

c'est-à-dire pour mesurer les différences génétiques, adaptatives, de sensibilité au dépérissement entre individus. Cependant, on constate une forte liaison entre les pertes de croissance du chêne pédonculé lors de l'attaque de bombyx et le type de station dans lequel il pousse (tabl. 9) : dans les milieux sableux secs ou hydromorphes, cette espèce a connu de fortes baisses de croissance en 1994, alors que dans les milieux à marne proche de la surface, les pertes (et les mortalités) sont beaucoup plus limitées. Le chêne sessile montre pour sa part des baisses de croissance indépendantes du type stationnel.

En ce qui concerne le facteur sylvicole, notre étude dendrochronologique n'a porté que sur des arbres dominants ou codominants et ne permet donc pas vraiment de tester son rôle. Dans une étude complémentaire, dont les résultats seront présentés dans un *Cahier du DSF* consacré au dépérissement du chêne en forêt de Haguenau, l'influence bénéfique de houppiers bien développés sur les chances de survie après les défoliations a par contre clairement été mise en évidence.

En conclusion, l'épisode de dépérissement de 1993-94 correspond, en forêt de Haguenau, aux pertes de croissance les plus importantes enregistrées au cours de ces dernières décennies. L'étude dendrochronologique démontre le fort impact négatif du bombyx sur la croissance radiale. Elle montre aussi que c'est très probablement par l'arrêt de la fabrication des réserves hivernales nécessaires à la mise en place du bois initial au printemps, que les défoliations conduisent, après une ou deux années, à des mortalités importantes. Enfin, elle prouve le rôle très important de facteurs prédisposants, souvent anciens, dans la mortalité au cours de cet épisode de dépérissement. Ces facteurs sont en partie stationnels pour le chêne pédonculé, ce qui n'est pas le cas pour le chêne sessile, pour lequel la variabilité génétique individuelle pourrait être plus importante. La nécessité de restreindre l'aire du chêne pédonculé à son milieu de croissance optimal est ainsi à nouveau souligné •

UTILISATION DES IMAGES SATELLITALES POUR L'OBSERVATION DES DÉFOLIATIONS DUES AU BOMBYX DISPARATE EN FORÊT DE HAGUENAU

Michel Deshayes et Nicolas Stach, Cemagref-ENGREF, Montpellier ; Claude-Bernard Malphettes, Cemagref, Nogent-sur-Vernisson



Use of satellite images for the observation of defoliation by gypsy moth in the forest of Haguenau - Alsacian oak stands sustained serious defoliation by the gypsy moth Lymantria dispar L. in 1993 and 1994. A study was carried out by the Cemagref / ENGREF laboratory of remote sensing to test if satellite images could be used to map this defoliation in the forest of Haguenau. Images from the Landsat TM and SPOT satellites (optical domain: visible and infrared data), and from the ERS2 satellite (microwave domain: radar data) were used. After preliminary geometric and radiometric processing, the computation of difference-images or ratio-images and the definition of significant thresholds allowed us to map different categories of radiometric changes and to compare them with the defoliation observed in the field. The detection of heavily defoliated areas using optical data (Landsat or SPOT images) is relatively reliable (70 to 80 % of the pixels classified correctly), whereas the detection of slightly defoliated areas and the use of radar data proved to be less efficient.

Les chênaies alsaciennes ont subi en 1993 et 1994 des défoliations de grande ampleur dues au bombyx disparate (Nageleisen et al., 1996). Une étude confiée au Laboratoire Commun de Télédétection Cemagref-ENGREF a eu pour objectif de tester l'intérêt de l'utilisation des images satellitales pour la cartographie de ces défoliations en forêt indivise de Haguenau. Elle s'est pour cela appuyée sur des observations de terrain réalisées par le DSF et l'ONF pendant la durée de la pullulation. Ces observations de terrain, intégrées dans un Système d'Information Géographique géré par l'ONF, indiquaient pour chaque

année d'attaque l'intensité des défoliations à l'échelle de la sous-parcelle (en moyenne 5 ha).

Des images des satellites Landsat TM et SPOT (données du visible et de l'infrarouge) et du satellite ERS2 (données radar) ont été utilisées

Les données satellitales de deux domaines différents du spectre électromagnétique ont été utilisées : domaine de l'optique (visible et infrarouge) et domaine des micro-ondes (ou radar). Dans le domaine de l'optique, les images utilisées provenaient d'une part du satellite Landsat TM, présentant une résolution de 30 m pour 6 bandes spectrales (bleu, vert, rouge, proche infrarouge et deux canaux dans le moyen infrarouge) et d'autre part du satellite SPOT présentant une résolution de 20 m pour 3 bandes spectrales (vert, rouge et proche infrarouge). Les données radar étaient celles du satellite ERS2 (bande C, 6 cm de longueur d'onde ; 12,5 m de résolution).

La méthode employée consiste à détecter des changements en comparant les images des années d'attaque à une image de référence prise avant attaque (Durrieu et Deshayes, 1994). Elle se déroule en 5 étapes principales :

1. prétraitements géométriques et radiométriques des images, normalisation relative (domaine de l'optique uniquement) ;
2. calcul des images-différences : différence canal à canal et pixel à pixel entre la radiométrie de l'image de référence et celle de l'année d'attaque dans le cas des données de l'optique ; calcul d'une image-ratio dans le cas des données radar ;
3. analyse des évolutions radiométriques et définition d'un seuil de changement significatif ;
4. seuillage des images-différences ou des images-ratios, et cartographie des changements ;
5. validation par confrontation avec les données de terrain.

Des prétraitements géométriques et radiométriques et une première analyse visuelle des images

Les prétraitements géométriques visent à rendre les images superposables entre elles et à les projeter dans un référentiel cartographique.

Nageleisen L.-M., Geldreich P., Thomassin J.-P. (1996). Des mortalités soudaines et importantes de chênes en Alsace du Nord : impact du bombyx disparate sur des peuplements affaiblis ? *Les Cahiers du DSF*, 1-1996 (La Santé des Forêts [France] en 1995), Min. Agri., Pêche (DERF) Paris, pp. 24-26.

— Une série d'amers (points de repère) ont été saisis sur les différentes images et repérés sur des cartes IGN 1/25 000. Un modèle polynomial de passage entre les coordonnées images et les coordonnées cartographiques a été calculé à partir des coordonnées de ces points dans chaque référentiel. Dans tous les cas, l'erreur résiduelle moyenne obtenue était inférieure à la taille du pixel (20 ou 30 m).

Par ailleurs, un prétraitement radiométrique à base de filtres adaptés a été appliqué aux images Landsat afin d'atténuer le bruit périodique en ligne qui les affecte (Crippen, 1989). De plus, dans le domaine de l'optique, les radiométries mesurées par les capteurs satellitaires sont influencées par la composition de l'atmosphère. Afin de limiter ces effets atmosphériques, les images ont fait l'objet d'une normalisation relative. Pour chaque capteur (Landsat ou SPOT) et chaque canal, une date a été prise comme référence et les canaux des autres dates ont subi une transformation linéaire utilisant les coefficients de la régression entre la radiométrie des pixels inchangés mesurée à la dite date et celle mesurée à la date de référence.

Les images radar sont quant à elles affectées par un bruit systématique (speckle) inhérent à leur mode d'émission/réception. Ce bruit peut être atténué par des filtres spatiaux et temporels, spécialement conçus pour préserver la dynamique spatiale et temporelle des images (Lopez *et al.*, 1993). Cependant, l'amélioration de la radiométrie des images est limitée par le faible nombre d'images disponibles dans le cas du filtrage temporel, et par la dégradation de la résolution qui en résulte dans le cas du filtrage spatial.

Ces traitements achevés, une première analyse visuelle des images a pu être faite. La figure 51 illustre la manifestation radiométrique des défoliations. Les changements de couleur ou de luminosité entre les images acquises avant et après les défoliations traduisent :

- une augmentation de la radiométrie dans le visible (SPOT : canaux XS1 et XS2, et Landsat : TM3),
- une augmentation dans le moyen infrarouge (TM5 pour Landsat, absent sur SPOT1 à 3 - mais présent sur SPOT 4 lancé au printemps 1998),
- une diminution de la radiométrie dans le proche infrarouge (SPOT : XS3, et Landsat : TM4),

- une augmentation de la rétrodiffusion des images radar.

Le calcul d'images-différences ou d'images-ratios, et la définition de seuils de changements significatifs, permettent de cartographier différentes classes d'évolution radiométrique et de les confronter aux défoliations notées sur le terrain

Afin de quantifier ces évolutions radiométriques, des images-différences ou images-ratios sont calculées respectivement pour les données du domaine de l'optique et les données radar. Ces images sont calculées comme la différence (ou le ratio) pixel à pixel entre les images des années d'attaque et les images de référence. Les signatures radiométriques des différentes sous-parcelles dans ces images-différences (ou images-ratios) ont été extraites par l'intermédiaire du SIG et analysées en fonction de l'intensité des défoliations. Cette analyse a abouti à la définition de seuils de changements significatifs de la radiométrie.

Dans le cas des données radar, la précision radiométrique atteinte à l'issue du filtrage, insuffisante pour pouvoir détecter les changements pixel à pixel, a conduit à un seuillage sur la base de la radiométrie moyenne de chaque sous-parcelle. Seules deux classes d'évolution

radiométrique ont été considérées : sous-parcelle inchangée ou défoliée.

Dans le domaine de l'optique, deux seuils ont été définis pour chacune des bandes spectrales : un seuil d'évolution radiométrique légère et un seuil d'évolution radiométrique forte. Par la suite, trois grandes catégories de comportement radiométrique des pixels ont pu être identifiées :

- la première catégorie (C0) est constituée de pixels présentant une évolution radiométrique nulle dans tous les canaux, ou une évolution radiométrique faible dans un seul canal ;
- la seconde catégorie (C1) est constituée de pixels présentant une évolution radiométrique faible dans au moins deux bandes spectrales ;
- la dernière catégorie (C2) est constituée de pixels présentant une évolution radiométrique forte dans au moins une bande spectrale.

Ces différentes classes d'évolution radiométrique ont été cartographiées et intégrées dans le SIG afin de les confronter aux données de terrain. La figure 52 compare les cartes des défoliations issues des relevés de terrain et les cartes des évolutions radiométriques issues du seuillage des images-différences Landsat .

La télédétection des zones fortement défoliées à l'aide des données optiques

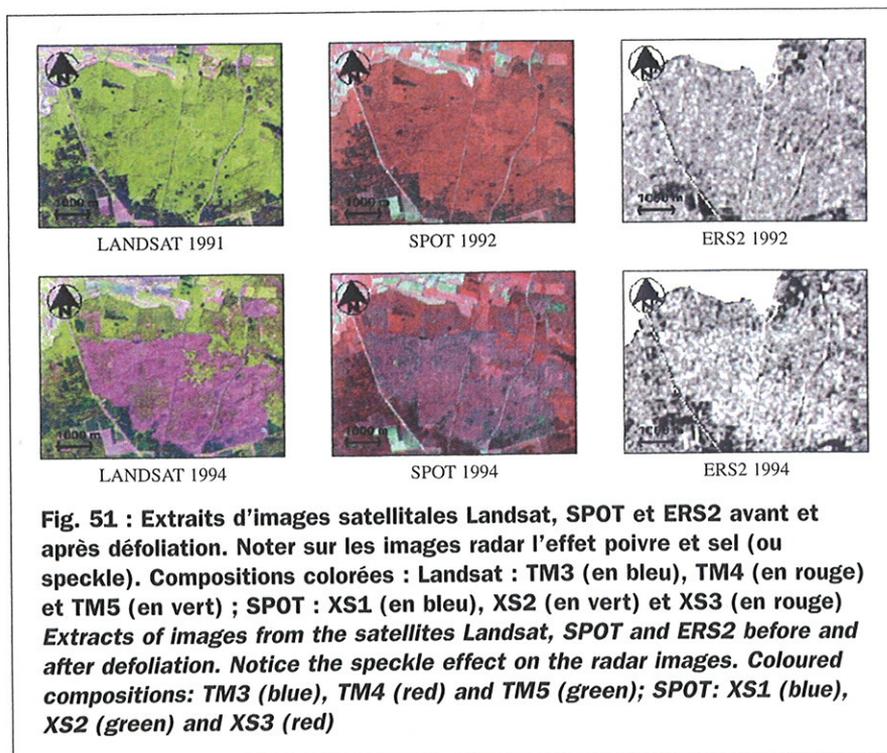


Fig. 51 : Extraits d'images satellitaires Landsat, SPOT et ERS2 avant et après défoliation. Noter sur les images radar l'effet poivre et sel (ou speckle). Compositions colorées : Landsat : TM3 (en bleu), TM4 (en rouge) et TM5 (en vert) ; SPOT : XS1 (en bleu), XS2 (en vert) et XS3 (en rouge)
Extracts of images from the satellites Landsat, SPOT and ERS2 before and after defoliation. Notice the speckle effect on the radar images. Coloured compositions: TM3 (blue), TM4 (red) and TM5 (green); SPOT: XS1 (blue), XS2 (green) and XS3 (red)

(images Landsat ou SPOT) est relativement fiable, alors que la détection des parcelles faiblement défoliées s'avère plus délicate et que les données radar sont plus difficiles à utiliser

La figure 52 illustre la bonne correspondance entre les données de terrain et le résultat des traitements des images Landsat. Des résultats comparables, quoique légèrement différents, ont été obtenus avec les données SPOT. Les différences observées entre ces deux types de capteur sont en partie liées à leurs caractéristiques différentes (résolution, bandes spectrales), mais également au fait que les images des deux capteurs n'ont pas été prises simultanément, alors que la situation évolue très rapidement sur le terrain.

Une validation plus quantitative des résultats a révélé que la détection des zones fortement défoliées était relativement fiable (70 % à 80 % de pixels bien classés), et que les erreurs de commission, ou fausses alertes, étaient assez restreintes (15 à 25 %). Par contre, la détection des parcelles faiblement défoliées s'est avérée plus délicate. En ce qui concerne les données radar, leur sensibilité aux défoliations a pu être confirmée dans le cadre de cette étude. Par contre, la faible amplitude des changements radiométriques observés, associée à une précision radiométrique médiocre, limite les possibilités d'utilisation de ces données à des fins opérationnelles.

Les écarts constatés entre les observations de terrain et les résultats du traitement des données satellitaires peuvent trouver plusieurs explications. Tout d'abord, ces deux types d'observations utilisent un point de vue différent (par le haut ou par le bas) et correspondent à des échelles différentes (la sous-parcelle, 5 ha, et le pixel, 4 à 9 ares). Par ailleurs, la notation sur le terrain présente des limites : elle n'a concerné que les parcelles à objectif chêne, alors que le chêne peut être présent dans le sous-étage ou comme essence secondaire et peut dans ces cas-là subir des défoliations qui seraient perçues par le satellite. De plus, les observations sur le terrain nécessitent une certaine durée, pendant laquelle l'état des défoliations peut évoluer. De même, un certain nombre d'erreurs sont à imputer aux données satellitaires : décalages géométriques résiduels ou confusion des zones défoliées avec d'autres types d'événements affectant l'indice foliaire (coupes, éclaircies...) ou la réflectance du sol (travail du sol, traitements phytocides...).

Malgré ces différences, cette étude a démontré l'intérêt des données optiques (Landsat ou SPOT) de la télédétection pour la cartographie de défoliations et a amené la DERF à confier au LCT une seconde étude visant à appliquer, en l'absence de données de terrain et à une échelle plus importante, les mêmes méthodes à la cartographie des défoliations dans la région Centre-Ouest (cf. rubrique "projets" ci-après) •

Cette étude a été financée par la Direction de l'Espace Rural et de la Forêt.

- Durrieu S., Deshayes M. (1994). Méthode de comparaison d'images satellitaires pour la détection des changements en milieu forestier ; application aux Monts de Lacaune (Tarn, France). *Ann. Sci. For.* 51, pp. 147-161.
- Crippen R. E. (1989). A simple spatial filtering routine for the cosmetic removal of scan-line noise from Landsat TM P-tape imagery. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, vol. 55, pp. 327-331.
- Lopez A., Nezy E., Touzi E., Laur H. (1993). Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images. *Int. Journ. Remote Sensing*, vol. 14, pp. 1735-1758.
- Nageleisen L.-M., Geldreich P., Thomassin J.-P. (1996). Des mortalités soudaines et importantes de chênes en Alsace du Nord : impact du bombyx disparate sur des peuplements affaiblis ? *Les cahiers du DSF*, 1-1996 (La santé des forêts [France] en 1995), Min. Agri., Pêche (DERF) Paris, pp. 24-26.

DÉVELOPPEMENT DES RACES E4 DE MELAMPSORA LARICI-POPULINA DE 1994 À 1997 EN FRANCE

Jean Pinon et Pascal Frey, INRA Nancy



Spread of E4 pathotypes of Melampsora larici-populina between 1994 and 1997 in France - Just after their discovery in Belgium, E4 pathotypes of M. larici-populina kleb. were found in 1994 at very low frequency in the north of France. Such pathotypes have broken down the resistance of poplar cultivars like Beaupré, Boelare, Donk, Dorskamp, Flevo and Ghoy, Beaupré being widely cultivated. During the following years, the pathotypes spread and in 1996 all the important areas for poplar cultivation were contaminated. In 1997, a severe outbreak was observed in the northern and eastern parts of the country, especially in places where larch allowed the fungus to complete its cycle. According to their virulence, E4 isolates fell into four pathotypes, one combining six of the seven known virulences. Extensive use of cultivars especially susceptible to E4 pathotypes, and the ability to overwinter and alternate, are the main factors involved in the development of the epidemic.

Plusieurs cultivars de peuplier (voir fig. 53 la carte de répartition du peuplier en France) ont été sélectionnés dans des pays voisins pour une résistance complète à la rouille provoquée par *Melampsora larici-populina* Kleb.. Comme cela était connu depuis longtemps en agriculture, les agents de rouille sont susceptibles d'évoluer rapidement et de contourner les résistances complètes. Ce

