

Utilisation de séries temporelles d'images satellitaires pour cartographier le dépérissement des boisements résineux du Sud Massif Central

La canicule de 2003 a provoqué dans le Sud Massif Central des dépérissements résineux brutaux et massifs. Après la crise est venu le temps de l'analyse, en évaluant d'abord l'étendue des impacts, ne serait-ce que pour organiser les reconstitutions à l'échelle régionale. La méthode de télédétection imaginée et mise en œuvre avec succès est bien adaptée à ce type de phénomène, avec ceci d'original qu'elle intègre les coupes sanitaires d'urgence comme indicateur de l'intensité du dépérissement. Mais gardons-nous de généraliser, car de ce fait même elle ne se prêterait pas à l'évaluation d'autres types de dépérissement, plus diffus ou aux symptômes plus « subtils ».

Les conditions climatiques de 2003 ont été exceptionnelles et se sont caractérisées, en France et dans une grande partie de l'Europe, par de très hautes températures durant l'été associées à un déficit de pluviométrie qui s'est prolongé dans certaines régions jusqu'au printemps 2004 [Rebetez et al., 2006]. À la suite de cet épisode de nombreux impacts se sont fait ressentir sur les milieux forestiers, avec notamment des déficits foliaires d'intensité variable selon les espèces et une mortalité, plus importante chez les résineux que chez les feuillus (Pauly, 2006).

D'importants dépérissements ont alors été constatés dans les peuplements de résineux des deux départements du Sud Massif Central, le Tarn et l'Aveyron. Les symptômes observés sont des rougissements, puis des dessèchements partiels ou totaux de certains arbres. Dès la fin de l'été 2003, ces symptômes sont apparus massivement sur le Douglas et l'épicéa avec, au printemps 2004, des mortalités en taches sur

le sapin pectiné ou de Vancouver. L'affaiblissement des peuplements a permis le développement de parasites en particulier sur le sapin de Vancouver et l'épicéa. Plusieurs milliers d'hectares de forêts privées et publiques sont affectés par le phénomène : de 2003 à 2005, 1 700 ha au moins ont fait l'objet de coupes d'urgence (récolte anticipée) et en 2007 le total dépassait 4 000 ha. D'où l'inquiétude des propriétaires publics et privés : quelle était l'ampleur réelle du phénomène ? Comment évoluerait-il et, dans la mesure où ce type d'événement risquait de se « banaliser » avec le changement climatique, comment orienter la reconstitution ?

Début 2006, la Commission Régionale de la Forêt et des Produits Forestiers de Midi-Pyrénées a chargé l'Office national des forêts (ONF) et le Centre régional de la propriété forestière (CRPF) de dresser l'état des lieux : décrire le dépérissement en s'appuyant sur le réseau d'observation du Département santé des forêts

(DSF), le quantifier à l'échelle régionale et analyser les facteurs de causalité. [CRPF Midi-Pyrénées et al., 2008]. Pour l'aspect quantitatif, cependant, les données sur les coupes de dépérissement ne donnant qu'une vision incomplète de la situation, l'École d'ingénieurs de Purpan (EIP) a été sollicitée pour une approche complémentaire d'évaluation cartographique par télédétection. Cette démarche s'est imposée comme la seule économiquement acceptable dans le cadre de la commande, pour une observation rapide et complète sur un territoire étendu : les surfaces en résineux couvrent plus de 90 000 ha répartis sur deux départements.

Nous ne traitons ici que de la méthode de télédétection proposée (et mise en œuvre), par traitement de séries temporelles d'images satellitaires. Les surfaces analysées se basent sur les données cartographiques de l'Inventaire forestier national (IFN) pour les résineux, lesquelles ne permettent pas de distinguer chaque essence, mais



A. Triou, ONF

seulement trois groupes : « sapins/épicéas », « douglas » et « autres conifères ». Au-delà des résultats obtenus pour l'étude de ce dépérissement à échelle régionale, nous évoquons aussi l'intérêt de ce type d'« outil » pour la détection des situations à risque au regard des changements climatiques.

Des données de télédétection adaptées au suivi de l'activité végétale

Les images satellitales peuvent apporter une aide significative pour la connaissance de la couverture végétale et le suivi de son état. Les capteurs embarqués recueillent l'énergie solaire réfléchi et la transforment en images qui peuvent être analysées, à partir des propriétés de réflectance des objets étudiés (partie de l'énergie réfléchi, différente selon les longueurs d'onde). Pour la végétation, les ondes dans le rouge sont absorbées par les pigments chlorophylliens ; à l'inverse, les ondes dans le proche infrarouge sont fortement diffusées par la structure du mésophylle des feuilles et en particulier du parenchyme lacuneux, lieu d'échange entre l'oxygène et le gaz carbonique pour la photosynthèse et la respiration. En situation de stress hydrique ou dans le cas de sénescence naturelle du

végétal, la réflectance augmente dans le rouge du fait d'une baisse du taux d'activité de la chlorophylle. Parallèlement, la déstructuration du mésophylle s'accompagne d'une diminution de la réflectance dans le proche infrarouge.

Choix d'un indice synthétique caractérisant l'état de la végétation

Dans notre démarche, la première étape est de caractériser l'état de la végétation (peuplements résineux) par un indice qui combine, en tout point de l'image, les valeurs de réflectance de différentes longueurs d'onde. Il existe un grand nombre d'indices construits pour diverses applications : la plupart combinent les valeurs de réflectance mesurées dans le proche infrarouge (NIR : *near infrared*) et dans le rouge (R) et le plus largement utilisé est le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* ou indice de végétation normalisé) :

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}}$$

Pour un végétal sénescent ou subissant un stress hydrique la mesure du NDVI est plus faible que pour un végétal en pleine activité photosynthétique. Des variations anormales de NDVI peuvent être liées à une perturbation environnementale ayant entraîné un défi-

cit foliaire ou un dessèchement du feuillage.

Cet indice, dont la robustesse est démontrée, est fortement corrélé à des paramètres biophysiques de la végétation. Il peut être considéré comme étant un bon indicateur de l'activité chlorophyllienne et donc de la vigueur de la végétation. Sensible aux variations spatiales et temporelles il est adapté pour le suivi de la dynamique de la végétation (Huete *et al.*, 2002). Des applications ont montré son intérêt pour l'évaluation du dépérissement forestier, la détection des dommages dus à la sécheresse ou encore la cartographie de la défoliation des arbres, dans le cas où ces phénomènes entraînent une modification brutale et importante de l'activité photosynthétique (Deshayes *et al.*, 2006; Solberg *et al.*, 2007).

Choix des images : séries temporelles à moyenne résolution

Lorsqu'elle concerne un massif ou un suivi de parcelles, la cartographie de dommages forestiers est généralement abordée par analyse d'images à haute, voire très haute résolution spatiale qui permet une observation à une échelle fine. (Morin *et al.*, 2007). Mais ces images, qui ne couvrent que des surfaces relativement restreintes (quelques dizaines de km), conviennent mal à l'échelle régionale qui nous concerne ici et présentent encore des contraintes d'acquisition ou de disponibilité (coût, dates, archive). De plus, leur répétitivité limitée dans le temps rend difficile le suivi d'un phénomène qui résulterait de mécanismes continus et progressifs perturbant par exemple la phénologie.

En revanche, les images du capteur MODIS embarqué sur le satellite Terra sont particulièrement bien adaptées au suivi continu de la couverture végétale. Il s'agit d'images à moyenne résolution spatiale (pixel de 250 m) couvrant chacune une très grande surface (1 200 km x

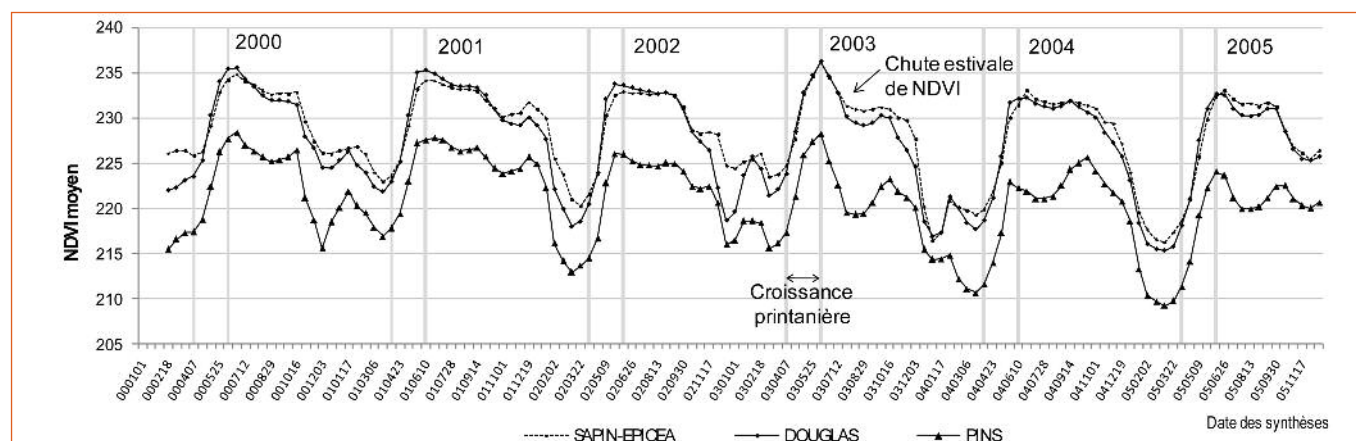


Fig. 1 : profils pluriannuels de NDVI pour trois groupes de résineux de la zone d'étude

1 200 km), ce qui permet un traitement homogène à l'échelle régionale. De plus, leur couverture journalière permet une approche basée sur le suivi de la dynamique des couverts végétaux en lien avec leur phénologie. Enfin, la disponibilité des images en archive permet une analyse rétrospective des événements depuis 2000.

Nous avons choisi de travailler sur une série d'images MODIS pour deux raisons principales : la couverture journalière de l'ensemble de la zone d'étude et la résolution spatiale, qui est la plus fine parmi les satellites à haute répétitivité temporelle. Afin de s'affranchir pour partie des effets liés aux différences de conditions d'acquisition des images d'un jour à l'autre, tels que les perturbations du signal liées aux conditions atmosphériques, nous avons utilisé des synthèses représentant le NDVI de chaque pixel calculé sur 16 jours. La série d'images disponible couvre la période 2000-2007. Les variations temporelles des valeurs de NDVI que l'on peut mesurer avec ces images accompagnent l'évolution saisonnière de l'activité végétale forestière.

Profils temporels de NDVI et mesure de l'activité végétale

En établissant les profils temporels de NDVI on peut caractériser le cycle phénologique spécifique des formations considérées. Les profils

pluriannuels de NDVI établis pour les trois types de peuplements (figure 1) mettent en évidence le cycle saisonnier ainsi que les variations de comportement interannuelles. Les courbes des deux groupes sapin-épicéa et douglas sont très proches. Pour les « autres conifères », c'est-à-dire ici les pins, les valeurs sont nettement plus faibles pour l'ensemble du cycle, mais la forme de la courbe est globalement similaire.

Repérer les stades phénologiques clés

On peut clairement identifier sur les courbes les phases importantes de la dynamique saisonnière correspondant au démarrage de l'activité photosynthétique au début

du printemps, puis la phase de croissance jusqu'au maximum atteint en fin de printemps, marquant la fin de la production de biomasse. Cette saison de croissance est suivie d'une phase de décroissance estivale indiquant la sénescence progressive de la végétation, plus ou moins rapide selon les années. On peut observer que la sécheresse de 2003, par exemple, se traduit par une chute très brutale de NDVI dès le début du mois de juillet. Une remontée de NDVI est parfois observée en automne, celle-ci accompagne la reprise des précipitations. En hiver, les mesures de NDVI peuvent être extrêmement perturbées par le couvert neigeux pour les sites les plus élevés en altitude.

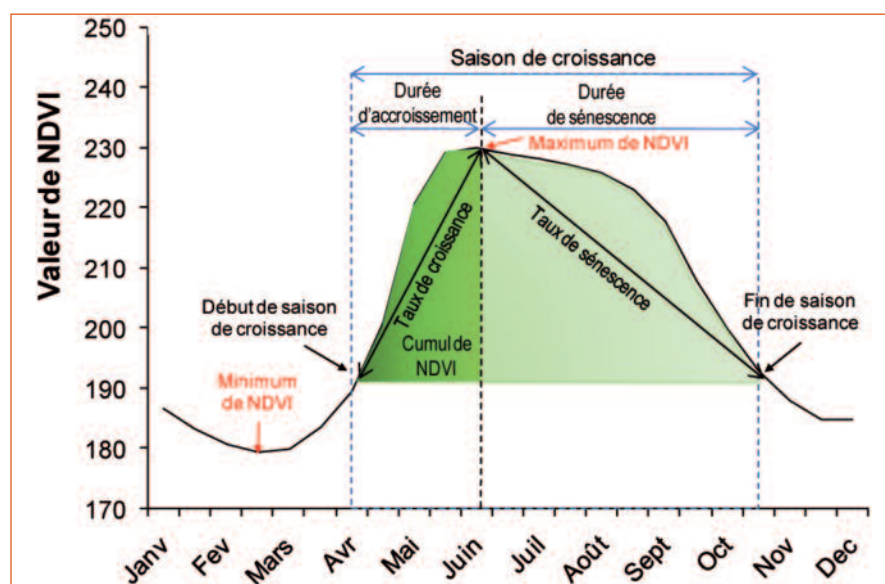


Fig. 2 : profil annuel de NDVI et « phenologic metrics » (d'après B.C. Reed)

Comme le montre un profil type de NDVI (figure 2 page précédente), on peut repérer des stades phénologiques « clés » et relever ainsi une série d'observations liées au comportement de la végétation telle que : la date de démarrage de l'activité printanière, les valeurs de NDVI indiquant le niveau d'activité photosynthétique au début et en fin de la saison de croissance, la durée de la saison de croissance... (Jackson *et al.*, 2001; Reed, 2006).

Calculer un indicateur d'activité de la végétation (SG) à partir des profils de NDVI

Ces observations, nommées « phenologic metrics » par B.C. Reed ne correspondent pas directement à des mesures conventionnelles de phénologie faites sur des individus ou des espèces in situ, mais fournissent des indicateurs du comportement et de la dynamique du couvert végétal (Moulin *et al.*, 1997).

L'activité printanière correspond à la phase d'accroissement maximal et peut être définie comme sur la figure 2, à partir des principaux « phenologic metrics ». Par le cumul de NDVI sur cette période d'accroissement végétal (avril-juin), on obtient un indicateur annuel du niveau d'activité de la végétation que l'on nomme **SG (spring greenness)** et qui est lié à la production primaire nette.

Méthode d'identification et cartographie des variations de l'activité végétale

Pour donner une vue globale du dépérissement et de son évolution, l'objectif du travail était de localiser cartographiquement les situations où les peuplements forestiers ont présenté des perturbations physiologiques suffisamment fortes pour engendrer des variations significatives de l'indicateur annuel de vigueur SG. La valeur de SG de chaque pixel a été calculée comme indiqué figure 3 pour chacune des années de la période 2000-2007, de manière à montrer, par comparaison, les fluctuations interannuelles.

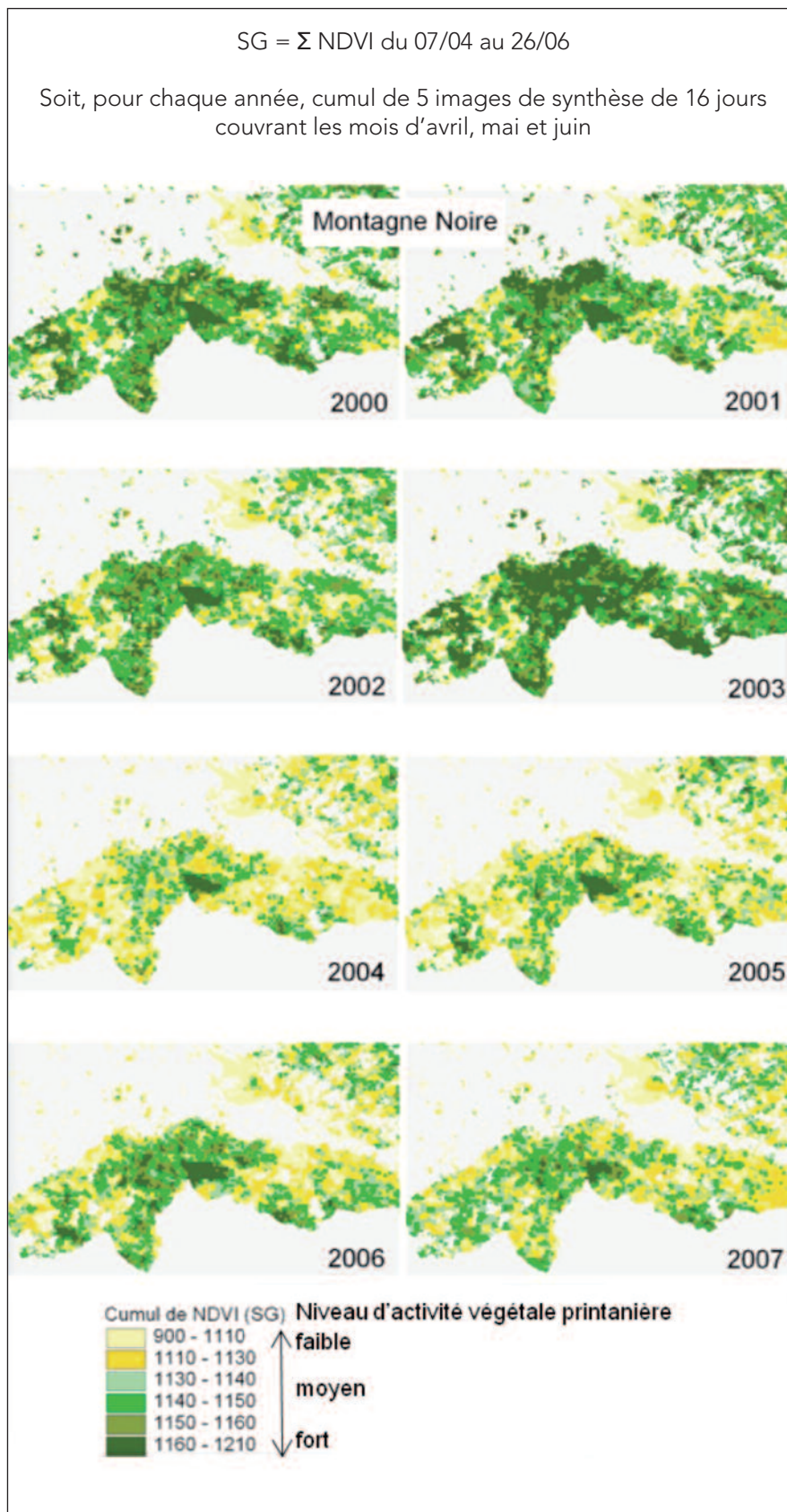


Fig. 3 : calcul de l'indicateur de vigueur SG pour notre étude et extrait cartographique pour l'ensemble du couvert forestier de la Montagne Noire (Tarn)

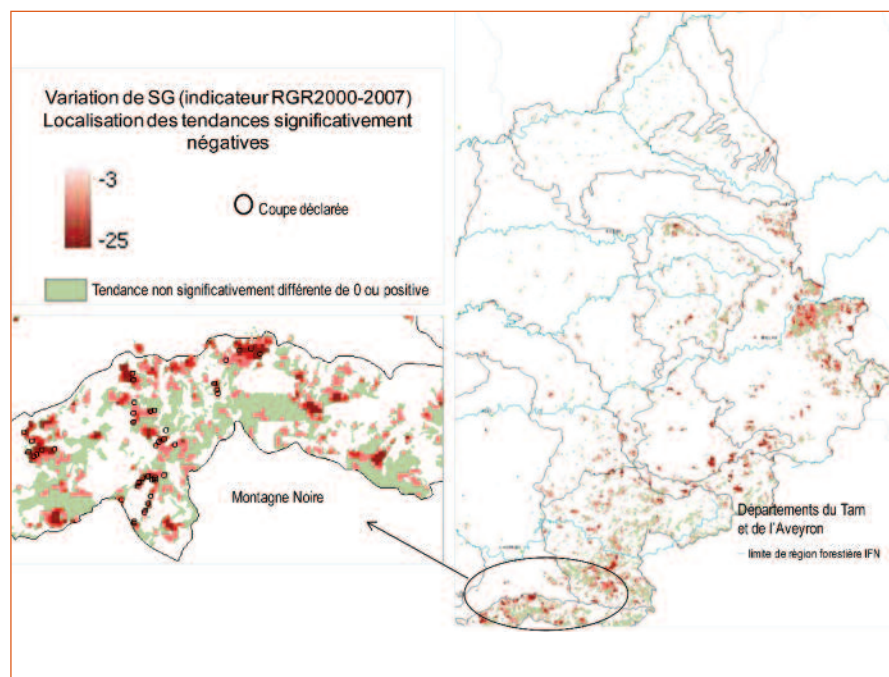


Fig. 4 : cartographie des tendances d'évolution de l'indicateur de vigueur entre 2000 et 2007 ; les valeurs négatives indiquent une perte de vigueur (activité printanière) d'autant plus aiguë qu'elles s'éloignent du zéro

Variabilité spatiale et interannuelle de l'activité végétale

La figure 3 est la représentation cartographique de l'indicateur SG pour le massif forestier de la Montagne Noire, pour les huit années d'observation.

On peut constater une hétérogénéité intra-massif faisant ressortir les secteurs de plus forte activité végétale printanière. À cette variabilité spatiale s'ajoute une variabilité temporelle : le niveau d'hétérogénéité intra-massif se maintient, mais avec des valeurs de SG globalement plus faibles à partir de 2004 sur l'ensemble du couvert végétal. Clairement, l'activité printanière globale est relativement stable de 2000 à 2003 (voire légèrement « boostée » au printemps 2003, avant que se manifestent les phénomènes de stress), puis elle chute en 2004 et peine à se rétablir ensuite.

Caractérisation de l'évolution de la vigueur de la végétation au cours de la période 2000-2007

Pour chaque pixel, l'évolution des valeurs de SG sur plusieurs années

peut être caractérisée par une tendance qui rend compte de la variation de l'activité végétale entre deux extrêmes : tendance à la baisse en cas de perturbation physiologique, ou à la hausse si accroissement de la végétation. La tendance de la série des SG annuels d'un pixel donné répond au calcul d'un coefficient de pente (a) qui donne le sens (positif ou négatif) et l'importance (valeur) de l'évolution de l'activité.

Ce coefficient peut être cartographié pour représenter l'intensité du « changement » ou de la perturbation observé(e) sur la période 2000-2007 dans les peuplements résineux. Il fait d'abord l'objet d'un test statistique pour identifier les situations où il traduit une tendance significative (Reed, 2006), c'est-à-dire les cas où il est significativement différent de la pente de référence a_0 (pente nulle).

$$t = (a - a_0) / (\sigma / \sqrt{n})$$

a : pente de la tendance

a_0 : pente de référence considérée nulle

σ : écart-type

n : nombre d'années d'observation

Les valeurs négatives significatives au seuil de probabilité de 0,01 traduisent une baisse d'activité végétale. Les valeurs positives significatives traduisent au contraire le maintien, voire une augmentation, de la vigueur de la végétation. La pente (a) de la ligne de tendance, calculée pour chaque pixel, constitue notre indicateur de « changement » ou de perturbation observé sur la période de 2000 à 2007. Celui-ci, nommé RGR2000-2007 peut être cartographié pour toutes les surfaces en résineux comme le montre la figure 4.

Étalonnage des 4 classes de perte de vigueur

Pour établir la validité de cette cartographie et donner une définition concrète aux classes de tendance proposées, nous avons fait l'hypothèse que les zones de forte chute d'activité végétale, sur la période d'observation, correspondaient aux dépérissements et/ou coupes sanitaires, pour l'essentiel bien documentés par l'ONF et le CRPF. Le croisement avec des données d'inventaire localisées de coupes sanitaires, certaines déjà réalisées à la date des images (situation extrême), d'autres programmées (permettant d'identifier des surfaces dépérissantes) a permis de définir les seuils de regroupement des valeurs en classes correspondant à des niveaux de dépérissement ou de comportement de peuplement sain.

Seules les coupes de plus de 4 ha ont été retenues pour cet « étalonnage », soit un total de 114 points de coupe. La nomenclature finale distingue 4 classes (figure 5 page suivante) :

- 1- très forte chute de l'activité végétale, peuplements dépérissants et coupes rases,
- 2- chute importante de l'activité végétale, peuplements souvent dépérissants et/ou à évolution incertaine,
- 3- faible chute de l'activité végétale, peuplements à évolution incertaine,
- 4- chute très faible, voire augmentation de l'activité végétale, peuplements *a priori* sains.

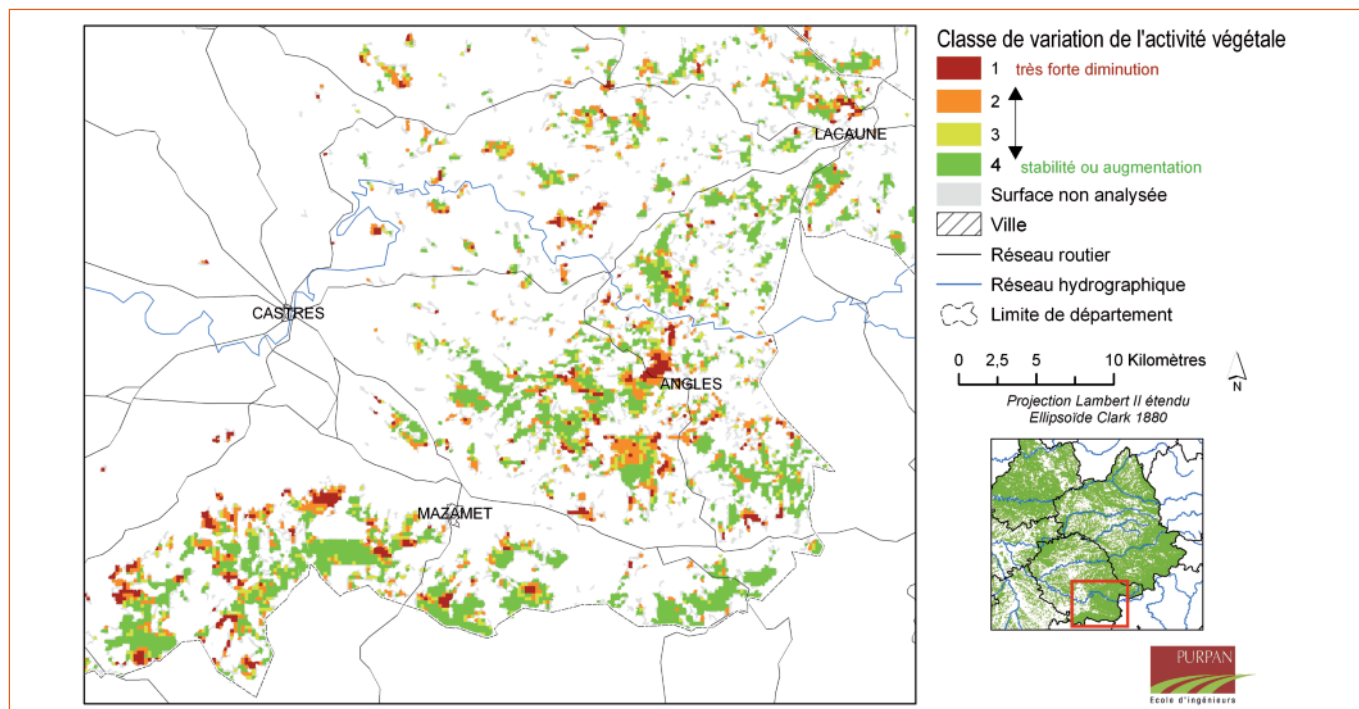


Fig. 5 : carte du phénomène de baisse de l'activité végétale des peuplements résineux entre 2000 et 2007 (Sud du Tarn)

Résultats et bilan de l'étude du dépérissement

L'utilisation des données de télédétection a permis de mettre en évidence et de cartographier une baisse d'activité végétale sur l'ensemble des deux départements concernés. Les observations de terrain ayant confirmé le lien entre cet indice et l'état de vigueur des peuplements, ces cartes indiquent les grandes zones dépérissantes ou susceptibles de l'être.

L'extraction des surfaces par classe de baisse d'activité a permis de quantifier globalement le phénomène sur l'ensemble de la zone d'étude. Il en ressort qu'en 2007, la surface des peuplements sujets à dépérissement, avéré ou probable (classes 1 et 2), représente 29 % des surfaces résineuses. L'analyse par groupe d'essences (selon la typologie de l'IFN) indique que 5 400 ha pour le douglas, essentiellement situés dans l'Aveyron et 5 800 ha pour l'ensemble épicéa-sapin, ont été significativement affectés par la canicule de 2003.

Par ailleurs, cette exploitation des données de télédétection a aussi contribué à l'étude des facteurs de causalité, par croisement avec les données cartographiques disponibles (d'échelle compatible). S'il n'a pas été possible d'explorer de cette façon l'ensemble des facteurs stationnels, l'utilisation d'un modèle numérique de terrain a montré que l'altitude est un facteur explicatif significatif. Dans le Tarn, on observe qu'au-delà de 750 m pour le douglas et de 800 m pour le sapin-épicéa, le risque semble réduit. Pour l'Aveyron, seul le cas du douglas est significatif (le groupe sapin-épicéa y est beaucoup moins représenté que dans le Tarn) : les dépérissements ne diminuent fortement qu'au-delà de 900 m.

Bilan de l'étude

La méthodologie utilisée dans cette étude a montré son intérêt pour analyser un phénomène de dépérissement sur une grande zone géographique. Cependant il est important de signaler les éléments suivants :

- Les cartes obtenues donnent une bonne vision d'ensemble, mais ne

doivent pas être utilisées à une échelle plus détaillée. En effet, la taille des pixels des images satellitaires utilisées n'est pas adaptée à une lecture locale : petite forêt et encore moins parcelle. De même, la méthode ne permet pas de tenir compte des peuplements fragmentés ou de petite taille.

- Les données cartographiques IFN des limites de peuplements utilisées pour l'analyse n'ont pas permis de distinguer chaque essence. Ainsi, l'épicéa et le sapin sont confondus en un groupe d'essences unique.

- L'analyse des données sur l'activité végétale printanière, fournie par les images satellitaires, reflète bien la souffrance des peuplements résineux et la probabilité de dépérissement. Pour autant, on ne doit pas tirer de conclusion hâtive et alarmiste sur l'avenir des peuplements à partir de ces seuls résultats : il faut aussi une analyse par essence, complétée d'observations de terrain. En l'occurrence, une différence nette de comportement est apparue entre les essences : si le groupe épicéa-sapin a présenté des dépérissements justifiant de

nombreuses coupes rases, les peuplements de douglas ont souvent pu être maintenus. L'absence de cortège parasite pour cette essence « exotique » pourrait fournir un élément d'explication.

Malgré ces limitations, L'utilisation de la télédétection s'est confirmée comme la seule méthode économiquement pertinente dans le cadre de l'étude commandée. Elle a permis une observation rapide et complète sur une large zone géographique pour un coût réduit, et pourra orienter les futures observations de terrain. La localisation et la quantification des zones à risque de dépérissements tirées de cette étude vont permettre de revoir les recommandations de choix d'essences dans les documents directeurs utilisés par les forestiers. Ainsi, un projet de modification des tableaux maîtres de la DRA-SRA « Sud Massif Central » est en cours. En particulier, la relation établie entre le dépérissement et le facteur altitude permet de préciser les conditions d'utilisation du douglas.

Contraintes de la méthode

Ce bilan encourageant ne doit pas faire oublier que les développements basés sur l'exploitation des séries temporelles d'images à moyenne résolution spatiale présentent un certain nombre de contraintes.

Contraintes de prétraitement des séries d'images

La première concerne la qualité initiale des images et la nécessité de prétraitements adaptés. Les images peuvent présenter des niveaux de qualité variables du fait de perturbations du signal liées aux conditions atmosphériques, à la topographie et aux effets de sols, aux caractéristiques de prise de vue. Ces principales sources de perturbations ont généralement pour effet de faire baisser les valeurs de NDVI. Elles existent pour tous les types de données de télédétection,

mais, pour travailler sur des données continues dans le temps, il est nécessaire de réduire ces erreurs en appliquant une correction de type « lissage » calculée de pixel à pixel, en comparant les dates entre elles. Plusieurs techniques de lissage sont utilisées et répertoriées en deux types :

- 1) le filtrage : les valeurs aberrantes sont détectées à partir de leurs propriétés originales et de règles prédéfinies et remplacées par combinaison des valeurs voisines
- 2) l'ajustement à une fonction : qui consiste en la construction d'une nouvelle série temporelle suivant un modèle théorique ajusté aux données disponibles.

Pour chacun de ces deux types il existe des méthodes relativement robustes, mais aucune n'est « parfaite » et il est nécessaire de faire un choix selon le contexte, généralement sur la base de tests. Les méthodes par ajustement de fonction (groupe 2) sont adaptées à l'étude de cycles caractéristiques d'un développement régulier de la végétation, mais pas à celle de phénomènes exceptionnels et accidentels. Nous considérons que les méthodes de filtrage (groupe 1) sont mieux adaptées à notre type d'étude. Toutefois un choix approprié et surtout un travail d'ajustement et de paramétrage sont indispensables pour obtenir un compromis entre l'élimination de variations en « dents de scie » des valeurs de NDVI dues à des erreurs de mesures, et la conservation de variations même brutales dues à des modifications du comportement de la végétation (mortalité, coupe, incendie...).

Difficultés de validation des résultats

Parmi les nombreuses applications basées sur l'exploitation d'images MODIS, peu présentent des éléments de validation des informations produites, très souvent par manque ou insuffisance de références de terrain. La difficulté réside dans la na-

ture et surtout l'échelle des phénomènes comparés ; les valeurs mesurées et l'échelle spatiale des images MODIS sont difficiles à relier à des observations de terrain. Dans notre étude, le croisement avec des informations disponibles sur des coupes sanitaires localisées, consiste d'abord à rechercher le seuil de l'indicateur le plus adapté pour rendre compte de la baisse de l'activité végétale qu'en une véritable validation. Et bien que la méthode basée sur des données MODIS ait déjà montré son utilité pour détecter des dommages forestiers [Eklundh L. et al., 2009], sa capacité à estimer une intensité du phénomène reste à démontrer. Pour appréhender cette intensité on peut envisager, en complément des données à moyenne résolution, un recours à des données de télédétection à haute résolution spatiale ce qui nécessiterait de mettre en œuvre une procédure spécifique de combinaison de données d'échelle différentes.

Bien que des tests et des protocoles de validation soient encore nécessaires, cette étude ainsi que les résultats publiés dans la littérature indiquent que des outils pour la surveillance générale des changements des forêts peuvent être développés sur la base de données MODIS.

L'utilisation de séries temporelles : un potentiel réel pour le suivi des changements d'état des forêts

L'exploitation d'images de télédétection à haute répétitivité temporelle présente un grand intérêt pour la caractérisation et le suivi de la phénologie des peuplements forestiers à une échelle régionale. L'accès à des informations sur la phénologie nécessite de disposer d'observations acquises à des dates très proches, sur toute la période de végétation. La dimension spatiale de ces images répond bien au besoin d'analyse à échelle régio-

nale pour une vision globale des impacts et de devenir des peuplements. C'est bien sûr cette double composante « **spatiale** » et « **temporelle** » des séries d'images utilisées que se basent les développements de modèles régionaux, dont cette étude fait partie.

Les développements en cours dans ce domaine visent à transformer les informations issues des images en indicateurs d'état et du comportement de la végétation, pour repérer des dégâts ou des changements de phénologie, et à caractériser leurs tendances d'évolution temporelle. Il s'agit, d'une part, de mesurer des anomalies que l'on peut assimiler aux « effets immédiats » d'une perturbation environnementale (crise sanitaire, effet sécheresse...) et, d'autre part, d'approcher les « effets retardés » d'une perturbation sur un pas de temps pluriannuel : tendance à la dégradation continue de l'état de vigueur des peuplements et à l'amplification des dégâts ou, au contraire, à une récupération progressive. Il existe désormais des outils de modélisation des séries temporelles de type STL, BFast [Verbesselt *et al.*, 2010] permettant de qualifier les tendances d'évolution du comportement saisonnier des peuplements en réponse aux facteurs du milieu, et que l'on pourra appliquer à ce type d'analyse. Ces travaux sur le suivi phénologique s'inscrivent dans le développement d'outils adaptés à la veille et au repérage des situations à risque, en anticipation de possibles déplacements d'aire potentielle des essences résineuses sous l'influence du changement climatique. En combinant les résultats de télédétection avec des données descriptives des conditions d'environnement et de station, ils contribuent à fournir des éléments de caractérisation de la vulnérabilité des forêts et du devenir des peuplements.

Véronique CHÉRET

Jean-Philippe DENUX

Laboratoire de Télédétection et
Gestion des Territoires
École d'Ingénieurs de Purpan,
Toulouse

Christelle GACHERIEU

ONF, agence de Castres
Unité spécialisée aménagement

Jean-Pierre ORTISSET

CRPF Midi-Pyrénées

Bibliographie

CRPF Midi-Pyrénées, ONF, EI-PURPAN, 2008. Dépérissement des reboisements du Sud Massif Central - État des lieux et propositions d'analyse, 2ème tranche - Départements de l'Aveyron et du Tarn, Rapport de fin d'étude, 43 p.

Deshayes M., Guyon D., Jeanjean H., Stach N., Jolly A., Hagolle O., 2006. The contribution of remote sensing to the assessment of drought effects in forest ecosystems, *Ann. For. Sci.*, vol. 63 pp.579-595

Eklundh L., Johansson T., Solberg S., 2009. Mapping insect defoliation in Scots pine with MODIS time-series data, *Remote Sensing of Environment* vol. 113, pp. 1566 - 1573

Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, vol.83, pp. 195-213

Jackson R.B., Lechowicz M.J., Li X., Mooney H.A., 2001. The roles of phenology, growth, and allocation in global terrestrial productivity. *In Terrestrial Global Productivity : Past, Present and Future*, edited by H.A. Mooney, and J. Roy, Academic Press. pp. 61-82

Morin N., Jolly A., Legay M., Kochert T., 2007. Operational prospects in the use of remote sensing for the monitoring of forest decline potentially related to climate change, *In Proceedings of the ForestSat'07 International Conference: spatial operational tools for forestry*, Montpellier (France), 7p.

Moulin S., Kergoat L., Viovy N., Dedieu G., 1997. Global-scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR satellite measurements, *Journal of Climate*, vol. 10, pp. 1154-1170

Pauly H., 2006. Résultats 2005 du réseau complémentaire canicule, Bilan de la santé des forêts en 2005. Ministère de l'agriculture et de la pêche, Département de la santé des forêts. 9 p.

Rebetez M., Mayer H., Dupont O., Schindler D., Gartner K., Kropp J.P., Menzel A., 2006. Heat and drought 2003 in Europe : a climate synthesis, *Ann. For. Sci.*, vol. 63, pp. 569-577

Reed B.C., 2006. Trend analysis of time series phenology of North America derived from satellite data, *GIScience & Remote Sensing of Environment*, vol.43 n°1, pp. 1-15

Solberg S., Eklundh L., Gjertsen A.K., Johansson T., Joyce S., Lange H., Naesset E., Olsson H., Pang Y., Solberg A., 2007. Testing remote sensing techniques for monitoring large scale insect defoliation, *In Proceedings of the ForestSat'07 International Conference: spatial operational tools for forestry*, Montpellier (France), 5p.

Verbesselt J., Hyndman R., Newnham G., Culvenor D., 2010. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series, *Remote Sensing of Environment*, vo. 114 n°1, pp. 106-115