HAL
open science

La télédétection dans la prévision des incendies de forêts

N. Desbois, A. Vidal

To cite this version:

N. Desbois, A. Vidal. La télédétection dans la prévision des incendies de forêts. Ingénieries eau-agriculture-territoires, 1995, 1, p. 21 - p. 29. hal-00466078

HAL Id: hal-00466078

https://hal.science/hal-00466078v1

Submitted on 15 Apr 2010

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.

La télédétection dans la prévision des incendies de forêts

Nathalie Desbois et Alain Vidal

Chaque année, 10 000 à 60 000 ha de forêt méditerranéenne sont touchés par les incendies. Ceux-ci portent autant atteinte aux écosystèmes forestiers déjà fragilisés, qu'aux personnes, aux biens et aux paysages. La prévention et la lutte contre les incendies de forêts représentent un coût de plus d'un milliard de francs par an. Un dispositif de surveillance et de lutte est mis à titre préventif sur le terrain en cas de risque. Il est très coûteux en hommes et en matériel. Il est donc essentiel de prévoir quotidiennement le niveau de risque afin d'ajuster les moyens et d'augmenter leur efficacité.

Or, le risque d'incendies de forêts dépend de nombreux facteurs. La mise à feu qui est principalement d'origine humaine, imprudence, accident ou malveillance, est bien sûr imprévisible. Cependant, des facteurs météorologiques (vent ou sécheresse prolongée), écologiques (teneur en eau, inflammabilité et combustibilité des formations végétales) et topographiques (relief accidenté) vont favoriser l'éclosion puis la propagation du feu.

Actuellement, la prévision des risques repose essentiellement sur des paramètres météorologiques, vitesse du vent, température et humidité de l'air, et sur une estimation de l'état hydrique de la végétation, la « réserve en eau du sol ». Or, cette estimation est faite avec un modèle approximatif et controversé. Une nouvelle méthode, informant sur l'état de la végétation, serait donc très utile pour compléter les indices météorologiques.

Dans cette optique, des recherches ont été engagées sur le suivi par télédétection satellitaire de la variabilité temporelle du risque d'incendie en forêt méditerranéenne par le Laboratoire Commun de Télédétection Cemagref-Engref. Ces études sont axées sur l'utilisation des données infrarouges thermiques du satellite NOAA-AVHRR.[1]

Combinées à des mesures météorologiques, ces données permettent de calculer un indice quotidien caractérisant l'état hydrique de la végétation : «l'indice de stress» (Vidal et al, 1993, 1994). Cet indice, calculé à partir des données de la veille (jour J-1), sert de prévision pour le jour J. D'autre part, les images permettent une localisation des zones les plus sèches, contrairement aux indices actuels.

L'objectif de telles recherches est de fournir aux services chargés de la Défense des Forêts Contre l'Incendie (DFCI) un outil supplémentaire d'aide à la décision, pour affiner la prévision du risque et mieux localiser ce risque.

Cet article présente la validation de cette nouvelle méthode de suivi de l'état hydrique des végétaux ainsi que son intérêt opérationnel. La validation s'est faite en deux temps : une première analyse a été faite *a posteriori* sur le massif des Maures, durant les étés 1991 et 1992, puis une utilisation en temps réel des données satellitaires sur une sélection de massifs forestiers, durant l'été 1994. Ce traitement en temps réel a été réalisé en collaboration avec Météo-France (le Centre de Météorologie Spatiale, CMS, de Lannion et l'antenne météorologique du Centre Interrégional de Coordination des Opérations de la Sécurité Civile, CIRCOSC).

[1] *NOAA-AVHRR : National Oceanic and Atmospheric Administration - Advanced Very High Resolution Radiometer.*

Nathalie Dubois et Alain Vidal
Laboratoire Commun de Télédétection Cemagref-Engref 500, rue J. F. Breton, 34093Montpellier cx 5.

L'imagerie NOAA-AVHRR : un outil adapté au suivi de la végétation

– Intérêt du système

Le système NOAA-AVHRR présente plusieurs avantages. Sa répétitivité est élevée : le satellite acquiert en effet deux images par jour, dont une en milieu de journée (heures les plus chaudes et à plus haut risque), ce qui permet un suivi quotidien de la végétation, à l'exception des jours où des nuages masquent les zones observées. Il couvre un vaste champ d'observation, de 2700 km de large, soit l'ensemble des départements méditerranéens. Il utilise deux bandes spectrales dans l'infrarouge thermique, les canaux 4 et 5, adaptés à l'étude de la végétation et qui, par combinaison, permettent de s'affranchir des effets atmosphériques (Vidal, 1991; Melia et al., 1991).

Cependant, il comporte des limites. Ainsi, le satellite ne donne accès qu'à la partie supérieure des formations végétales. Ce peut être la strate arborée, arbustive ou herbacée, selon la structure verticale des peuplements. Les mesures réalisées dans les Maures, ont montré que la teneur en eau variait peu d'une strate à l'autre en un lieu donné ; le satellite donne donc accès à une mesure représentative de l'ensemble du couvert. Cependant, il ne permet pas de connaître l'état hydrique de la litière. La faible résolution spatiale (1,1 km à la verticale du satellite) peut aboutir au mélange de situations topographiques et végétales variées (Seguin, 1990). Par conséquent, les massifs forestiers d'étude devront être les plus homogènes possibles. Cette résolution est cependant tout à fait adaptée aux échelles régionale ou départementale.

– La température de surface essentielle au calcul d'un « indice de stress »

La température de surface estimée par satellite permet de calculer le rapport Evapotranspiration Réelle/Evapotranspiration Potentielle (ETR/ETP). Ce rapport constitue un bon indicateur de l'état hydrique des végétaux. D'autre part, il est bien corrélé aux départs de feux (Vidal et al., 1993).

Par la suite nous appellerons *«indice de stress»* la différence *IS = 1-ETR/ETP*, qui fait varier l'indice dans le même sens que le niveau de risque. Il est compris entre 0 et 1. Plus il est proche de 1, plus la végétation est sèche et donc inflammable.

Le calcul de cet indice repose sur le bilan énergétique d'une surface naturelle à un instant donné, de la forme (les flux sont exprimés en $W.m^{-2}$) :

$$Rn = G + H + ETR$$

Cette expression traduit le fait que l'énergie radiative nette disponible au niveau du couvert végétal (le rayonnement net, Rn) se répartit entre un flux de chaleur par conduction dans le sol, G (pour la forêt, G = 0.1Rn), un flux de chaleur convectif dans l'air ou flux de chaleur sensible, H, et un flux de chaleur latente, ETR, correspondant à l'évapotranspiration du couvert (évaporation de l'eau du sol et transpiration de la végétation) (figure 1).

On en déduit :

$$ETR = (Rn-G) - H = 0{,}9Rn - H$$

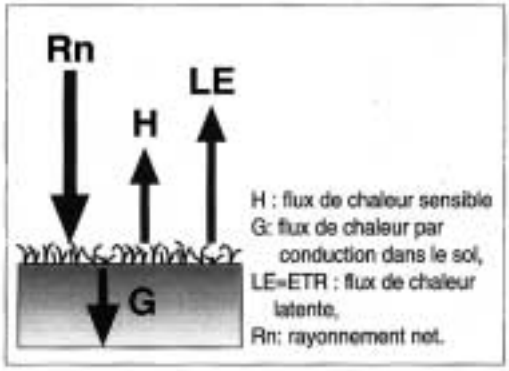
$$ETR = 0{,}9\ Rn - \frac{\rho C_p}{(ra + ro)}\ (Ts-Ta)$$

Où

- *Rn* rayonnement net ($W.m^{-2}$)
- *ro* résistance de structure du couvert végétal = 16 $s.m^{-1}$
- *ra* résistance aérodynamique ($s.m^{-1}$) très inférieure à ro sur un couvert forestier
- *Ts* température de surface (°C) corrigée des effets atmosphériques et d'émissivité
- *Ta* température de l'air (°C)
- *ρ* densité de l'air ($kg.m^{-3}$)
- *Cp* chaleur massique de l'air ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)

Dans le cas d'un stress hydrique (faible alimentation en eau), la plante réduit sa perte d'eau en fermant ses stomates. Il y a alors réduction de la transpiration et à rayonnement net reçu constant, la surface des feuilles s'échauffe. L'écart *(Ts-Ta)* entre la température de surface et celle de l'air va donc augmenter.

Outre les données satellitaires, le calcul de l'indice de stress nécessite donc la connaissance de paramètres



▲ Figure 1. – Schématisation des termes du bilan énergétique d'un couvert végétal.

météorologiques : température et humidité de l'air, vitesse du vent et rayonnement global.

Méthode de validation de « l'indice de stress »

Problèmes liés à la validation des indices de risque

La validation des indices de risque, quels qu'ils soient, est délicate, le risque d'incendie dépendant de très nombreux facteurs. D'autre part, la vérification ne peut se faire qu'*a posteriori*. Pour cela, nous disposons de la base de données, Prométhée, qui recense tous les feux de forêts (localisation, surfaces brûlées) dans les départements méditerranéens. Gérée par le Conseil Général des Bouches du Rhône, elle est accessible par Minitel.

Le problème est qu'*il n'y a pas de relation de cause à effet directe et exclusive entre les conditions de milieu (sécheresse des végétaux, conditions météorologiques) et les départs de feu.* De nombreux biais interviennent :

- la *mise à feu*, essentiellement d'origine humaine (les mises à feu par la foudre sont très rares en région méditerranéenne), *est, le plus souvent, indépendante des facteurs météorologiques et écologiques* : la présence de personnes ou d'installations liées à l'activité humaine multiplie donc le risque de départ de feu et, par conséquent, le risque qu'un feu échappe aux secours et s'étende ;

- le *dispositif de prévention et de lutte* a une influence sur les superficies brûlées : en effet, même en conditions défavorables, un feu peut être rapidement maîtrisé s'il est détecté et attaqué dans les plus brefs délais ; inversement, en conditions météorologiques et hydriques «normales», un feu peut prendre de l'ampleur si les secours ont du retard (surveillance relâchée, accès difficile, secours «piégé» sur un autre feu...).

- *l'utilisation opérationnelle des indices de risque* : les jours où Météo France prévoit un risque très sévère sur une zone donnée, le dispositif préventif est renforcé et il devient alors moins probable que des feux prennent de l'ampleur, même si les conditions sont très sévères.

Cependant, si les conditions météorologiques et l'état de la végétation sont peu favorables au feu (vent faible, humidité relative importante, végétation peu sèche) il est rare que le feu dépasse 1 ha. Ainsi, plus que le nombre de départs de feux, la surface brûlée dépend des conditions météorologiques et de l'état de la végétation. L'utilisation des départs de feux filtrés par surface brûlée (feux supérieurs à 1 ha) peut être considérée comme une méthode de validation correcte, même si elle n'élimine pas tous les biais mentionnés.

Validation a posteriori sur le massif forestier des Maures (étés 1991 et 1992)

Ce massif varois couvre environ 90 000 ha. Il est bien individualisé et relativement homogène (composé essentiellement de chêne liège). De plus, il connaît chaque été de nombreux feux.

L'indice de stress ne prenant en compte qu'un facteur de risque (l'état hydrique de la végétation), il n'a pas vocation à être utilisé seul. Il doit être combiné à d'autres indices de risque qu'il complète, en renseignant sur l'état de sécheresse de la végétation. Nous l'avons combiné avec un indice de risque météorologique, le risque numérique (RN), élaboré par Météo France.

Données utilisées

Afin de se placer dans les mêmes conditions que celles du temps réel, nous comparons l'indice de stress et le risque numérique prévus pour le jour J et les départs de feux observés ce même jour.

- L'*indice de stress, IS = 1-ETR/ETP*, est calculé à partir de la température de surface modale (c'est-à-dire la plus représentative du massif) extraite de l'image du jour J-1, pour prévoir l'état de la végétation du jour J.

Les seuils de risque lié à la végétation sont définis comme suit, en fonction du nombre moyen de départs de feux par classe d'indice :

$0 < IS < 0{,}65$ risque Faible, F.
$0{,}65 \leq IS \leq 0{,}75$ risque Sévère, S.
$0{,}75 < IS \leq 1$ risque Très Sévère, TS.

- Le *Risque Numérique* météorologique, prévu pour le jour J, intègre la vitesse du vent, l'humidité et la température de l'air et la « réserve en eau du sol », estimation assez grossière de l'état hydrique de la végétation.

Pour le massif des Maures :

$0 < RN < 12$ risque Faible, F.
$12 \leq RN \leq 17$ risque Sévère, S.
$17 < RN < 20$ risque Très Sévère, TS.

- Les *feux observés* dans le massif le jour J, sont répertoriés dans la base de données PROMETHEE.

La validation a consisté à comparer le nombre de fausses alertes et d'alertes manquées (tableau 1) (Sol, 1989), d'une part, pour le Risque Numérique seul et d'autre part pour la combinaison des deux indices. soit : *FA : Fausse alerte.*
FAC : Fausse alerte chère.
AM : Alerte manquée.
AMG : Alerte manquée grave.
PC : Prévision correcte.

Règle de décision

Afin de quantifier les résultats, une ***règle de décision*** est mise au point pour combiner les deux indices. L'objectif est de *réduire le nombre de fausses alertes* qu'induit le risque numérique, sans pour autant augmenter le nombre d'alertes manquées. Sans compter le préjudice considérable que causent les alertes manquées à la forêt, aux biens et aux personnes, les fausses alertes coûtent cher, fatiguent et démobilisent le personnel. Il s'agit donc d'optimiser le nombre de jours d'alerte.

Cette règle de décision se base sur l'observation des graphes mensuels qui représente simultanément le risque numérique, l'indice de stress et les départs de feux. Plusieurs règles de décision ont été testées sur les mois de juillet et septembre, puis celle donnant les meilleurs résultats a été validée sur les mois de juin et d'août.

Les graphes mensuels montrent que les augmentations brusques d'au moins un indice s'accompagnent de départs de feux. En revanche, quand au moins un des deux indices chute, aucun départ de feu de plus de 1 ha n'est enregistré.

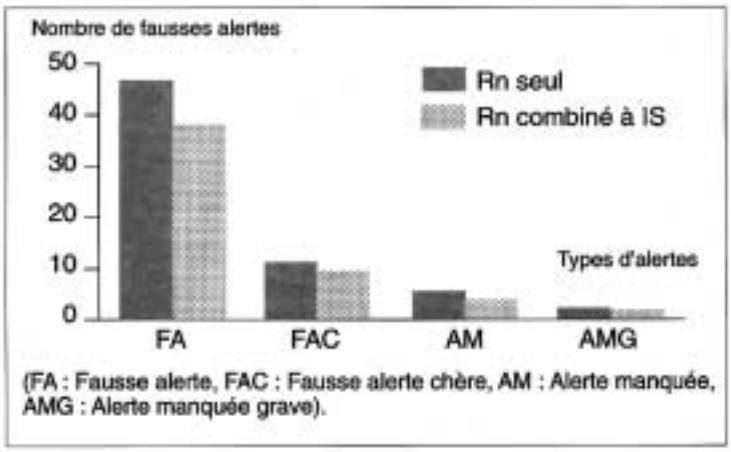


Figure 2. – Résultats de la combinaison de l'indice de stress (IS) et du risque numérique météorologique (RN), sur le massif des Maures pendant les périodes estivales 1991 et 1992.

	Niveau de risque prévu		
Feux observés	F	S	TS
Aucun	PC	FA	FAC
1ha ≤ au moins 1 feu < 10 ha	AM	PC	PC
Au moins 1 feu ≥ 10 ha	AMG	AM	PC

Tableau 1. – Définition des fausses alertes et alertes manquées.

D'autre part, l'indice de stress a tendance à donner des risques plus élevés que le risque numérique en début de saison (quand la «réserve en eau» est encore élevée) et au contraire plus faible en fin de saison (le risque numérique restant encore élevé tant que la réserve en eau qui a décrû tout au long de l'été, n'a pas été remplie par les pluies). Ainsi, l'indice de stress devrait permettre de compenser la grande influence du paramètre «réserve en eau».

Compte tenu de ces remarques, la règle de décision donnant les meilleurs résultats est la suivante :

a- quand le risque numérique (RN) et l'indice de stress (IS) *varient peu*

(DRN ≤ 5 et DIS ≤ 0.15) : prendre le plus faible s'ils indiquent un niveau de risque différent.

b- quand le risque numérique (RN) et l'indice de stress (IS) *varient brusquement* (DRN > 5 et DIS > 0.15) :

- s'il s'agit d'une *hausse :* prendre le plus fort.
- s'il s'agit d'une *baisse :* prendre le plus faible.

Pour le mois de juin, quand les indices varient peu, mieux vaudrait prendre non pas l'indice le plus faible, mais l'indice le plus élevé, RN sous-estimant le risque en début de saison.

Résultats

Les résultats de la validation sont représentés sur la figure 2.

Durant les périodes étudiées, les feux supérieurs à 1 ha, et *a fortiori* ceux supérieurs à 10 ha, étaient très peu nombreux. Les cas d'alertes manquées sont, par conséquent, également peu nombreux. Il est donc difficile d'en tirer des conclusions sur la capacité des indices à éviter les alertes manquées. Cependant, comme c'était l'objectif, la combinaison des deux

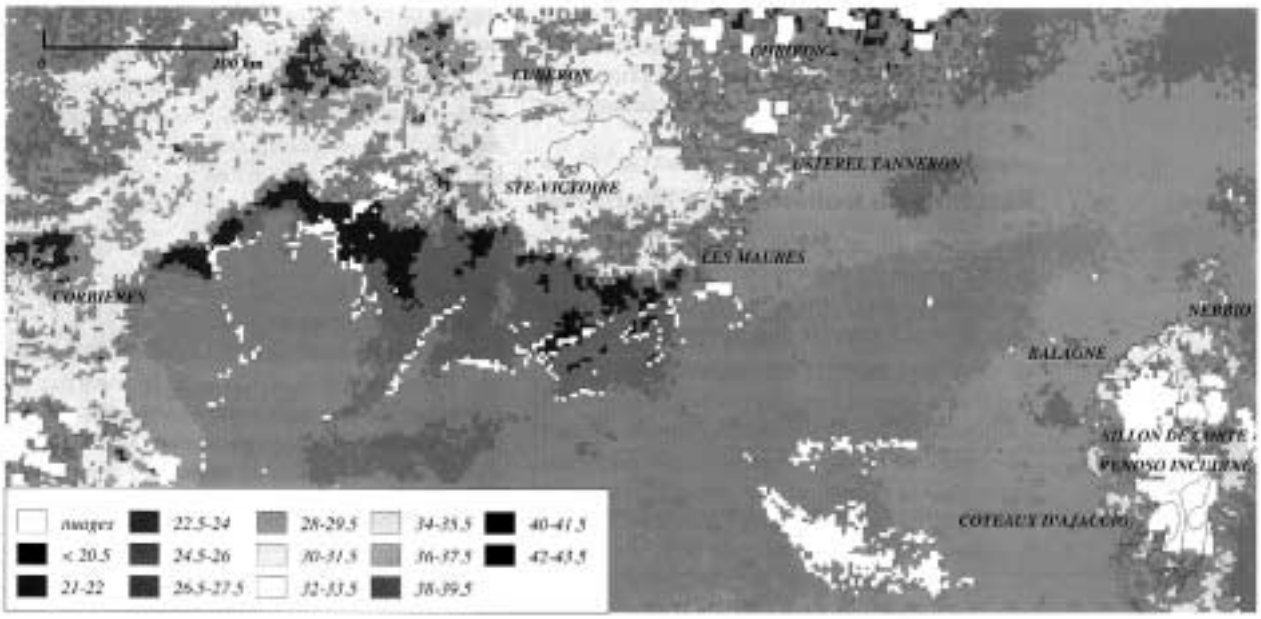


Figure 3. – Localisation des massifs forestiers d'étude, sur fond de l'image des températures de surface prise le 27/08/94 par le satellite NOAA-AVHRR 11.

indices permet de réduire sensiblement le nombre de fausses alertes. D'autre part, les images satellitaires représentent la variabilité spatiale de la température de surface, qui rend approximativement compte de la variabilité spatiale de l'état hydrique des végétaux. C'est en effet une approximation, car la température de surface dépend beaucoup de celle de l'air. Des images de (Ts-Ta) seraient plus représentatives de la sécheresse des végétaux.

Suite aux résultats de l'analyse *a posteriori*, il est apparu que l'indice de stress ne pouvait qu'apporter un plus aux prévisions actuelles des risques d'incendie. Nous avons donc poursuivi l'étude par un traitement en temps réel des données satellitaires en collaboration avec l'antenne météorologique du CIRCOSC. Celle-ci est chargée, pendant l'été, de fournir quotidiennement aux Centres Opérationnels Départementaux d'Incendies et de Secours (CODIS), les prévisions des risques d'incendie et les données météorologiques.

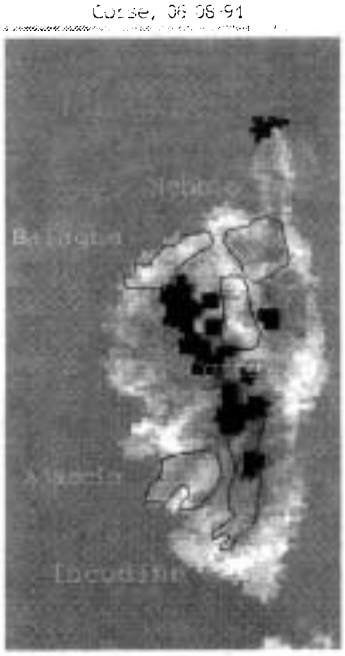
Validation en temps réel, sur une sélection de massifs forestiers méditerranéens

Organisation du traitement en temps réel de mi-juillet à fin août 1994 : le CMS reçoit chaque jour les images du satellite NOAA, prises entre 16 h 30 et 17 h, temps universel. Archivées le soir même, elles sont corrigées des effets atmosphériques et transférées le lendemain matin vers 6 h, temps universel au LCT, par le réseau INTERNET.

Là, les images sont traitées. Onze massifs forestiers, répartis sur le continent et la Corse, ont été délimités (Figure 3). Pour chacun, est extraite la température de surface modale, c'est-à-dire celle la plus représentée dans le massif.

Les données météorologiques horaires, mesurées la veille aux environs de l'heure de passage du satellite par une sélection de stations automatiques, sont recueillies et envoyées par télécopie au LCT par l'antenne météorologique du CIRCOSC.

L'indice de stress est alors calculé pour chaque massif. Enfin, les résultats sont transmis à l'antenne météorologique du CIRCOSC, sous forme d'un tableau mentionnant pour chaque massif l'indice, son évolution par rapport au jour précédent, ainsi qu'un commentaire sur la variabilité spatiale de l'état hydrique de la



(c) Meteo France / Traitement CEMAGRE

Figure 4. – Image reçue par l'antenne météorologique du CIRCOSC (été 1994).

végétation. Des sorties sur papier de l'image prise la veille, sont également transmises par télécopie. L'image de la Corse, du 06-08-94 (Figure 4), donne une idée de la qualité des télécopies envoyées au CIRCOSC.

Résultats du traitement en temps réel

Il s'agissait de se placer dans la position du prévisionniste ou des responsables de la Défense des Forêts Contre l'Incendie (DFCI), qui, chaque jour, doivent estimer le plus justement possible le risque, compte tenu des diverses informations dont ils disposent.

Dans un premier temps, nous allons voir comment l'indice de stress a évolué en fonction des conditions météorologiques (précipitations, vent). Puis nous le comparerons avec les autres indices de risque et enfin nous confronterons les différents indices avec les feux observés.

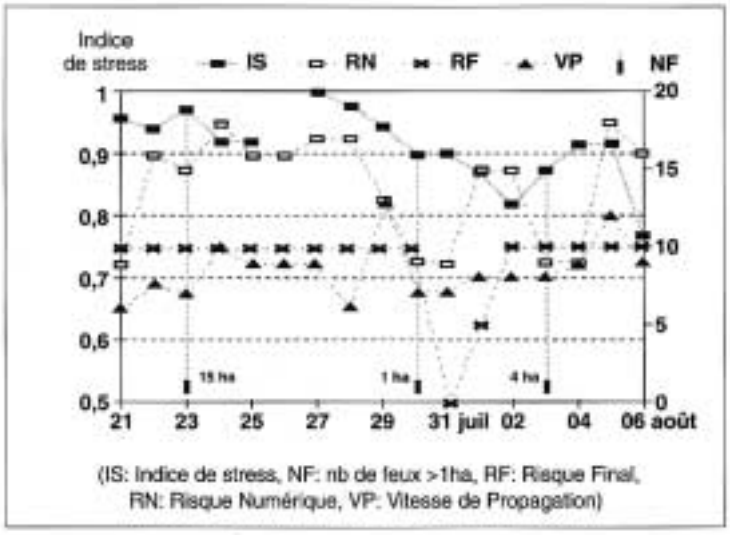


Figure 5. – Evolution comparée de l'indice de stress et de quelques indices de risque traditionnels, massif des Maures, 1994.

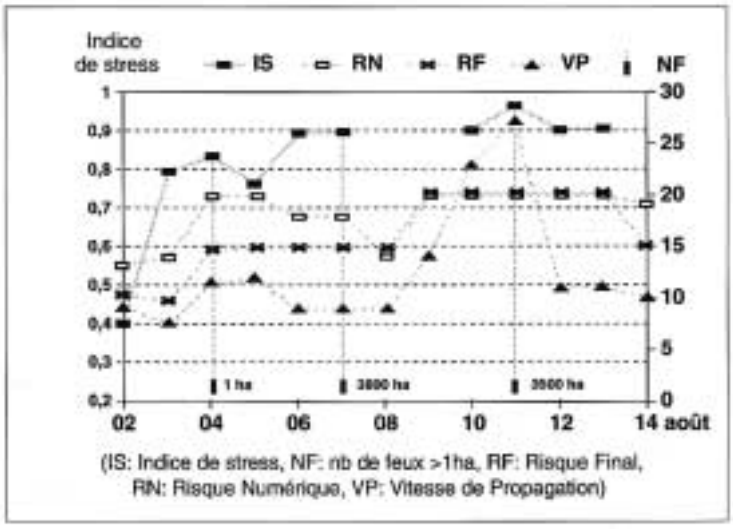


Figure 6. – Evolution comparée de l'indice de stress et de quelques indices de risque traditionnels, Renoso Inurdine, 1994.

Indice de stress et conditions météorologiques

Les *épisodes pluvieux* sont effectivement suivis par une baisse de l'indice. On a pu le constater en reportant les précipitations, enregistrées par les stations météorologiques, sur les courbes d'évolution de l'indice de stress.

Le *vent* n'intervient pas significativement dans le calcul de l'indice de stress. Cependant, l'indice est sensible au vent, dans la mesure où la plante, sous l'effet du vent, qui crée une zone de turbulence à la surface des feuilles, va fermer ses stomates. La diminution de l'évapotranspiration qui en résulte s'accompagne d'une augmentation de la température de surface. L'indice de stress va donc augmenter lors des épisodes venteux.

Le végétal, grâce à sa régulation stomatique, apparaît comme un système intégrateur des conditions du milieu. Cette régulation étant accessible par la mesure de la température de surface, il n'est donc pas nécessaire de faire intervenir dans le calcul de l'indice de stress, divers facteurs représentant notamment le sol ou le vent.

Relation entre les valeurs calculées et les départs de feux

Les Maures (figure 5) : vers le 23 juillet, tous les indices traditionnels sont à un niveau bas. Le risque final, RF, (qui tient compte de l'ensemble des autres indices météorologiques, des feux des jours précédents, de la fréquentation touristique, des précipitations récentes) indique un niveau de risque Habituel. Le Risque Numérique, RN, est Faible et la Vitesse de Propagation, VP (dépendant de la température de l'air, de la vitesse du vent et de la « réserve en eau » prévoit un risque de propagation Faible. Seul l'indice de stress, en augmentation, est supérieur à 0,9. Ainsi, même si les facteurs météorologiques ne semblent pas propices à l'éclosion et à la propagation des feux, la végétation entre en état de stress hydrique et devient plus inflammable. Or, un feu de 15 ha s'est

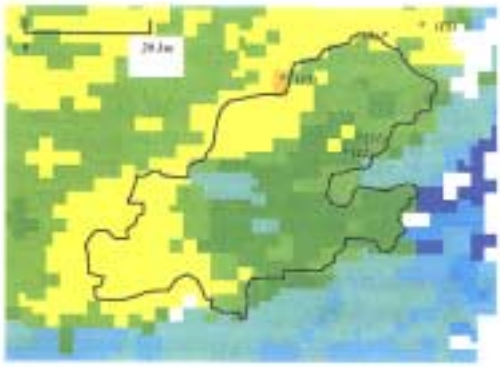


Figure 7. – Massif des Maures. Image du satelliteNOAA- AVHRR 11, prise le 23/08/94. Localisation des feux de plus d'un hectare, survenus le 25/08/94.

produit. La prise en compte de l'indice de stress aurait pu éviter cette alerte manquée grave.

De même, vers le 3 août, IS est le seul indice à augmenter, alors que les autres indiquent un niveau de risque faible. Cependant un feu de 4 ha s'est produit, témoignant que la végétation était suffisamment sèche pour que le feu puisse se propager, même sans vent.

«*Renoso-Incudine*» (Corse du Sud) *(figure 6)*. Le 3 août, l'indice s'est brusquement mis à augmenter, puis il a continué de croître. Le 7 août, il dépasse 0,9. Les autres indices indiquent également un risque sévère : Risque Final : S, Risque Numérique (RN) : TS, seule la Vitesse de Propagation est Faible. L'indice de stress viendrait ici conforter RN et orienter la prévision vers un niveau de risque très sévère. Or, c'est pendant cette période que ce sont produits la plupart des grands incendies qui ont affecté le sud de la Corse. L'indice de stress aurait ainsi mis l'accent sur le fait que la végétation était très sèche, permettant de mieux anticiper.

La hausse de l'indice de stress apparaît donc comme un bon signal,quand les autres indices de risque sont faibles. En outre, c'est aussi un bon moyen de conforter les prévisions des autres indices, quand ceux-ci signalent un risque sévère.

Mais le plus intéressant est de constater que les feux de plus d'un ha ont majoritairement lieu dans les zones qui apparaissent souvent les plus «chaudes» sur les images satellitaires. Ainsi, dans le massif des Maures, les feux du 25 août se sont tous produits dans des zones qui paraissaient plus sèches les jours précédents (figure 7). De même, l'image de la Corse du 06-08-94 (figure 8), met bien en évidence les zones les plus «chaudes», où se sont d'ailleurs produits la plupart des grands feux qui ont affecté la Corse du Sud.

Principales limites et améliorations envisageables

Les données satellitaires permettent de spatialiser le risque à l'échelle du massif forestier. Cependant la cartographie actuelle des températures de surface est insuffisante pour localiser de façon fiable les zones les plus sèches. Il faudrait pouvoir cartographier l'écart (Ts-Ta), bon indicateur de l'état hydrique des végétaux. Or, pour cela, il faut pouvoir interpoler les paramètres météorologiques, principalement la température de l'air, à partir des quelques points de mesures des stations météorologiques. Des études sont en cours à ce sujet au SCEM (Service Central d'Exploitation de la Météorologie) de Météo-France.

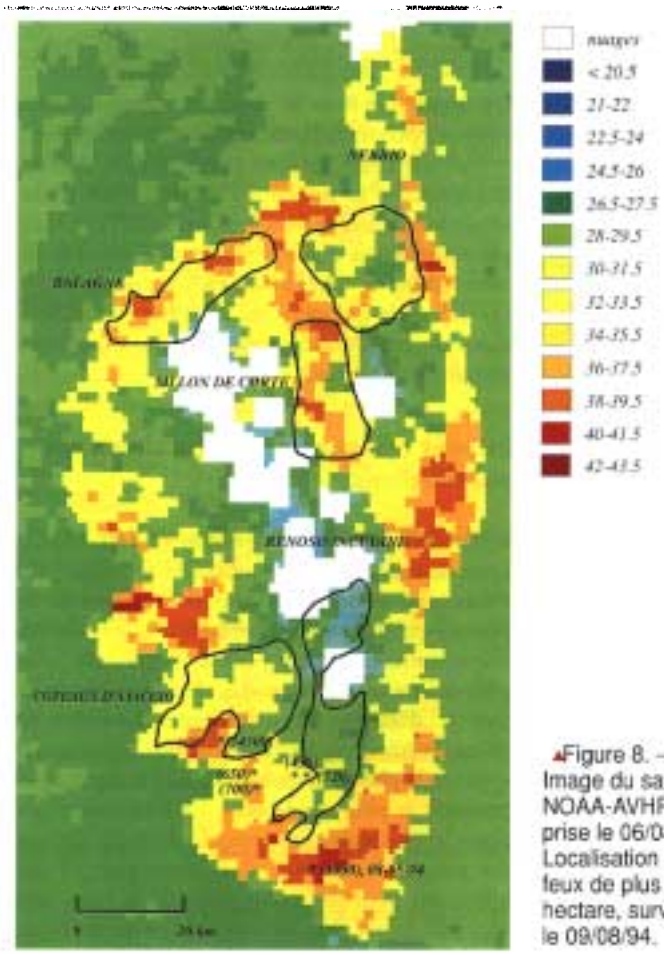


Figure 8. – Corse. Image du satellite NOAA-AVHRR 11, prise le 06/08/94. Localisation des feux de plus d'un hectare, survenus le 09/08/94.

D'autre part, il est impossible, certains jours, de calculer l'indice de stress, en raison des nuages (souvent, mais pas toujours, accompagnés de pluie, donc pas systématiquement synonymes d'un affaiblissement du risque), ou d'un angle de visée trop important (> 35°) qui limite la précision des données. Ainsi, à titre indicatif, du 10-07 au 13-09-94, sur les Maures, l'indice a pu être calculé dans près de 90 % des cas. En revanche, pour le massif du Cheiron (Nord-ouest des Alpes Maritimes), beaucoup plus nuageux, ce pourcentage se limite à 62 %.

Il est vrai que le satellite ne renseigne pas sur l'état hydrique de la matière sèche au sol qui est pourtant un paramètre fondamental dans l'éclosion du feu (les feux en forêt méditerranéenne se propageant classiquement de la litière à la strate herbacée puis à la strate arbustive et enfin à la strate arborée). Or, cette matière sèche, morte, est en équilibre hydrique avec l'atmosphère. L'humidité de l'air (prise en compte dans le Risque Numérique) est, par conséquent, un bon indicateur de l'état de la litière.

Un autre problème se pose : sur quels critères s'appuyer pour caler l'indice en début de campagne ? À quel état hydrique correspond l'indice, sachant que le satellite ne passe pas à la même heure d'une année sur l'autre, et donc que les données ne sont pas équivalentes d'une campagne à l'autre? Il est envisageable de caler l'indice en fonction de l'écart (Ts-Ta) après une pluie ou en début de saison à partir de mesures de teneur en eau ou d'inflammabilité sur le terrain.

Intérêt opérationnel des données satellitaires

Au niveau interrégional (CIRCOSC)

Lorsque tous les indices indiquent un risque très sévère sur de nombreuses zones, il est intéressant de pouvoir spatialiser le risque afin d'établir des priorités d'intervention. L'indice peut alors être utile pour gérer les moyens aériens, dans le cas où plusieurs feux se déclarent simultanément. Les moyens pourront être envoyés en priorité là où la végétation apparaît la plus sèche, où le feu risque donc de se propager le plus rapidement. La localisation des zones les plus sèches faciliterait le choix des circuits des patrouilles aériennes. D'autre part, il est important pour les responsables de la lutte, qui engagent des moyens considérables en cas de risque très sévère, d'avoir une information supplémentaire qui vienne confirmer le niveau de risque.

Au niveau départemental (CODIS)

La localisation des zones les plus sèches peut guider le choix des emplacements des moyens terrestres, mis à titre préventif, et confirmer ou compléter la prévision quotidienne.

Estimation du coût du traitement des données

Le traitement pourrait être réalisé par un organisme public qui transmettrait quotidiennement les indices de stress et les images aux différents CODIS intéressés.

Le satellite NOAA couvrant l'ensemble de la France, il suffit d'une image par jour pour tous les départements méditerranéens. Plus le nombre de départements sera important, moins le coût sera élevé pour chacun d'eux. Ainsi, si l'ensemble des quinze départements méditerranéens est intéressé par la méthode, le coût du traitement sur une campagne feux de forêt (mi-juin à fin septembre, soit environ 100 jours) serait d'environ 20 000 F hors taxe, soit 200 F par jour et par département. En revanche, si seulement deux départements participent, le coût s'élèverait à 85 000 F hors taxe par département.

Cependant, comparé aux sommes mises quotidiennement en jeu lors de la mobilisation préventive des moyens, ce coût est faible. Par exemple, si en réponse à un risque prévu très sévère, le CIRCOSC envoie préventivement des renforts aériens, la dépense se chiffrera en millions de francs par jour. Les coûts d'une alerte manquée sont, quant à eux, plus difficilement chiffrables. Outre les moyens mobilisés, parfois pendant plusieurs jours consécutifs, les dégâts occasionnés au patrimoine naturel et construit, et plus rarement les pertes humaines sont considérables, en cas de grands incendies. Ainsi, une méthode qui permet, ne serait-ce que d'éviter une alerte manquée grave ou fausse alerte onéreuse, sera toujours rentable.

Conclusion

Les données satellitaires n'ont, en aucun cas, la vocation de se substituer aux indices existants mais, au contraire, elles les complètent pour affiner la prévision et la localisation du risque. Leur principal intérêt est de permettre une spatia-

lisation du risque lié à la végétation. En ce sens, elles sont un complément d'information utile pour adapter et localiser les moyens d'intervention mis à titre préventif. D'autre part, en cas de confirmation des prévisions des autres indices, elles confortent les décisions des responsables de la lutte; décisions qui mettent souvent en jeu des moyens considérables.

Dans un premier temps (été 1995), la concertation avec les utilisateurs potentiels précisera le produit souhaité. Le « produit fini », exploité par les CODIS leur permettra une lecture globale et rapide de l'état de la végétation.

Résumé

Cet article présente une méthode de suivi du stress hydrique et de l'inflammabilité des forêts méditerranéennes à partir de données infrarouges thermiques (évapotranspiration réelle ETR) du satellite NOAA-AVHRR, et de données météorologiques synoptiques (évapotranspiration potentielle ETP). Un indice de stress (1- ETR/etp) peut être calculé quotidiennement.

Les résultats de cette méthode, testée durant l'été 1994, sur plusieurs grands massifs forestiers méditerranéens français, montrent que l'indice de stress est complémentaire des indices météorologiques actuels de risque d'incendie. De plus, l'image satellitaire permet une localisation des zones les plus sèches, zones où se sont déclarés la plupart des feux. Cette méthode devrait permettre aux utilisateurs finaux de mieux adapter et localiser leurs moyens de prévention et de lutte contre le feu.

Abstract

This paper presents a method for water stress monitoring and flammability of mediterranean forests using NOAA-AVHRR satellite thermal infrared (actual evapotranspiration LE) and synoptic meteorological data (potential avapotranspiration Lep). A stress inddex (1-LE/LEp) can be daily calculated.

The results of this methode, tested during summer 1994, on several large forested areas of the French mediterranean region, show that stress index completes current meteorological fire risk indexes. Furthermore, NOAA images provide a location of water stressed areas, where most of the fires broke out. This method should supply end-users with a tool to better adapt and locate their fire-prevention and fire-fighting organisation.

Bibliographie

DESBOIS N., sept. 1994. Suivi en temps réel de l'état hydrique des végétaux, par imagerie satellitaire NOAA-AVHRR. Application à la prévision du risque d'incendie en région méditerranéenne. Mémoire de D.A.A., Mise en valeur du milieu naturel-Gestion de l'espace, INA Paris-Grignon/ Laboratoire Commun de Télédétection Cemagref-ENGREF, 50 p.

MELIA J., LOPEZ-BAEZA E., CASELLES V., SEGARRA D., SOBRINO J.A., GILABERT M.A., MORENO J., COLL C, 1991. EFEDA Annual Report, EPOC- CT90-0030 (LNBE), Université de Valence.

SEGUIN B., 1990. La température de surface d'un couvert végétal et son état hydrique. Possibilités d'application à la surveillance des forêts par satellite. *Revue Forestière Française*, numéro spécial XLII, pp. 106-111.

SOL B., 1989. Risque numérique météorologique d'incendies de forêt en zone méditerranéenne: dépouillement du test de l'été 1988 et propositions d'améliorations. Note de travail du Service Météorologique Interrégional Sud-Est (SMIRSE) n°1 - mai, 49 p.

VIDAL, 1991. Atmospheric and emissivity corrections of land surface temperature measured from satellite using ground measurements or satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 12 (12) pp. 2449-2460.

VIDAL A. et DURAND H., 1993. Application de l'imagerie satellitaire NOAA au suivi de la sensibilité au feu de la forêt méditerranéenne. Laboratoire Commun de Télédétection CEMAGREF-ENGREF/ Ministère de l'environnement, 18 p.

VIDAL A., DEVAUX-ROS C., MAILLET A., 1994. Télédétection appliquée au suivi du risque d'incendie des forêts méditerranéennes. Note de synthèse CEMAGREF, mars, 8 p.

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 Sensing of Environment*, 49 (3), 296-303.