

Sylvain Broucke

Ingénieur en Sciences et Techniques de l'Information et Communication

État de l'art sur la détermination du régime du feu par des moyens de télédétection

Juin 2009

Sommaire

I Feu et télédétection.....	4
I.1 Généralités.....	4
I.2 Données satellites disponibles.....	4
I.2.1 NOAA-AVHRR.....	4
I.2.2 LANDSAT.....	5
I.2.3 MODIS.....	5
I.2.3.1 MODIS feux actifs.....	6
I.2.3.2 MODIS Surfaces Brûlées (MCD45A1).....	6
I.2.3.3 MODIS LAI (Leaf Area Index)/ FPAR (Fraction of Photosynthetically Active Radiation) (MOD15A2).....	7
I.2.3.4 MODIS Indices de végétation (MOD13).....	7
I.3 Autres données disponibles.....	7
I.3.1 Données de la sécurité civile.....	7
II Régime du feu.....	8
II.1 Définition du régime du feu.....	8
II.2 Régime du feu et télédétection.....	9
II.2.1 Fréquence.....	9
II.2.2 Cycle.....	9
II.2.3 Amplitude.....	9
II.2.4 Étendue spatiale.....	10
II.2.5 Saisonnalité.....	10
II.3 Régime du feu et occupation du sol.....	10
II.4 Résilience du système.....	10
III Références.....	11
III.1 Articles.....	11
III.2 Sites webs.....	13

Ce rapport a pour but de faire un état de l'art des techniques qui permettent d'évaluer le régime du feu par des moyens de télédétection. Il comprend également une partie descriptive sur les données disponibles qui pourront être utilisées pour réaliser les travaux sur le régime du feu. Enfin, en dernier lieu, un bref aperçu des outils permettant d'étudier la résilience des systèmes écologiques sera présenté.

I Feu et télédétection

1.1 Généralités

La télédétection par satellite a ouvert beaucoup de portes vers la cartographie et la surveillance du feu sur des échelles importantes. Robinson (1991) dit qu'il existe quatre formes de signaux produit par le feu qui peuvent être observées depuis l'espace: les radiations directes du feu actif (la chaleur et la lumière), la fumée, les zones carbonisées apparues après un feu, et l'altération de la structure de la végétation. La télédétection peut être utilisée à trois niveaux dans la gestion du feu: avant, pendant et après. La télédétection avant le feu peut être importante pour la prévention et le contrôle du feu. Pendant le feu, elle peut être utilisée pour détecter et surveiller le mouvement du feu à travers le paysage. La télédétection après feu peut servir à cartographier l'empreinte du feu et évaluer les zones brûlées.

1.2 Données satellites disponibles

Les données correspondant à la détection des feux actifs et des surfaces brûlées, sont issues d'algorithmes complexes calculés sur les canaux brutes. Il est possible mais coûteux en temps de réaliser ses calculs à partir de canaux brutes, ainsi que l'ensemble des opérations de correction et d'ajustement des données nécessaires pour obtenir des informations rigoureuses scientifiquement. D'autant qu'il est possible de récupérer directement des produits finis de détection de feux actifs et de zones brûlées. Les deux types de satellites privilégiés pour cette détection sont NOAA-AVHRR et MODIS-Terra/Aqua. Ils sont utilisés parce qu'ils ont une périodicité inférieure à 24h, ce qui permet d'avoir un suivi journalier avec une résolution modérée (de l'ordre du kilomètre). Les satellites LANDSAT sont également très utilisés dans la littérature car ils offrent une résolution spatiale plus importante malgré une périodicité beaucoup plus longue.

1.2.1 NOAA-AVHRR

Les satellites NOAA-AVHRR (National Oceanic and Atmospheric Administration-Advanced Very High Resolution Radiometer) sont adaptés pour la cartographie et la surveillance du feu à une échelle importante. Les résolutions spatiales, spectrales et temporelles des détecteurs permettent de voir de grandes surfaces régulièrement (jusqu'à 6 fois par jour). La couverture journalière, de 2500 km de large (2048 pixels de 1100m de côté), et les différentes bandes spectrales allant du visible (canal 1) à l'infrarouge thermique (canal 5) de AVHRR permettent potentiellement de caractériser le régime du feu grâce à la détection de feu actif et des surfaces brûlées. La résolution au sol du capteur AVHRR est d'environ 1,1 km. Il a une bande dans le visible, une dans l'infrarouge et trois dans le thermique, lesquels sont toutes utiles pour la détection, la surveillance et la cartographie du feu (Lillesand and Kiefer, 1996).

La Nouvelle-Calédonie dispose d'une station de réception NOAA-AVHRR dont les données sont

archivées depuis 1997. De 1998 à 2003, les données de NOAA ne sont pas vraiment disponibles pour une analyse sur le feu à cause de problème divers (interruption de la chaîne de traitement, erreur dans les données, etc). Depuis 2004, l'IRD a rétabli correctement la chaîne de traitement. Une chaîne de traitement du feu est prévue et sera en place d'ici Juillet 2009 si tout va bien. Elle permettra d'avoir des données de détection des feux à une résolution de 1 km et éventuellement des surfaces brûlées à partir du NDVI et ces données concerneront une période de temps allant de 2004 à aujourd'hui.

I.2.2 LANDSAT

Les données générées par les capteurs LANDSAT sont également très utilisés pour la détection des feux. Ce sont des satellites qui ont une résolution spatiale élevée (de 60m et 15m) et résolution temporelle de 16 à 18 jours. Les domaines spectraux explorés concernent le visible, l'infrarouge proche et moyen ainsi que l'infrarouge thermique. Les premiers satellites LANDSAT ont été lancés en Juillet 1972, comme le MSS (Scanner Multi Spectral). La série des TM (Cartographe thématique- Thematic Mapper) a commencé en Juillet 1982 et sa version améliorée ETM+ (Cartographe thématique amélioré-Enhanced Thematic Mapper Plus) en avril 1999.

Les données LANDSAT MSS, TM et ETM+ offrent de bonnes possibilités pour la caractérisation des régimes de feu et de leur impacte sur la végétation par des moyens de télédétection. En effet, des images existent depuis 1975 sur le territoire dans des canaux intéressants pour ce type d'étude. Malheureusement, il est difficile d'obtenir une série temporelle avec une bonne résolution temporelle. Les possibilités sont plutôt de l'ordre de quelques images sur l'ensemble de la période 1975 à maintenant. Pour une étude sur le régime du feu, il faudrait des images avec une régularité mensuelle au minimum. Ce type de résolution peut permettre de détecter les surfaces brûlées et faire un suivi de la végétation après un feu. Cette régularité existe pour les images LANDSAT, cependant mes recherches n'ont pas permis de trouver de données répondant à ces conditions. Les sources de données LANDSAT trouvées jusqu'à maintenant sont:

- Glovis sur <http://glovis.usgs.gov/>
- Earth Explorer sur <http://edcsns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/>

De plus, il n'existe pas de produit de détection de feux ou de surfaces brûlées disponible sur internet librement. La plupart des utilisations de données LANDSAT dans la détection de feux ou le suivi de végétation après des feux utilisent le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) ou le NBR (Normalized Burned Ratio). Des données LANDSAT pourront être utilisées pour obtenir des informations avec une précision élevée sur des sites définies. Ils existent de nombreux sites proposant des données satellites LANDSAT à coût réduit (liste sur <http://landsat.gsfc.nasa.gov/data/reduced.html>).

I.2.3 MODIS

Les satellites MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) ont été conçus pour améliorer la surveillance de la terre, des océans et de l'atmosphère pour la recherche. Les satellites Terra et Aqua ont été lancés respectivement en 1999 et 2002. La conception de la composante terre combine certaines caractéristiques de NOAA-AVHRR et de LANDSAT Thematic Mapper, en ajoutant des bandes spectrales dans le moyen et lointain infrarouge (IR) et fournissant une résolution spatiale de 250 m, 500 m et 1 km. Les deux composantes réunies acquièrent des données dans 36 bandes spectrales dont certaines sont idéales pour la détection des incendies (Kaufman et al. 1998).

Un grand nombre de produits issues des données MODIS sont disponibles gratuitement sur internet. La plus part des données sont disponibles directement par téléchargement sur le Data Pool de LP DAAC (https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/get_data/data_pool).

1.2.3.1 MODIS feux actifs

Il y a plusieurs produits MODIS concernant la détection de feux actifs. C'est la série de produit MOD14 réalisée à partir des données du capteur Terra et MYD14 à partir des données du capteur Aqua. Il y a trois types de produits tous ayant une résolution spatiale de 1km:

- un produit journalier MOD14/MYD14 comprenant entre le masque du feu, la qualité de l'algorithme, la force de radiation du feu (FRP -Fire Radiative Power) ainsi que de nombreuses couches décrivant les attributs du pixel de feu.
- Le produit MOD14A1/MYD14A1 comprend 8 jours de données sur le même fichier. Pour chaque jour un masque de feu est fourni, la force de radiation du feu maximal (maxFRP) est enregistrée ainsi que la qualité de l'algorithme.
- Le produit MOD14A2/MYD14A2 est une synthèse sur 8 jours avec uniquement le masque de feu et la qualité de l'algorithme.

Les produits que nous intéresseront dans un premier temps seront les produits MOD14A1 et MYD14A2. En effet, ils proposent des données synthétiques qui comportent néanmoins suffisamment de détail sur chaque pixel de feu utiles pour les analyses de régimes de feu. Le produit MOD14A1 est disponible sur la période de Février 2000 à maintenant. Le produit MYDA4A1 est disponible sur la période de Juillet 2002 à maintenant.

1.2.3.2 MODIS Surfaces Brûlées (MCD45A1)

Le produit MCD45A1 de MODIS fournit une détection des surfaces brûlées tous les mois avec une précision de 500m. L'algorithme développé pour ce produit utilise un modèle de réflectance bidirectionnelle (BRDF) basé sur l'approche de détection de changement; il détecte la date approximative du feu en localisant des changements rapides dans les séries de données journalières de MODIS. L'algorithme cartographie les zones brûlées récemment et pas celle issues de feux des saisons ou d'années précédentes.

Le produit surfaces brûlées MODIS est un produit de Niveau 3 sur une grille de 500m, produit dans le format standard tuilé de MODIS Land dans une projection sinusoïdal. Chaque tuile est localisée de manière fixe sur la surface du globe, couvrant approximativement 1200 x 1200 km. Le produit défini pour chaque pixel de 500m le jour approximatif du feu. C'est un produit mensuel obtenu en combinant les données de réflectance de la surface du sol de MODIS Terra et Aqua à 500m.

Chaque produit contient les informations suivantes:

- information par pixel comportant de la surface brûlée
 - la date approximative du feu (1-366) ou 0 (pas de feu détecté)
 - un code indiquant si aucune décision n'a été prise pour cause de donnée manquante, mauvaise qualité ou données sous les nuages.
 - Information de qualité de la décision
- des métadonnées obligatoires et spécifiques au produit

Ce produit est disponible sur la période Avril 2000 à maintenant.

1.2.3.3 MODIS LAI (Leaf Area Index)/ FPAR (Fraction of Photosynthetically Active Radiation) (MOD15A2)

Le produit MOD15A2 de MODIS fournit un calcul du LAI et du FPAR tous les 8 jours à une résolution de 1km. Le LAI est le rapport de la surface haute des feuilles de la végétation divisée par la surface au sol occupée par la végétation. Le LAI est une valeur sans dimension qui s'étale entre 0 pour les sols nus et 6 pour les forêts denses. Le FPAR mesure la proportion de radiation disponible dans les longueurs d'onde actives de la photosynthèse absorbée par la canopée. Les deux ont un intérêt dans la caractérisation de la végétation et notamment dans la résilience de la végétation après un feu. Ces données sont disponibles sur la période Février 2000 à maintenant.

1.2.3.4 MODIS Indices de végétation (MOD13)

Les produits d'indices de végétation de la série MOD13 de MODIS comprennent en plus d'autres informations les deux indices de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et EVI (Enhanced Vegetation Index). Les résolutions spatiales s'étalent entre 5,6km et 250m avec une résolution temporelle entre 16 jours et un mois. Les deux indices peuvent être utilisés pour la surveillance de la végétation après un feu et l'étude de sa résilience.

1.3 Autres données disponibles

1.3.1 Données de la sécurité civile

Avant 2007, il est difficile d'utiliser les données de recensement de la sécurité civile puisqu'elles ne comportent pas d'information géographique précise. Depuis 2007, la sécurité civile fournit des documents recensant les feux avec une information géographique assez détaillée. Un carroyage de coordonnées, comme il existe en métropole, a été établi. Celui-ci permet de découper le territoire en carrés de 2km par 2 km (carroyage DFCI) afin de disposer d'une base commune de localisation des zones d'interventions. Ces carrés sont ensuite découpés en 5 carrés de 1km par 1km. Ce qui donne une résolution spatiale de la localisation d'environ 1km. Les données ne concernent que la période critique des feux, c'est à dire d'Octobre à Février.

Les données disponibles pour chaque feu sont: le lieu-dit et/ou les coordonnées DFCI, les prévisions feu de la météo, le type de végétation, la date, l'heure, la fin, l'origine du feu, la superficie, et les moyens engagés pour la lutte. Des synthèses par saison sont disponibles. Elles portent essentiellement sur l'importance des surfaces brûlées par commune et par province.

Les informations de la sécurité civile ne pourront être utiles pour déterminer les paramètres du régime du feu sur une longue période. Ils pourront cependant permettre de faire des comparaisons avec les données MODIS, ce qui permettra une meilleure évaluation et validation des résultats obtenus.

II Régime du feu

II.1 Définition du régime du feu

Le feu était une source de perturbation naturel essentiel au maintien et à la régénération de nombreux écosystèmes dans le monde entier. Dans ces écosystèmes, le feu initie et influence la composition, la structure, et la répartition de la végétation dans le paysage en réduisant la compétition, créant des niches pour les graines, en libérant certains nutriments, et est déclencheur de la libération de graine ou de la reproduction végétale. Cependant, les activités humaines depuis la fin du 19^{ème} siècle ont altéré le régime de cet perturbation naturel et les effets de ces altérations ne sont pas encore bien compris.

L'étendu des effets du feu pour un endroit donné dépend du type de régime de feu présent. Le régime du feu décrit la nature du feu sur un intervalle de temps long. Le régime du feu est généralement décrit par les caractéristiques suivantes: la fréquence, le cycle, l'amplitude, le type, l'étendue spatiale et la saisonnalité. Ces termes sont défini comme suit (Sousa 1984; Johnson et Gutsell 1994; Skinner et Chang 1996; Pyne et al. 1996; Li 2000; CIFFC 2003; Le Goff et Sirois):

Fréquence: La fréquence décrit le nombre moyen de feux qui ont lieu en sur une période donnée de temps et est souvent exprimée en terme d'intervalle de retour du feu. L'intervalle de retour du feu est le nombre moyen d'années entre deux apparitions successives de feu sur un point donné, ou sur une zone donnée, pour une période d'étude donnée.

Cycle: Le cycle du feu est le temps qu'il faut pour brûler une surface égale à celle de la zone considérée. C'est également ce que l'on appelle la **rotation du feu**. La taille de la zone doit être clairement spécifiée. Par exemple, si la zone d'étude est de 100 000 hectares et qu'il faut cinquante ans aux feux pour brûler 100 000 hectares dans cette zone, le cycle du feu sera de 50 ans. Cela ne signifie pas que toute la zone brûle entièrement en un cycle; certaines parties brûlent généralement plusieurs fois et d'autre pas du tout. Cette indice à de grande échelle peut comprendre différents intervalles de feux, environnements et types de végétation différents.

Amplitude: L'amplitude du feu est décrite en terme d'intensité et de sévérité. L'**intensité du feu** fait référence à la quantité d'énergie thermique dégagée par le feu par unité de temps. Elle peut souvent donner une bonne mesure des effets d'un feu. La **sévérité du feu** décrit les effets du feu sur un site et peut être décrit par plusieurs caractéristiques (e.g., l'intensité du feu, la hauteur des flammes, la durée du feu, etc). Elle peut également être mesurée après un feu par différent biais tels que: le pourcentage de plantes tuées, les effets sur les organismes dans le sol, la perte de nutriments dans le sol, la perte de qualité au niveau de l'eau, les émissions de fumée, etc.

Type de feu: Il y a trois principaux types de feu reconnus: les **feux de sol**, les **feux de surface** et les **feux de cime**. Le feu de sol brûle sous la surface du sol dans un horizon épais de matière organique et de débris végétaux. Alimentés par incandescence avec combustion, leur vitesse de propagation est faible. Le feu de surface brûle les strates basses de la végétation comme la strate herbacée des formations de savanes et des forêts claires. Le feu de cime qui se développe dans le houppier des arbres et arbustes et pourrait parfois être indépendant du feu de surface. Il libère en général de grandes quantités d'énergie et leur vitesse de propagation est très élevée.

Étendue spatiale: L'étendue spatiale fait référence à la taille et la zone couverte par un feu ainsi que le motif spatial engendré.

Saisonnalité: La saisonnalité d'un feu est la période de l'année pendant laquelle les feux ont le plus de chance de partir et de se propager. La saisonnalité a son importance en relation avec l'humidité contenue dans le combustible, de la phénologie de la végétation, et les effets induis par le

feu. La végétation trouvée dans un écosystème donné s'est généralement adaptée au fil du temps à la ou les saisons à laquelle les feux surviennent.

II.2 Régime du feu et télédétection

L'étude du régime du feu nécessite d'avoir des données sur une période de temps la plus longue possible. Lorsque l'on veut faire cette étude à partir de moyen de télédétection, le problème est qu'il est souvent difficile d'avoir des jeux de données complètes concernant les feux sur un nombre d'années important. Nous ne disposerons a priori que de données sur une période restreinte (2000-2009 au mieux pour les données MODIS de détection de feux et de surfaces brûlées) et ayant une fiabilité limitée. Il sera néanmoins possible de dégager des tendances et de faire des estimations de la plus part des paramètres qui déterminent le régime du feu en Nouvelle-Calédonie.

II.2.1 Fréquence

L'étude de la fréquence du feu, ou intervalle de retour du feu nécessite des jeux de données qui s'étalent sur plusieurs dizaines d'années. En effet, les feux ont généralement une fréquence supérieure ou égale à une quinzaine d'années. Cependant, après l'analyse des données, si un nombre suffisant de retour de feu est observé, il sera éventuellement possible de faire des estimations de la fonction de renouvellement du feu. En effet, certaines techniques qui considèrent le feu comme un processus ponctuel, permettent de caractériser les occurrences de feu. Ces techniques utilisent classiquement des modèles de type Weibull (Clark 1979; McCarthy et al. 2001; Moritz et al. 2008) qui demande une paramétrisation du modèle. Une estimation de la fonction de renouvellement par une modélisation non-paramétrique est également possible (e.g. Pena et al. 2001; Markovich and Krieger 2006; Boer et al. 2008b).

Cependant, si certaines zones de récurrence de feu (plus d'un feu sur la période temporelle d'étude) sont repérées à partir des données, il est possible d'utiliser ces zones pour faire une étude comparative de la récupération de la végétation après un feu sur des zones plus ou moins touchées régulièrement par le feu.

II.2.2 Cycle

Les données MODIS de détection de surfaces brûlées devraient permettre de faire une estimation du cycle du feu en Nouvelle-Calédonie. Ce calcul pourra être complété par les données de la sécurité civile. Celle-ci n'était que partiel et sur une période de temps très courte, mais permettront néanmoins d'estimer le biais des calculs effectués à partir des données MODIS. Sur des zones d'étude plus détaillées, il sera possible de faire un calcul du cycle du feu à partir de données plus précises comme des données LANDSAT.

II.2.3 Amplitude

L'amplitude pourra être caractérisée à partir de l'intensité du feu et de sa sévérité. La sévérité des feux peut être estimée par des moyens de télédétection. L'indice le plus répandu pour estimer la sévérité des feux est le dNBR (differenced of Normalized Burn Ratio) qui se calcule généralement à partir de canaux 4 (proche infrarouge) et 7 (moyen infrarouge) de LANDSAT. Des comparaisons entre plusieurs techniques ont été réalisées. Elles ont montré que la sévérité des feux cartographiée basée sur le NBR est meilleure que celle faite à partir d'autre technique de télédétection comme le NDVI, transformations des composantes principales, et la transformation de « tasseled cap » (Epting et al., 2005; Miller & Yool, 2002; Rogan & Yool, 2001).

Récemment, une étude a montré que l'évaluation de la sévérité au moyen du LAI (Leaf Area Index) était possible. Cette indice est bien connu comme un attribut biophysique de la végétation qui peut être objectivement mesuré sur le terrain (Breda, 2003; Macfarlane et al., 2007c) et par des moyens de télédétection (e.g., Baret & Guyot, 1991; Gascon et al., 2004; Peddle et al., 1999; Turner et al., 1999). Des travaux ont suggérés que l'évaluation de la sévérité du feu basée sur les indices bien connus que sont le CBI (Combined Burn Index) et le NBR serait en fait une mesure du changement dans le LAI (Chuvieco et al., 2006; De Santis & Chuvieco, 2007). La différence de LAI a été démontré comme étant une mesure de la sévérité du feu dans la forêt de jarrah du Nord en Australie du Sud-Ouest (Boer et al., 2008a). Le produit MODIS LAI (MOD15A2) permettra donc d'évaluer la sévérité des feux en faisant la différence du LAI sur les pixels brûlés avant et après le feu.

L'intensité du feu peut être mesurée par le taux d'énergie thermique libérée par unité de temps. Les produits feu actif de MODIS (MOD14/MYD14) fournissent une mesure du FRP (Fire Radiative Power) et est exprimé en MégaWatt (MW). Celle-ci devrait permettre d'estimer l'intensité des feux considérés.

II.2.4 Étendue spatiale

Comme pour le calcul du cycle du feu, le calcul de l'étendue spatiale des feux et de leur répartition par taille pourra être fait grâce au données MODIS de détection de surfaces brûlées et complété par les données de la sécurité civile. De même, plus localement, des données de type LANDSAT pourrait permettre une étude plus précise.

II.2.5 Saisonnalité

La saisonnalité pourra être étudiée en ramenant le nombre de feux, et la surface totale brûlée par mois ou par saison. Cette étude peut se faire globalement, et localement. Un calcul de densité de feu pour être effectué pour quantifier l'importance du feu dans certaine zone à certain moment de l'année. La densité peut être calculée en cumulant simplement l'information de plusieurs pixels. Un autre méthode peut être de cumuler le nombre de feu dans un rayon définie (par exemple: 5641m centré sur le pixel considéré, soit une surface de 100km²), et pour lisser le rendu, les feux peuvent être pondérés en fonction de leur distance au point considéré selon la méthode kernel (Silverman, B.W. Density Estimation for Statistics and Data Analysis. New York: Chapman and Hall, 1986.)

II.3 Régime du feu et occupation du sol

Il peut être intéressant d'évaluer le type de régime de feu en fonction de l'occupation du sol. Pour cela, deux cartes d'occupation du sol réalisée par la DTSI sont disponibles. La première date de 1996 et une deuxième plus récente de 2008. Les données de détection de feux et de surfaces brûlées pourront être croisées avec ces deux occupations du sol et comparées. Par la suite, une étude plus fine au niveau des changements d'occupation du sol, pourra mettre en valeur le rôle du feu dans ce processus.

II.4 Résilience du système

L'étude de la résilience du système devrait suivre l'étude du régime du feu. Celle-ci peut se faire en suivant l'évolution au cour du temps des indices tels que des indices de végétation NDVI (Díaz-Delgado, 1998, Malak & Pausas, 2006), EVI ou le LAI, après un feu.

III Références

III.1 Articles

- Baret, F., & Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35, 161–173.
- Boer, MM, Macfarlane, C, Norris, J, Sadler, RJ, Wallace, J, Grierson, PF 2008, 'Mapping burned areas and burn severity patterns in SW Australian eucalypt forest using remotely-sensed changes in leaf area index', *Remote Sensing of Environment*, 112, pp. 4358-4369.
- Boer, M., Sadler, R., Grierson P. 2008. Objective characterisation of fire regimes for science-based management of fire-prone landscapes. The International Bushfire Research Conference 2008.
- Breda, N. J. J. (2003). Ground-based measurements of leaf area index: A review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54, 2403–2417.
- Boyeau, Y-E. 2005. Analyse spatiale de l'impact des feux par type de milieux naturels en Province Sud. Arborecence pour la Direction des Ressources Naturelles de la Province Sud de la Nouvelle-Calédonie.
- [CIFFC] Canadian Interagency Forest Fire Centre. 2003. The 2003 glossary of forest fire management terms. Canadian Interagency Forest Fire Centre, Winnipeg, MB.
- Chuvieco, E., Riano, D., Danson, F. M., & Martin, P. (2006). Use of a radiative transfer model to simulate the postfire spectral response to burn severity. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 111.
- Clark J.S. 1979. Ecological disturbance as a renewal process: theory and application to fire history. *Oikos* 56: 17-30.
- Craig, R., Heath, B., Raisbeck-Brown, N., Steber, M., Marsden, J. and Smith, R. 2002. The distribution, extent and seasonality of large fires in Australia, April 1998-March 2000, as mapped from NOAA-AVHRR imagery. In: *Australian Fire Regimes: Contemporary Patterns (April 1998-March 2000) and Changes since European Settlement*, Russell-Smith, J., Craig, R. Gill, A.M., Smith, R. and Williams, J. (eds). Australia State of the Environment Second Technical Paper Series (Biodiversity), Department of the Environment and Heritage, Canberra.
- De Santis, A., & Chuvieco, E. (2007). Burn severity estimation from remotely sensed data: Performance of simulation versus empirical models. *Remote Sensing of Environment*, 108, 422–435.
- Diaz-Delgado, R., Salvador, R. and Pons, X. (1998) Monitoring of plant community regeneration after fire by remote sensing.. *Fire Management and Landscape Ecology*, pp. 315-324. International Association of Wildland Fire, Fairfield, WA
- Epting, J., Verbyla, D., & Sorbel, B. (2005). Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+. *Remote Sensing of Environment*,

96, 328–339.

- Gascon, F., Gastellu-Etchegorry, J. P., Lefevre-Fonollosa, M. J., & Dufrene, E. (2004). Retrieval of forest biophysical variables by inverting a 3-D radiative transfer model and using high and very high resolution imagery. *International Journal of RemoteSensing*, 25, 5601–5616
- Johnson, E.A. and S.L. Gutsell. 1994. Fire frequency models, methods, and interpretations. *dvances in Ecological Research* 25:239-287.
- Le Goff, H. and L. Sirois. 2004. Black spruce and jack pine dynamics simulated under varying fire cycles in the northern boreal forest of Québec, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 2399-2409.
- Li, C. 2000. Fire regimes and their simulation with reference to Ontario. Pp. 115–140 in Perara, A., D. Euler, and I. Thompson (eds.). *Ecology of a managed terrestrial landscape: patterns and processes of forest landscapes in Ontario*. The University of British Columbia Press, Vancouver, BC.
- Kaufman YJ; Justice CO; Flynn LP; Kendall JD; Prins EM; Giglio L; Ward DE; Menzel WP; Setzer AW, *Potential global fire monitoring from EOS-MODIS*, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-ATMOSPHERES 1998, Vol 103, , pp 32215-32238
- Lillesand, T.M. and Kiefer, R.W. 1996. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Riley and Sons, Inc., Canada.
- Markovich N.M. and Krieger U.R. 2006. Nonparametric estimation of the renewal function by empirical data. *Stochastic Models* 22: 175-199.
- McCarthy M.A., Gill A.M. and Bradstock R.A. 2001. Theoretical fire-interval distributions. *International Journal of Wildland fire* 10: 73-77.
- Macfarlane, C., Hoffman, M., Eamus, D., Kerp, N., Higginson, S., McMurtrie, R., & Adams, M. (2007). Estimation of leaf area index in eucalypt forest using digital photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143, 176–188.
- Malak, D.A., Pausas, J.G. 2006. Fire regime and post-fire Normalized Difference Vegetation Index changes in the eastern Iberian peninsula (Mediterranean basin), *International Journal of Wildland Fire* 15 (2006), pp. 407–413.
- Miller, J. D., & Yool, S. R. (2002). Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstory types using multi-temporal Landsat TM and ETM data. *Remote Sensing of Environment*, 82, 481–496.
- Morgan,P., C. Hardy, T.W. Swetnam, M.G. Rollins and D.G. Long. 2001. Mapping fire regimes across time and space: Understanding coarse and fine-scale patterns. *International Journal of Wildland Fire* 10:349-342.
- Moritz M.A., Moody T.J., Miles L.J., Smith M.M. and de Valpine P. 2008. The fire frequency analysis branch of the pyrostatistics tree: sampling decisions and censoring in fire interval data.

Environmental and Ecological Statistics In press.

- Peddle, D. R., Hall, F. G., & LeDrew, E. F. (1999). Spectral mixture analysis and geometricoptical reflectance modeling of boreal forest biophysical structure. *Remote Sensing of Environment*, 67, 288–297.
- Pena E.A., Strawderman R.L. and Hollander M. 2001. Nonparamteric estimation with recurrent event data. *Journal of the American Statistical Association* 96: 1299-1315.
- Pyne. S.J., P.L. Andrews and R.D. Laven. 1996. *Introduction to Wildland Fire*, 2nd Ed. John Wiley & Sons, New York, NY.
- Robinson, J.M. 1991. Fire from space: global fire evaluation in infrared remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, (12) 3-24.
- Rogan, J., & Yool, S. R. (2001). Mapping fire-induced vegetation depletion in the Peloncillo Mountains, Arizona and New Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 3101–3121.
- Rollins, M.G., R.E. Keane, R.A. Parsons. 2004. Mapping Fuels and Fire Regimes Using Remote Sensing, Ecosystem Simulation, and Gradient Modeling. *Ecological Applications* 14:75-95.
- Skinner, C.N. and C. Chang. 1996. Fire regimes, past and present. Pp. 1041-1069 *in* Sierra Nevada Ecosystem Project Final Report to Congress, Status of the Sierra Nevada. Vol II:Assessments and scientific basis for management options. University of California, Davis, Centers for Water and Wildland Resources.
- Sousa, W.P. 1984. The role of disturbance in natural communities. *Annual Review of Ecology and Systematics* 15:353-391.
- Turner, D. P., Cohen, W. B., Kennedy, R. E., Fassnacht, K. S., & Briggs, J. M. (1999). Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. *Remote Sensing of Environment*, 70, 52–68.

III.2 Sites webs

LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center):

<https://lpdaac.usgs.gov/>

MODIS Fire and Thermal Anomalies:

<http://modis-fire.umd.edu/>

Educnet: les Sattelites Landsat:

<http://www.educnet.education.fr/orbito/system/landsat/land00.htm>