISAT, qui sera lancé en juin 2001, emportera le capteur MERIS, doté, du visible au proche infrarouge, de 15 bandes programmables d'une résolution de 300m. Si les résultats recherchés dans cette étude sont encourageants à l'échelle du kilomètre, ces améliorations de résolution permettront d'envisager un suivi continu de zones homogènes de taille plus petite, couvrant donc une plus grande partie de la végétation méditerranéenne, et densifiant d'autant la grille de points entre lesquels une interpolation donnera une estimation du risque plus fiable.

INDICES SATELLITAUX ET STRESS HYDRIQUE DE LA VEGETATION MEDITERRANEENNE : DU BOSQUET AU PIXEL

1. SITUATION DU SUJET DE RECHERCHE

L'ensemble des recherches et études conduites sur le risque feux de forêts depuis une trentaine d'années tant en France qu'à l'étranger, ont permis de préciser le rôle de la composante hydrique du combustible sans toutefois déboucher sur sa prise en compte satisfaisante dans la détermination opérationnelle et officielle du niveau de risque.

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

- l'utilisation d'indices météorologique spatialisés par sous-régions d'environ 1 000 km², intégrant un état de la végétation simulé par un calcul de bilan hydrique,
- la mesure de l'humidité de certains végétaux sur des placettes de l'ordre de la dizaine de m².

Depuis le début des années 90, des études ont montré l'intérêt potentiel d'indices dérivés des données satellitales NOAA-AVHRR.

Après des démonstrations de la variabilité spatio-temporelle de ces indices, un premier test de validation a été fait à partir des incendies passés.

Rapidement, les utilisateurs ont fait part de leur souhait de baser la validation sur des mesures d'humidité de végétaux.

Cependant ce type de validation se heurte à la différence d'échelle entre des indices calculés sur des pixels de 1 km² (ou même sur des pavés 3 x 3 pixels, soit 10 km²) et des mesures de terrain prises sur une dizaine de m².

2. ETAT DE L'ART

Les activités sur le thème ont démarré en France en 90 par des travaux menés par le BRGM et l'INRA.

Ces études reprises par le Laboratoire Commun de Télédétection CEMAGREF-ENGREF à partir de 91 avec des données NOAA-AVHRR de 90, 91 et 92 ont permis de vérifier l'intérêt de ces données et ont conduit à la mise au point d'un nouvel indice (Vidal et al 1994

Des travaux semblables étaient conduits à l'Université d'Aix-Marseille (Prosper-Laget et al 1995).

Au vu de ces premiers résultats, l'été 94 donnait lieu à une campagne à double objectif, opérationnel et scientifique.

Sur le plan opérationnel, il s'agissait de tester la faisabilité d'une utilisation en temps réel des données (fourniture des données brutes par Météo-France, traitement au LCT, transmission par fax au CIRCOSC).

Cet objectif fut atteint, mais la transmission par fax a limité l'exploitation des données par l'utilisateur.

Sur le plan scientifique, un test de validité par confrontation avec les localisations de départ de feu et de surfaces brûlées (validation indirecte) fut effectué, qui donna des résultats variables, cette variabilité pouvant être attribuée à l'influence de facteurs autres que le stress hydrique.

En conséquence, les utilisateurs demandaient que la cartographie du stress hydrique fasse l'objet d'une validation directe par utilisation des mesures d'humidité de la végétation effectuées par l'INRA sur le massif des Maures.

Ces mesures sont effectuées dans le cadre d'un dispositif lourd en termes de collecte d'échantillons sur le terrain et de mesures au laboratoire, démarré en 94, et qui comprend 13 stations visitées 2 fois par semaine.

Depuis 1996, ce dispositif est complété par un second dispositif, géré par l'ONF, couvrant les 15 départements méditerranéens français, et comprenant 30 stations.

La validation directe demandée a pu être réalisée dans le cadre du projet européen Megafires.

La validation faite en différé a porté sur les étés 96 et 97.

Une dizaine d'indices, basés uniquement sur données satellitaires (indice de végétation, température de surface, combinaison de deux) ou utilisant aussi des données météo, ont pu être testés (Desbois et al, 1997b).

La validation a porté sur les sites français INRA et ONF, mais aussi sur des sites espagnols et grecs (Desbois et al. 1997a).

Les résultats sont globalement satisfaisants, avec par exemple des corrélations significatives aux deux tiers (Deshayes & Stach 1998, Deshayes *et al.* 1998, Chuvieco *et al.* 1999).

Cependant ces résultats présentent une variabilité inexplicée : certains sites présentent des corrélations plus basses et selon les pays, le type d'indice le plus efficace est variable (NDVI, Ts...).

Deux types de raison ont été évoqués :

- une représentativité insuffisante des mesures de terrain,
- et la non prise en compte des effets directionnels et atmosphériques sur la qualité des données.

La présente proposition vise à mettre en œuvre une nouvelle validation directe, qui d'une part tienne compte de ces deux problèmes, et qui d'autre part teste aussi l'intérêt de données améliorées, données VEGETATION, ATSR2 et TERRA-MODIS.

3. TRAVAUX EFFECTUES PAR LES EQUIPES PROPOSANT LE PROJET

L'équipe scientifique se proposant de conduire cette étude comprend des scientifiques et ingénieurs de quatre institutions : Cemagref (UMR-3S), CNRS, INRA et ONF.

L'UMR Cemagref-ENGREF Structures et Systèmes Spatiaux conduit une recherche sur le thème télédétection et stress hydrique depuis 1991.

De 1996 à 1998, ces études ont été conduites dans le cadre du projet européen Megafires (*Remote sensing of large wildland fires in the Mediterranean region*).

L'équipe Protection contre les incendies de forêt de l'INRA-Avignon travaille, entre autres sujets, sur le thème de l'humidité des végétaux en région méditerranéenne depuis la fin des années 1980.

Depuis de nombreuses années, l'équipe du CEFE (CNRS) travaille d'une part sur le stress hydrique de la végétation sempervirente méditerranéenne, d'autre part sur l'utilisation de la SPIR pour la caractérisation de propriétés fonctionnelles du matériel végétal

L'ensemble de ces recherches a donné lieu aux publications suivantes :

CHUVIECO E., DESHAYES M., STACH N., COCERO D. RIAÑO D., 1999. Short-term fire risk: foliage moisture content estimation from satellite data. In: *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin* (Chuvieco, E. Ed.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 17-38.

DESBOIS, N., DESHAYES, M. & BEAUDOIN, A. (1997a), Protocol for fuel moisture content measurements. In: *A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires* (E. Chuvieco, Ed.), Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, pp. 61-72.

DESBOIS, N., PEREIRA, J.M., BEAUDOIN, A., CHUVIECO, E. & VIDAL, A. (1997b), Short term fire risk mapping using remote sensing. In: *A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires* (E. Chuvieco, Ed.), Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, pp. 29-60.

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. In *proceedings III International Conference on Forest Fire Research – 14th Conference on Fire and Forest Meteorology*,

16-20 November 1998, Coimbra, Portugal, 1149-1167.

DESHAYES M. & STACH N., 1998. Fuel moisture assessment from NOAA-AVHRR data. In *MEGAFIREs project final report*, Contract ENV-CT96-0256, 57-86.

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., HOUSSARD C., JOFFRE R. (1999) Using near-infrared reflectance spectroscopy to predict carbon, nitrogen and phosphorus content in heterogeneous plant material. *Oecologia* 118 : 173-182.

GROSSIORD R et C MORO, 1998.- Teneur en eau de combustibles forestiers méditerranéens; bilan des campagnes 1996 et 1997. INRA-PIF, Avignon, 103 p

METHY M, JOFFRE R, RAMBAL S 1999 – Remote sensing of canopy photosynthetic performances: two complementary ways for assessing the photochemical reflectance index. *Photosynthetica*, 37, 239-247.

METHY M., JOFFRE J., OURCIVAL J.M. 1998. Two ways of assessing absorbance of fresh leaves from near-infrared reflectance spectroscopy. *Int. J. Remote Sens.*19, 1741-1750.

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 et VALETTE J C, 1996 - Teneur en eau de combustibles forestiers méditerranéens. INRA-PIF, Avignon, 29 p

VALETTE JC, 1991.- Évolution temporelle des paramètres d'inflammabilité et des données satellitaires de juin à septembre 1990. Réunion technique sur l'information météorologique pour l'application des mesures de prévention et de lutte concernant les incendies de forêt. Rabat (Maroc), 25-30 novembre 1991, 262-274

VALETTE JC, B SOL and C MORO, 1994.- Flammability parameters and soil water reserve to improve the forecast of the meteorological forest fire danger index. 2nd International Conference on Forest Fire Research, 21-24 November 1994, Coimbra (Portugal), II, C08, 611-624

VIDAL A., PINGLO F., DURAND H., DEVAUX-ROS C., MAILLET A., 1994. Evaluation of a temporal fire risk index in Mediterranean forests from NOAA thermal IR. *Remote Sens. Environ.*, 49 (3), 296-303.

4. PLAN DE RECHERCHE

4.1 OBJECTIFS

Depuis le début des années 90, des études ont montré l'intérêt potentiel d'indices dérivés de données satellitales.

Après des démonstrations de la variabilité spatio-temporelle de ces indices, un premier type de validation a été expérimenté à partir des incendies passés.

Rapidement, les utilisateurs ont fait part de leur souhait de baser la validation sur des mesures d'humidité de végétaux.

Cependant ce type de validation se heurte à la différence d'échelle entre des indices calculés sur des pixels de 1,2 km² (ou même sur des pavés 3 x 3 pixels, soit 10 km²) et des mesures de terrain prises sur une dizaine de m².

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

- produire des mesures de l'humidité des végétaux représentatives à l'échelle du pixel NOAA (humidité "kilométrique") sur quelques sites homogènes, à partir d'un échantillonnage de terrain, défini *a priori*, économique mais représentatif à l'échelle du km² (placettes carrées de 50 m espacées de 250 m environ (humidité hectométrique), avec mesure sur chaque placette d'un (ou plusieurs) échantillon(s) somme de 10 prélèvements aléatoires sur la placette),
- effectuer des mesures d'humidité des végétaux sur un dispositif emboîté à l'intérieur du premier : sur 2 à 3 des sites précédents, mini-placettes de 10 m contiguës sur 200 à 250 mètres (humidité décimétrique),
- étudier les variabilités spatiales décimétrique et hectométrique de l'humidité des végétaux, et vérifier ainsi *a posteriori* l'adéquation du dispositif à son objectif,
- mesurer par spectrométrie de réflexion proche infrarouge, chez différentes espèces végétales, les modifications de la réflectance dans le visible et le proche infrarouge en fonction de la contrainte hydrique, et corrélérer ces caractéristiques spectrales aux niveaux de stress hydrique de la végétation,
- tester l'intérêt d'indices satellitaires dérivés de différents capteurs (NOAA-AVHRR, ATSR2, VEGETATION) pour l'estimation du stress hydrique en les corrélant avec les humidités kilométriques et les caractéristiques spectrales produites auparavant. Une attention particulière sera portée à la correction des effets directionnels et atmosphériques.

4.2 METHODE

4.2.1 Sélection des sites kilométriques

Un certain nombre de sites (bi-)kilométriques seront sélectionnés pour cette étude. Ils devront répondre aux critères suivants :

- Taille du site : site carré, d'environ 2 km de côté, afin d'être sûr de pouvoir y inscrire un pixel satellital de 1-1,1 km de côté, dont la grille se place aléatoirement à chaque passage,
- homogénéité de la végétation (petit nombre d'espèces dominantes, si possible 1 ou 2), avec une strate dominante de ligneux bas (2 à 3 m maximum) ;
- terrain plat ou peu pentu, à exposition uniforme ;
- présence de chemins pour faciliter une récolte d'échantillons sur toute la zone dans un minimum de temps ;
- recherche d'un jeu de sites présentant un gradient de sécheresse ;
- si possible proximité de plusieurs sites kilométriques pour permettre le recueil d'échantillons dans le créneau horaire optimal.

4.2.2 Grille de prélèvement dans chaque site kilométrique

La grille de prélèvements est construite pour répondre aux deux objectifs de l'étude :

- produire une mesure synthétique, tout en étant économique, de l'humidité des végétaux à l'échelle du pixel NOAA-AVHRR,
- permettre de cerner l'échelle de variabilité spatiale de l'humidité des végétaux.

Ce double objectif sera obtenu d'une part par une grille linéaire régulière au maillage moyen (une dizaine de placettes espacées tous les 250 à 300m), et d'autre part par des mesures sur un dispositif linéaire à une maille fine de 5 à 10 m autour de certains nœuds.

Le premier objectif sera alors obtenu par krigeage sur les nœuds de la grille moyenne, et le second par l'étude de semi-variogrammes sur les dispositifs à maille fine.

Le pas des grilles moyennes et celui des dispositifs à maille fine devront être adaptés en fonction des contraintes de temps (prélèvement dans un créneau horaire réduit), et en fonction des premiers résultats obtenus.

4.2.3 Localisation des parcelles kilométriques

Les sites, où seront implantées les deux grilles (à maille moyenne et à maille fine), seront :

- sous la responsabilité du LCT, en liaison avec le CEFE, un site à 20km à l'ouest de Montpellier – Cournonterral ;
- sous la responsabilité de l'INRA, un site près d'Avignon (Mur de la Peste ou Marguerittes), et un dans le massif des Maures (du fait des conditions de ce massif – relief plus prononcé, moindre présence de voies carrossables - le dispositif devra sans doute être adapté afin de permettre la collecte dans le temps imparti. Cette adaptation aura lieu lors de la mise en place du dispositif en début de campagne).
- sous la responsabilité de l'ONF, un ou deux sites (choix à finaliser en fonction de différentes contraintes).

L'accès à la couverture photo de l'IFN-Montpellier permettra d'affiner le choix des sites.

4.2.4 Prélèvements

Les prélèvements seront basés sur le protocole INRA/ONF.

Les prélèvements devront être effectués, deux fois par semaine, dans les 2 heures qui encadrent le passage à mi-journée du satellite NOAA, soit de 13H à 15H.

Pour le maillage " grossier " bi-kilométrique, les prélèvements seront effectués à intervalles réguliers, le long d'une voie d'accès traversant la zone et en s'éloignant suffisamment de celle-ci.

Les points de prélèvement seront marqués sur le terrain et repérés par GPS.

Le rapprochement avec des données GPS de référence permettra l'accès à une précision métrique dans le repérage, qui garantira que les échantillons auront toujours été prélevés aux mêmes endroits, et rendra possible l'analyse de l'évolution temporelle de chaque station.

Dans un premier temps, de 3 à 5 répétitions seront faites sur chaque placette pour examiner la variabilité de la mesure sur une placette.

En fonction des résultats obtenus, le nombre de répétitions pourra être diminué.

4.2.5 Séchage et pesage

Les échantillons prélevés sur chaque point de prélèvement seront stockés dans des contenants aluminium hermétiques avec un étiquetage explicitant la parcelle, le point de mesure et la nature du prélèvement.

Ces contenants seront conditionnés dans des glacières afin d'éviter leur dessiccation.

De retour au laboratoire, les échantillons seront pesés avec une balance de précision afin d'en déterminer le poids frais, encore appelé poids humide (Ph).

Les échantillons seront placés en étuve pendant 24 heures à une température de 60°C.

Une seconde pesée permettra alors de déterminer leur poids sec (Ps). L'humidité relative des échantillons sera alors calculée par la formule :

$$H\% = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100.$$

4.2.6 Analyse des résultats des mesures d'humidité de terrain

Les résultats seront analysés selon les axes suivants :

- analyse temporelle des mesures de chaque point de prélèvement,
- analyse de la variabilité spatiale des humidités à l'intérieur de chaque grappe,
- analyse de la variabilité spatiale des humidités à l'intérieur de chaque site bi-kilométrique,
- génération des mesures d'humidité représentatives à l'échelle du pixel satellital (humidité kilométrique)

4.2.7 Mesure de la variabilité spatiale des caractéristiques spectrales

Les échantillons, prélevés au cours de la première série de prélèvements réalisée à différentes échelles pour évaluer la variabilité spatiale de la teneur en eau, seront analysés par spectrométrie de réflexion proche infrarouge (SPIR) entre 400 et 2500 nm (NIRS 6500).

4.2.8 Suivi des caractéristiques spectrales de la végétation sous stress hydrique

Les espèces végétales suivies sur les placettes seront cultivées en pot au laboratoire et soumises à un stress hydrique contrôlé et croissant. À chaque étape du stress, le potentiel hydrique des plantes et la teneur en eau des feuilles seront mesurés et les caractéristiques spectrales des feuilles vertes entières, puis séchées et broyées, seront mesurées par SPIR entre 400 et 2500 nm.

Les spectres des échantillons verts apporteront des informations sur l'eau contenue dans les feuilles, ceux des échantillons secs contiendront l'information biochimique. Des corrélations seront tentées entre les différentes mesures de stress hydrique et les caractéristiques spectrales des feuilles. Des mesures ponctuelles seront également réalisées à partir de plantes prélevées sur le terrain.

4.2.9 Confrontation avec les indices satellitaires

Les mesures de terrain serviront à valider des indices construits à partir de trois types de données : données NOAA-AVHRR, données VEGETATION et données ATSR2.

Données NOAA-AVHRR

La confrontation sera effectuée par le Cemagref à partir d'images NOAA, fournies par Météo-France.

Données VEGETATION

Le capteur VEGETATION est installé sur le satellite SPOT-4 et il fournit des données d'une qualité géométrique et radiométrique supérieure aux données AVHRR.

Elles ont en effet une résolution constante de 1 km sur une fauchée d'une largeur de 2 250 km (rappelons que la taille du pixel AVHRR varie de 1,1 km au centre jusque 6,5x2,5 km en bordure de fauchée) et elles sont rééchantillonnées selon une grille régulière dans une projection cartographique donnée.

Elles comprennent 4 canaux identiques à ceux de SPOT-HRVIR : 3 canaux dans le visible et le proche infrarouge (0,5-0,9 μm) et un canal dans le moyen infrarouge (1,5-1,75 μm).

Elles sont d'autre part corrigées des effets atmosphériques (vapeur d'eau, ozone et aérosols) par la méthode SMAC (Berthelot et Dedieu 1997).

La présence d'un canal moyen infrarouge permettra d'évaluer l'intérêt des indices utilisant ce canal.

Par contre, elles ne possèdent pas de canal dans l'infrarouge thermique.

Données ATSR2

Le capteur ATSR possède un scannage circulaire qui produit, à l'intérieur d'une fauchée de 500km, deux types de données : des données au nadir (555 pixels d'une résolution de 1km) et des données en visée oblique à 50° (371 pixels d'une résolution de 1,5 x 2 km).

Il possède 7 canaux :

- 3 canaux dans le visible et le proche infrarouge (0,55, 0,65 et 0,87 μm),
- 2 canaux dans le moyen infrarouge (1,6 et 3,7 μm)
- et deux canaux dans l'infrarouge thermique (11 et 12 μm).

La fauchée réduite ne permet pas une couverture journalière, mais seulement tous les 2 à 3 jours.

Corrections atmosphériques et directionnelles

Les données seront prétraitées avant calcul des indices satellitaires.

Une correction des effets atmosphériques sera effectuée en utilisant SMAC (*Simplified Method for the Atmospheric Correction*, Berthelot et Dedieu 1997).

Une correction des effets bidirectionnels sera mise en œuvre en utilisant deux modèles :

- le modèle de réflectance bidirectionnelle de Rahman (Duchemin 1998),
- et le modèle WAK (Dymond and Shepherd).

Indices satellitaires

Les indices satellitaires qui seront testés peuvent être rangés en plusieurs familles :

- indices de végétation (NDVI, SAVI, GEMI),
- indices dérivés de séries multitemporelles de NDVI (ARND Lopez et al 1991, *greenness indices* -GRNabs, GRNrel, *Site moisture*-Eidenshink et al. 1990),
- température de surface (Ts),
- combinaisons de NDVI et Ts (NDVI/Ts et première composante principale diagramme NDVI-Ts, Prosper-Laget et al 1995),
- et indice combiné Ts-données météo (WDI, Vidal et al 1994).

D'autre part, à partir des résultats de la spectrométrie de terrain et des performances des indices existants, un nouvel indice pourra être proposé qui combine optimalement les bandes spectrales qui montreront les variations les plus significatives.

4.3 INNOVATION ET AVANTAGES ESCOMPTES

Si les résultats attendus sont confirmés, il sera alors montré que les données basse résolution actuelles permettent, dans certaines conditions, d'estimer le stress hydrique de la végétation.

Cette information sera importante car elle permettra de compléter et optimiser les réseaux actuels de mesures ponctuelles sur le terrain.

Elle peut aussi contribuer à optimiser les dispositifs de prévention de terrain.

Rappelons aussi que la Sécurité Civile (le CIRCOSC, Centre interrégional de coordination des opérations de la sécurité civile, et les CODIS, Centres opérationnels départementaux d'incendie et de secours) poursuivent un plan d'équipement informatique à base de SIG, qui peut maintenant recevoir des informations sous forme spatialisée et les analyser en les confrontant aux autres informations du SIG.

Cependant, dans un premier temps, il ne sera pas possible de spatialiser ce stress hydrique sur l'ensemble de la zone forestière méditerranéenne.

La validation aura en effet été conduite sur des végétations basses et homogènes à l'échelle du kilomètre, et la méthode ne pourra alors être généralisée qu'aux végétations de ce type.

À plus long terme, l'évolution technologique va permettre des résolutions spatiales améliorées, dans un premier temps au moins dans la partie non-thermique du spectre :

- VEGETATION présente déjà une résolution constante de 1km sur tout la largeur de sa fauchée,
- TERRA-MODIS lancé en décembre 1999 possède 5 bandes avec une résolution de 500m du visible au moyen infrarouge (et même 2 bandes à 250m dans le visible et le proche infrarouge),
- tandis que le satellite européen ENVISAT, qui sera lancé en juin 2001, emportera le capteur MERIS, doté, du visible au proche infrarouge, de 15 bandes programmables d'une résolution de 300m.

Si les résultats recherchés dans cette étude sont encourageants à l'échelle du kilomètre, ces améliorations de résolution permettront d'envisager un suivi continu de zones homogènes de taille plus petite, couvrant donc une plus grande partie de la végétation méditerranéenne, et densifiant d'autant la grille de points entre lesquels une interpolation donnera une estimation du risque plus fiable.

Sur le plan de l'innovation, l'étude est innovante sur plusieurs points:

- pour clarifier un problème de changement d'échelle, elle se propose d'approfondir certains aspects des variabilités décamétrique, hectométrique et kilométrique de l'humidité de la végétation méditerranéenne, non étudiés à ce jour,
- elle fera des mesures de spectroradiométrie au niveau élémentaire de la feuille, qui permettront de se prononcer sur un élément clé du couvert, avant prise en compte de la structure de celui-ci et de l'effet de l'atmosphère,
- elle utilisera non seulement des données NOAA-AVHRR, mais aussi des données de meilleure qualité, VEGETATION et ATSR2,
- si les indices testés sont classiques, l'attention portée aux corrections des effets atmosphériques et directionnels est nouvelle et devrait améliorer la qualité de ceux-ci.
- à partir des résultats de la spectrométrie de terrain et des performances des indices existants, l'étude pourrait conduire à la définition d'un nouvel indice qui combine optimalement les bandes spectrales qui montreront les variations les plus significatives.

C'est l'addition des améliorations et la cohérence de l'ensemble qui doit permettre d'obtenir une validation adaptée aux indices produits afin de pouvoir éventuellement déboucher sur une nouvelle application opérationnelle des données satellitales.

Références

- BERTHELOT B. and DEDIEU G., 1997. Correction of atmospheric effects for VEGETATION data. Proceedings Physical measurements and signatures in Remote sensing, Courchevel, 7-11 April 1997, pp 19-25.
- DUCHEMIN B., 1999: NOAA/AVHRR bi-directional reflectance: Modeling and application for monitoring of a temperate forest. Remote Sensing Environ., 67-1, 51-67.
- DYMOND J, AND SHEPHERD J. Bi-directional reflectance factor correction of vegetation in AVHRR imagery, submitted to *Remote Sens. Environ.*
- EIDENSHINK J.C, BURGAN R.E. and HAAS R.H. (1990). Monitoring fire fuels condition by using time series composites of Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) data, *Proc. Resource Technology 90*, ASPRS, Washington, D.C., 68-82.
- LÓPEZ S., GONZÁLEZ F., LLOP R. and CUEVAS M. (1991). An evaluation of the utility of NOAA-AVHRR images for monitoring forest fire risk in Spain. *International Journal of Remote Sensing*, 12: 1841-1851.
- PROSPER-LAGET V., DOUGUEDROIT A. and GUINOT, J.P. (1995). Mapping the risk of forest fire occurrence using NOAA satellite information. *EARSel Advances in Remote Sensing* 4 (3-XII) 30-38.
- VIDAL A., PINGLO F., DURAND H., DEVAUX-ROS C., MAILLET A., 1994. Evaluation of a temporal fire risk index in Mediterranean forests from NOAA thermal IR. *Remote Sens. Environ.*, 49 (3), 296-303.