

# EVALUATION DE DEGATS DE TEMPETE A L'ECHELLE INFRA-PARCELLAIRE A PARTIR D'UNE IMAGE PLEIADES A TRES HAUTE RESOLUTION SUR UN MASSIF FORESTIER FEUILLU EN FRANCE

Anne Jolly<sup>1</sup>, Edouard Dapoigny<sup>1</sup>, Jean-Pierre Renaud<sup>1</sup>, Mehdi Ladjal<sup>1</sup>,  
1: Office National des Forêts – Département R&D - Nancy - France, anne.jolly@onf.fr

## Résumé

Les tempêtes constituent la source majeure de perturbation des peuplements forestiers et l'évaluation rapide des dégâts est un défi important pour les gestionnaires forestiers. Nous avons étudié le potentiel d'une image Pléiades pour évaluer et cartographier les dégâts causés par une tempête sur un massif forestier de plaine en juin 2012. La méthode mise en œuvre repose sur la comparaison de deux segmentations et classifications indépendantes, avant et après tempête, pour détecter la perte de couvert forestier. On procède d'abord à une segmentation sous eCognition® puis à une classification supervisée par méthode des forêts aléatoires. La référence avant tempête est constituée par l'orthophotoplan départemental BDOrtho® de l'institut Géographique National, l'image après tempête étant une image Pléiades. La carte des dégâts obtenue est globalement satisfaisante (précision globale 70%, kappa 62.5%), avec une bonne détection des dégâts massifs. Les dégâts diffus sont moins bien détectés et on observe des confusions entre les zones de dégâts et les peuplements résineux indemnes. Malgré ces limitations, une telle carte, sous réserve que l'image puisse être obtenue et traitée rapidement peut constituer une aide efficace pour la gestion de la crise.

**Mots-clés :** forêt, tempête, image optique, très haute résolution spatiale, Pléiades, détection de changements, segmentation, forêts aléatoires

## Abstract

*Storms are the major source of disturbance of forest stands. Rapid damage assessment is an important challenge for forest managers. We studied the potential of Pleiades images to assess and map the damages caused by a storm on a lowland forest in June 2012. The method is based on a comparison between two independent segmentations and classifications - before and after the storm - to detect the loss of forest cover: We first perform a segmentation using eCognition®, and then a supervised classification with the random forest algorithm. The before-storm reference is the departmental orthophotoplan BDOrtho® of the French National Geographic Institute, the after-storm image being a Pleiades image. The resulting damage map is satisfactory (overall accuracy 70%, kappa 62.5%), with a good detection of heavy damages. The detection of diffuse damages is worse and we noticed confusions between damages and undisturbed coniferous stands. Despite these limitations, such a map, provided that the image can be obtained and processed promptly can be an effective help for crisis management.*

**Keywords:** forest, windstorm, optical image, very high spatial resolution, Pléiades, change detection, segmentation, random forests

## 1. Introduction

Les tempêtes sont à l'origine de plus de 50% des dégâts d'origine catastrophique affectant les forêts européennes, toutes causes confondues (Gardiner *et al.*, 2010). Lors de tels événements, les gestionnaires forestiers ont d'abord besoin d'une évaluation sommaire des dégâts, puis d'une analyse plus détaillée de l'impact, pour préparer l'exploitation des arbres touchés et la reconstitution des peuplements. Lors de ces différentes étapes, le recours à la télédétection peut alors être une méthode alternative ou complémentaire aux évaluations de terrain.

De nombreuses études ont été réalisées sur l'utilisation de la télédétection pour évaluer des dégâts de tempête, notamment à partir de données optiques. (Wang *et al.*, 2010) utilisent des images hémométriques à très forte répétitivité (MODIS) pour une évaluation rapide et sommaire des zones impactées par un ouragan. Pour l'évaluation à l'intérieur des massifs voire des parcelles, le recours à des données de résolution décimétrique a été testé avec succès dans de nombreux cas (Baumann *et al.*, 2014 ; Nelson *et al.*, 2009 ; Stach et Deshayes, 2009 ; Meyer *et al.*, 2001). Cependant l'évaluation de dégâts diffus tels des bouquets de quelques arbres renversés ou cassés reste délicate (Stach et Deshayes, 2009 ; Chehata *et al.*, 2014).

Les données à résolution métrique offrent de nouvelles potentialités pour analyser les perturbations du couvert.

Ainsi, (Elatawneh *et al.*, 2014) utilisent des données RapidEye acquises à différentes dates de l'année pour mettre à jour la carte forestière et détecter la diminution brutale du couvert forestier. (Rich *et al.*, 2010) utilisent une image Ikonos, couplée à des relevés de terrain pour évaluer l'intensité des dégâts sur une forêt boréale. (Chehata *et al.*, 2014) exploitent le lien entre irrégularisation du couvert causé par la tempête et augmentation de l'irrégularité de la texture des images Formosat, sur des plantations de pin maritime pur.

La détection des dégâts repose le plus souvent sur l'analyse des changements entre images acquises avant et après tempête à des saisons proches (Nelson *et al.*, 2009 ; Chehata *et al.*, 2014). Certains auteurs valorisent des séries temporelles longues (Baumann *et al.*, 2014), pour retracer l'historique des peuplements forestiers et de leurs perturbations, notamment les tempêtes.

Enfin, la finesse de l'information des images à résolution métrique ou infra-métrique peut permettre de détecter, à partir d'une seule image acquise après tempête, les altérations du couvert causées par des coupes ou des dégâts de tempêtes (Rich *et al.*, 2010).

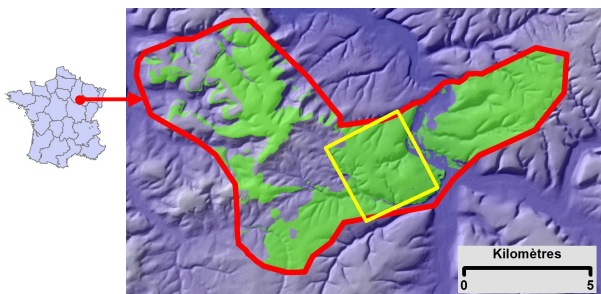
Sur les images à très haute résolution spatiale, la segmentation de l'image en « objets d'image » permet de caractériser des éléments en tenant compte de leur caractéristiques spectrales moyennes et de leur hétérogénéité interne (Blaschke, 2010). Différentes méthodes ont été développées pour analyser les changements sur des images à très haute résolution spatiale (Chen *et al.*, 2012 ; Hussain *et al.*, 2013) : combinaison de segmentation avant et après tempête (Chehata *et al.*, 2014), segmentation multitemps utilisant simultanément les données avant et après tempête (Desclée *et al.*, 2006), comparaison d'objets issus de segmentation et de classifications indépendantes réalisées à deux dates différentes (Blaschke, 2005).

Dans notre projet, nous avons utilisé le potentiel du satellite Pléiades pour quantifier et cartographier les dégâts d'une tempête localisée, sur le massif de Clairvaux en France. Cette étude, intégrée dans le programme de Recette Thématique Utilisateur (RTU) préparatoire à l'utilisation des données Pléiades du CNES, a été réalisée dans une perspective d'utilisation ultérieure opérationnelle, en s'appuyant sur les compétences existantes sur des outils et méthodes déjà disponibles dans notre établissement. Ce projet fait suite à des travaux précédemment réalisés à l'ONF (Bouallegue *et al.*, 2010).

## 2. Site d'étude et données utilisées

### 2.1. Secteur forestier concerné

Le site d'étude couvre une zone de 70 km<sup>2</sup>, dans le Nord-Est de la France (figure 1). C'est un secteur de plaine, avec une topographie peu accidentée, sillonnée de vallons, d'altitude peu élevée (entre 200 et 370 mètres), avec des pentes très faibles, sauf dans les vallons, où elles peuvent atteindre localement plus de 40 %. Les principales essences forestières présentes sont le hêtre (*Fagus sylvatica*) et les chênes sessiles et pédonculés (*Quercus petraea*, *Quercus robur*). Quelques plantations de résineux sont également présentes (épicéas, sapins et pins).



**Figure 1 :** site d'étude et emprise des données utilisées. Coordonnées du centre de la zone : lat=48°16' N , long=4°75' E. En rouge = limites de l'image Pléiades de 2012, en jaune : emprise des photos aériennes à 20cm après tempête. Fond de carte = BDAlti® IGN.

Le secteur a été touché le 07 juin 2012 par un phénomène orageux très violent, (Observatoire Français des Tornades et Orages Violents 2012), avec des rafales de vent à 140 km/h et de fortes chutes de grêle très localisées.

A la suite de la tempête, différents types de dégâts ont été observés, certains très massifs et affectant des

parcelles entières, d'autres plus localisés. Dans la partie Nord-Ouest, les chablis (arbres renversés) sont diffus et peu nombreux, mais les chutes de grêle et le vent ont causé d'importants dégâts aux houppiers (feuillage lacéré, branches cassées).

## 2.2. Données utilisées

### 2.2.1. Données avant tempête

La référence de l'état du couvert avant tempête est la BDOrtho® IGN (orthophoplan départemental de l'Institut Géographique National, à 50cm de résolution spatiale (IGN 2011a), couramment utilisé à l'ONF. Nous avons utilisé la version Infrarouge couleurs (IRC) à 3 bandes spectrales (Vert, Rouge, Proche Infrarouge), issue d'une prise de vue réalisée en 2009. Nous avons également utilisé les limites de parcelles et unités de gestion du référentiel de gestion de l'ONF, ainsi que la couche « végétation » de la BDTopo® de l'IGN (IGN 2011b).

### 2.2.2. Données après tempête

- Image Pléiades

Une image du satellite Pléiades 1B exempte de nuages a été acquise le 19 août 2012, en visée quasi-verticale (angle d'incidence au centre= 13,06°). L'image finale livrée est une donnée multispectrale à 4 bandes: bleu (430 – 550 nm), vert (500 – 620 nm), rouge (590 – 710 nm) et proche Infrarouge (740 – 940 nm), à 50 cm de résolution spatiale après fusion P+XS et ré-échantillonnage<sup>1</sup>. L'image a été orthorectifiée avant livraison, en utilisant la BDOrtho® 2009 comme référence (IGN 2013). Les deux données avant et après tempête sont donc géométriquement cohérentes entre elles.

L'observation de l'image a permis de montrer que certains dégâts massifs sur les peuplements étaient aisément visibles (Figure 2).



**Figure 2 :** exemples de types de dommages visibles sur l'image Pléiades du 19 août 2012 : **A** = zone de dégâts massifs avec arbres renversés. **B** = zone peu ou pas touchée. Les points blancs correspondent aux souches des arbres renversés.

Nous avons complété les canaux d'origine en calculant l'indice de végétation normalisé NDVI, ainsi que les ratios proche IR / Rouge et proche IR / Vert<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> La résolution d'origine des données Pléiades étant de 2,80 m en multispectral et 0,70m en panchromatique

<sup>2</sup> Nous utiliserons par simplification les termes « indice de végétation », « ratio PIR/R » et ratio « PIR/V », bien qu'il s'agisse de calculs réalisés à partir d'images non calibrées en radiométrie.

- Photographies aériennes à 20 cm de résolution  
Pour disposer de données de vérification, nous avons fait réaliser le 10 août 2012 une mission aérienne à 20cm de résolution spatiale, dans 4 bandes spectrales (bleu, vert, rouge et proche infrarouge), couvrant la partie centrale du secteur d'étude (cf figure 1). Les clichés ont été également orthorectifiés par rapport à la BDOrtho®.

- Relevés de terrain  
Des relevés de terrain ont été réalisés par les gestionnaires forestiers au cours du mois de juillet 2012, selon les procédures de l'Office National des Forêts (ONF 2003) pour la gestion des crises de type « chablis ». Il s'agit d'une évaluation des dégâts sur chaque parcelle, en 4 classes de pourcentage de volume de bois touché (pas de dégâts ; < 1/3 ; entre 1/3 et 2/3 ; > 2/3). Ces relevés comportent parfois un croquis réalisé à main levée sur fond de plan au 1 5 000 ou au 1 : 10 000.

### 3. Méthodologie

Notre méthode repose sur la comparaison de classifications supervisées réalisées indépendamment avant et après la tempête. Ce choix est justifié par (i) l'utilisation de données non corrigées radiométriquement (notamment la BDOrtho® qui résulte d'un assemblage de photographies aériennes, avec homogénéisation radiométrique sur l'ensemble de la mission aérienne départementale), et (ii) la possibilité offerte par cette méthode de disposer d'une information explicite sur les changements par comparaison d'état avant / après. S'agissant de données à résolution infra-métriques, avec une taille de pixel inférieure à celle des couronnes des arbres, nous avons choisi une analyse par segmentation d'image.

Les images ont été préalablement découpées selon l'occupation du sol « forêt / non forêt » issue de la BDTopo® IGN.

L'objectif final est d'estimer la perte de couvert arboré correspondant aux dégâts de tempête, donc de comparer une carte binaire du type « couvert arboré / autre » avant et après tempête. Cette classification a donc été réalisée en 3 étapes successives, selon trois niveaux de typologie emboîtés (tableau 1).

Un premier niveau de typologie tient compte de la diversité des peuplements forestiers du massif et des types de milieux non boisés. A ce premier niveau de typologie, nous avons également cherché à distinguer les ombres : d'une part les ombres portées par les arbres sur le sol, d'autre part les ombres à l'intérieur de la canopée elle-même.

Dans le cas de l'image Pléiades après tempête, nous avons également considéré une classe correspondant aux plages de dégâts massifs (chablis) visibles directement sur l'image (cf figure 2).

Le deuxième niveau de typologie a été effectué par regroupement des classes de niveau fin, pour distinguer les deux grands groupes d'essences : feuillus et résineux.

Enfin, le troisième niveau de typologie correspond à la différenciation entre couvert arboré et autres types de milieux.

NIVEAU 1	NIVEAU 2	NIVEAU 3
Feuillus Adultes 1	Feuillus	Couvert arboré
Feuillus Adultes 2		
Feuillus Jeunes		
Jeune Régénération de Feuillus		
Résineux Adultes 1	Résineux	
Résineux Adultes 2		
Ombres dans la canopée	Ombres / canopée	
Ombres sur le sol	Non arboré	Non arboré
Prairie, Pelouse		
Sol nu		
Routes et infrastructures		
Dégâts massifs visibles sur l'image Pléiades 2012	Dégâts massifs	Dégâts massifs

**Tableau 1** : typologie des classifications successives des images avant et après tempête.

#### 3.1. Classification avant et après tempête

Chaque image a été traitée indépendamment en plusieurs étapes : a) segmentation de l'image b) sélection d'échantillons d'apprentissage, c) choix des variables pertinentes pour réaliser la classification d) classification et évaluation de la classification.

##### a) segmentation des images avant et après tempête :

La segmentation a été réalisée sous eCognition®, V8.7 sans pondération par « multirésolution » qui minimise l'hétérogénéité de chaque objet et maximise l'hétérogénéité entre objets (*scale = 30, shape = 0.1 ; compactness = 0.9*). Le choix des paramètres a été fait par essais successifs et évaluation visuelle.

##### b) échantillons d'apprentissage pour la classification

Sur chacune des deux images, nous avons sélectionné 30 segments pour chaque classe de la typologie de 1<sup>er</sup> niveau. L'affectation des échantillons à sa classe correspondante a été faite par interprétation visuelle, respectivement sur la BDOrtho® et sur l'image Pléiades, en s'aidant également des relevés de terrain réalisés par les gestionnaires forestiers.

Les variables descriptives (eCognition® 8.7) pour chaque échantillon correspondent à trois groupes: i) statistiques classiques (moyenne, écart-type, asymétrie) ; ii) indices de textures selon Haralick (Haralick *et al.*, 1973) sur la matrice de cooccurrence des niveaux de gris ; et iii) sur la matrice de différence des niveaux de gris. Nous avons ainsi 15 variables par canal ou néo-canal soit 90 variables pour la BDOrtho® (image à 3 canaux) avant tempête et 105 variables pour l'image Pléiades (image à 4 canaux).

##### c) choix des variables pour la classification :

Une sélection de variables suffisantes pour réaliser la classification a été réalisée en utilisant l'algorithme VSURF (Genuer *et al.*, 2010), qui utilise le principe des forêts aléatoires (*random forests*) (Breiman, 2001) en sélectionnant les variables en fonction d'un critère « d'importance ».

d) classification et évaluation de la classification :

La classification de l'ensemble des segments de l'image selon le premier niveau de typologie a été réalisée avec l'algorithme Random Forest (Package R-RandomForest), en utilisant les variables « de prédiction » issues de l'algorithme VSURF. L'affectation des classes de niveau 2 et 3 a ensuite été réalisée par agrégation des classes de premier niveau

L'évaluation des résultats a été faite sur un tirage aléatoire de 30 points dans chaque classe du 1<sup>er</sup> niveau de typologie. La vérification a été faite par photo-interprétation, de la BDOOrtho® 2009, des photos à 20 cm réalisées après tempête et également de la BDOOrtho® 2012 disponible au cours de l'étude.

Une matrice de confusion a ainsi été calculée pour le 1<sup>er</sup> niveau de typologie, puis les matrices correspondant aux 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> niveau ont été générées par regroupement des classes.

3.2. Mise en évidence des changements

La mise en évidence des changements a été faite après intersection des deux classifications de 3<sup>ème</sup> niveau. L'affectation d'une classe d'évolution pour chaque intersection a été faite par comparaison entre les classes (tableau 2). La disparition du couvert arboré pouvant également résulter de coupes sylvicoles réalisées au cours des 3 ans séparant les deux images, la classe correspondante a été désignée « dégât de tempête ou coupe ».

		APRES TEMPÊTE (Image Pléiades 2012)		
		Couvert arboré	Non arboré	Dégâts massifs
AVANT TEMPÊTE (BDOOrtho® 2009)	Couvert arboré	Couvert arboré stable	Dégâts ou coupe sylvicole	Dégâts massifs
	Non arboré	Régénération, reboisement	Milieu non arboré stable	Sans objet

**Tableau 2 :** affectation des classes d'évolution par comparaison des classes avant et après tempête.

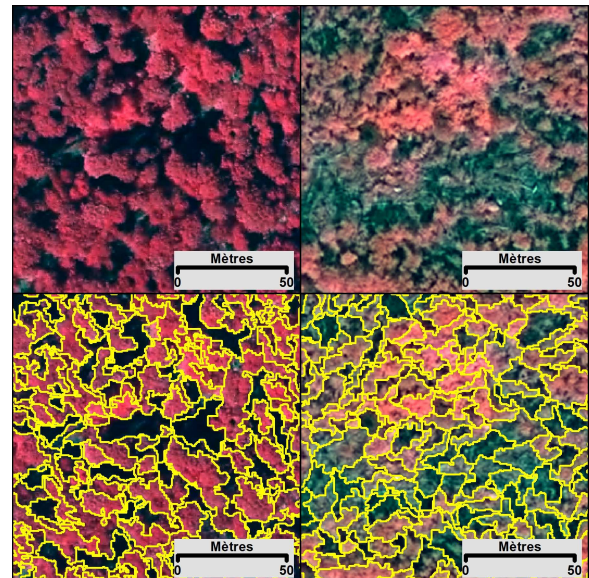
Comme précédemment, l'évaluation de la carte d'évolution a été réalisée par vérification de 30 points de contrôle tirés aléatoirement dans chacune des classes d'évolution, et contrôlé par interprétation de différentes données : avant tempête (BDOOrtho® 2009 et 2012) et après tempête (image Pléiades et photos à 20 cm), et en s'appuyant sur les relevés de terrain des gestionnaires forestiers.

**4. Résultats**

**4.1. Cartographie avant et après tempête**

a) segmentation :

La segmentation des images (figure 3) produit des objets de surface médiane de l'ordre de 100 à 135 m<sup>2</sup>. Les segments représentent soit des groupes de quelques arbres, soit des plages de peuplement homogènes de quelques centaines de m<sup>2</sup>, jusqu'à environ 3000 m<sup>2</sup>.



**Figure 3 :** segmentation des images (à gauche : BDOOrtho® 2009, à droite image Pléiades, 2012)

b) variables sélectionnées pour la classification

Pour chacune des deux images avant et après tempête, l'algorithme VSURF sélectionne un ensemble de 16 variables. Elles correspondent à deux groupes : (i) des variables statistiques sur les canaux d'origine des images, le NDVI ou les ratios PIR/R et (ii) des variables caractérisant l'hétérogénéité interne des objets : écart type de certains canaux, ainsi que des indices de texture.

d) qualité de la classification

La qualité de la classification est globalement satisfaisante ( $kappa \geq 60\%$ ), et augmente logiquement quand on fusionne les classes de niveaux fins pour aboutir à la classification de 3<sup>ème</sup> niveau correspondant à la différence entre le couvert arboré et les autres types de milieux (tableau 4). Pour les typologies 1 et 2, il existe toutefois des confusions entre les couverts de résineux et les ombres ; et surtout des confusions entre des zones de dégâts directement visibles sur l'image Pléiades et des zones de résineux indemnes. Ainsi, la classe « dégâts massifs » présente des erreurs importantes, tant en excédent (env. 33%) qu'en déficit (env. 46%)

	Avant tempête BDORTHO 2009		Après tempête Pléiades 2012	
	précision globale	kappa	précision globale	kappa
typologie 1	70 %	67 %	64 %	60 %
typologie 2	84 %	77 %	79 %	72 %
typologie 3	92 %	83 %	84 %	71 %

**Tableau 4 :** qualité de la classification pour les trois niveaux successifs de la typologie.

**4.2. Détection des changements**

La visualisation de la carte montre que les dégâts massifs sont bien délimités (figure 4), ainsi que certaines plages de dégâts isolés.

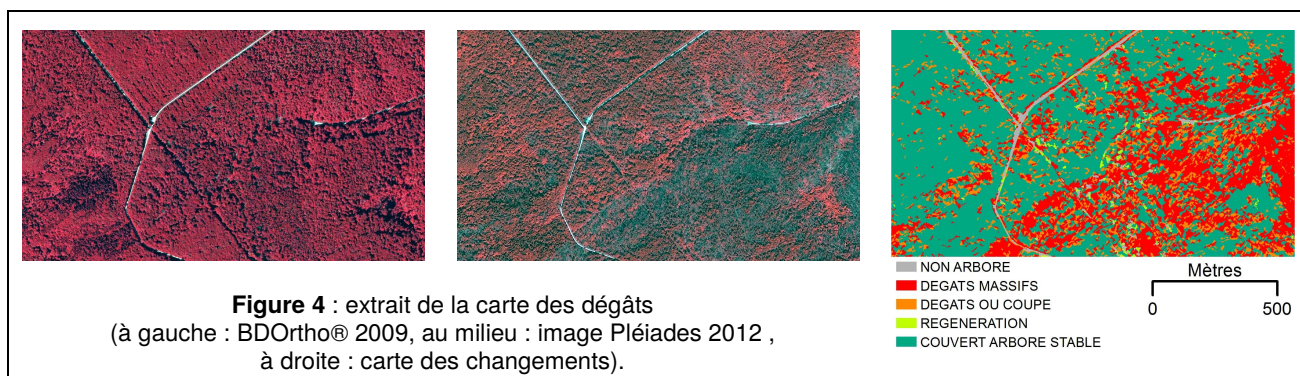
Le calcul des surfaces de chaque classe montre que la surface totale de couvert totalement détruit est de 775 ha sur les 4752 ha de couvert arboré avant tempête, ce qui représente 16,3% de couvert totalement détruit.

L'évaluation des résultats donne un taux de concordance global de 70% et un kappa de 62,5 %. Si les zones non forestières stables sont bien classées (avec des erreurs de déficit et d'excédent respectivement de l'ordre de 10 à 13%), l'évolution du couvert est moins bien identifiée. Ainsi, la détection de dégâts (classes « dégâts massifs » et « dégâts ou coupe sylvicole ») présentent des fortes erreurs de déficits (de 25 à 30%) mais aussi des erreurs d'excédent importantes (de 36 à 50%).

La simplification en une classification binaire « dégâts » et « autres », par regroupement des classes, donne un taux de concordance global de 83%, mais avec une

précision utilisateur pour la classe « tous dégâts » qui reste proche de 70%, donc avec de fortes erreurs d'excédent. Une bonne partie de ces erreurs provient de la confusion entre des zones de dégâts et des peuplements de résineux indemnes déjà constatée lors de la classification de l'image Pléiades après tempête.

L'identification de la classe « régénérations » correspondant à un accroissement local de couvert arboré, pose également problème, avec de forts excédents (env. 37%), mais de plus faibles déficits (env. 10%). L'interprétation de cette classe est discutable. En effet, on observe qu'une grande partie des zones ainsi classée « régénération » correspond souvent à des zones d'ombres sur la BDOOrtho® 2009 et classées « couvert non forestier » alors qu'elles sont éclairées sur l'image Pléiades et classées « couvert forestier ».



## 5. Discussion

La méthode de comparaison de classification avant et après tempête donne des résultats globalement satisfaisants à l'échelle du massif forestier, mais avec une tendance à surestimer les dégâts. La carte d'évolution ainsi obtenue est cohérente avec les relevés de terrain réalisés par les gestionnaires. Une comparaison précise n'est toutefois pas possible, les relevés de terrain ne comportant pas systématiquement d'information sur la localisation des dégâts à l'intérieur des parcelles.

Les résultats statistiques publiés par d'autres auteurs sont généralement meilleurs, y compris avec des données moins résolues, notamment Landsat. L'étude de (Nelson *et al.*, 2009) présente une précision globale supérieure à 90%, mais les auteurs ne détaillent pas la qualité de la détection de la classe « dégâts ». (Baumann *et al.*, 2014) obtiennent un taux de bonne détection supérieur à 75% sur deux sites d'études différents. (Stach et Deshayé, 2009) ont évalué la qualité de détection de dégâts de tempête sur divers sites, avec des données à résolution décimétriques (Landsat et Spot). Selon les types de peuplements et les données utilisées, leur méthode a conduit à des taux de bon classement des dégâts de 50 à 96%. Avec des données RapidEye (6.5m de résolution), d'autres auteurs, comme (Remelgado *et al.*, 2014) ont obtenu une précision utilisateur de 80%, avec une surface de cartographie minimale de 0,1 ha. Ils notent aussi une sous-estimation des dommages pour les dégâts diffus. Notre approche permet de détecter des plus petits dégâts (de l'ordre de 0,05 ha). Des polygones de

surface inférieure sont également mis en évidence, mais ils semblent présenter des erreurs de classement importantes, liées aux différences d'ombres entre les deux images. Nous n'avons pas pu analyser l'influence de la surface de la zone de dégât, la surface couverte par nos clichés aériens à 20cm utilisables comme référence pour cette analyse étant trop restreinte.

L'évaluation de la carte des dégâts montre des sur- ou sous-détections, avec des confusions entre peuplements de résineux indemnes et zones de dégâts. Ces confusions semblent liées à une apparence très « sombre » (faible luminance) des deux classes. Dans le cas des dégâts diffus, ceci peut s'expliquer par le fait que les petites plages de dégâts sont masquées par les ombres des peuplements adjacents indemnes. Mais cette réponse spectrale faible (dans tous les canaux de l'image Pléiades) se rencontre également pour les plages de dégâts massifs. Ceci pourrait s'expliquer par la très forte pluviométrie pendant tout le mois précédent l'acquisition de l'image, avec la présence de sols engorgés et une humidité de surface très importante, tant sur les sols forestiers que sur les houppiers tombés au sol. Une piste pour réduire cette confusion serait de réaliser une stratification préalable de la zone d'étude, soit à partir d'une segmentation plus grossière de l'image THRS avant tempête, soit en utilisant une image avant tempête moins résolue (5 – 10m), et de traiter ensuite séparément les peuplements résineux et les peuplements feuillus.

La méthode utilisée ne permet pas de séparer explicitement les coupes sylvicoles et les dégâts de tempête. Les régénérations étant peu nombreuses sur

ce massif qui a été très massivement régénéré à l'issue des dégâts de la tempête de 1999, nous n'avons en effet pas pu disposer d'échantillons de coupes sylvicoles suffisants pour intégrer ce type d'évolution dans l'analyse.

La nécessité de disposer d'échantillons d'apprentissage avant et après tempête constitue également une faiblesse de la méthode. En l'absence de possibilité de réalisation de relevés de terrain lors de telles crises, la saisie de ces échantillons est faite par photointerprétation, dont la qualité est dépendante de l'opérateur, mais également des données utilisées. Le développement de moyens d'observations légers comme les drones pourrait permettre de disposer rapidement et à coût acceptable de données à haute résolution sur une partie de la zone, qui pourraient être utilisés pour disposer d'échantillons d'apprentissage et/ou de validation. Toutefois, le développement d'une méthode automatique ou semi-automatique semble une piste plus intéressante dans un contexte opérationnel, avec des données de nature comparable avant et après tempête (Chehata *et al.*, 2014 ; Dees, 2014). En France métropolitaine, l'IGN envisage de réaliser une partie de la mise à jour de la BDOrtho® à partir d'images Pléiades, ce qui permettrait de disposer d'archives sur une partie du territoire, mobilisables lors de tels événements. D'autre part la mise en œuvre de la constellation formée par Pléiades 1A et 1B et Spot 6 et 7 augmentera la probabilité de disposer d'images à très haute résolution spatiale pour gérer ce type d'événement.

Les effets d'ombres, différents entre les images avant et après tempête acquises à des dates de l'année différentes causent des confusions difficiles à réduire. Ceci est d'autant plus marqué dans le cas de la BDOrtho®, issue d'assemblage de clichés aériens sur lesquels l'azimut et l'élévation solaire peuvent être variables au sein de la zone d'étude. De plus, il aurait été préférable de disposer d'une véritable image avant tempête, plutôt que d'un orthophotoplan.

L'image Pléiades, fusionnée et ré-échantillonnée à 50cm, permet bien de distinguer les zones de dégâts massifs, tant visuellement que lors du traitement d'image. En revanche, la distinction de dégâts diffus a été parfois délicate lors de la saisie des échantillons. La comparaison avec les clichés à 20cm montre qu'une résolution de l'ordre de 20 à 30 cm semble optimale pour ce type d'analyse. De même, il ne nous a pas été possible d'identifier les dégâts n'affectant que le feuillage ou une partie des houppiers.

Enfin, les données utilisées ici sont des données en 2D. Il serait intéressant d'envisager dans une telle analyse l'utilisation de modèles numériques de surface, issus notamment d'une acquisition stéréoscopique d'image à résolution infra-métrique, (Honkavaara *et al.*, 2013). La connaissance de la hauteur du couvert forestier permettrait peut-être de réduire les confusions observées entre les dégâts diffus et les zones « sombres » (résineux, ombres) sur les images. Mais la qualité de détection des dégâts est dépendante de la résolution des données et de la méthode de génération des MNS (Litkey *et al.*, 2013). De plus, la disponibilité rapide de données stéréoscopiques à très haute résolution spatiale reste limitée, y compris avec la nouvelle génération de satellites « agiles » capables d'acquérir des données stéréoscopiques.

## 6. Conclusions et perspectives opérationnelles

Lors de ce projet, nous avons mis au point une procédure permettant de cartographier les dégâts de tempête à l'échelle intra-parcellaire, compatible avec les besoins d'évaluation exprimés par les gestionnaires forestiers, qui peut être mise en œuvre rapidement par un opérateur formé (temps estimé en conditions opérationnelles : moins d'une dizaine de jours).

La cartographie des surfaces de dégâts semble fiable pour les dégâts massifs (en larges plages), mais insuffisante pour les dégâts diffus. Dans ce contexte, elle peut être utilisée par les gestionnaires pour identifier rapidement les zones de dégâts les plus importants et pour orienter les reconnaissances de terrain. Sans attendre la fin du traitement par un opérateur spécialisé, l'image brute, très aisément lisible grâce à sa résolution, peut également être directement utilisée par les gestionnaires pour documenter leurs relevés de terrain (utilisation comme fond de plan pour la description de terrain)

La carte des dégâts ainsi obtenue ne donne pas d'information sur les volumes de bois correspondants. Cette information pourrait être approchée par croisement avec des informations d'inventaires ou de description de parcelles antérieures, quand de telles informations existent.

Dans ce cas précis, la surface couverte étant relativement limitée, les moyens de terrain ont permis de réaliser la description des dégâts dans un délai très court (2 mois après la tempête). L'image Pléiades a été acquises environ 1.5 mois après la tempête (soit seulement 14 jours après l'ordre de programmation). L'apport de la télédétection n'aurait donc pas été déterminant ici. Mais dans le cas d'un phénomène de plus grande ampleur (de l'ordre de 150 à 200 km<sup>2</sup>), les moyens de terrain peuvent devenir rapidement insuffisants. Sous réserve de pouvoir disposer rapidement des données, l'imagerie résolution (infra)-métrique permet alors d'optimiser les relevés de terrain et de disposer d'une évaluation exhaustive sur le territoire touché, y compris dans les zones difficiles d'accès.

Dans un proche futur, le système Sentinel-2 fournira une couverture exhaustive du territoire, à résolution décimétrique et à haute fréquence. Il sera alors possible de disposer d'images d'archives et d'augmenter la probabilité d'avoir rapidement une image après tempête, pour réaliser rapidement une détection des dégâts massifs. Cette première évaluation pourrait ensuite être complétée avec des données à plus haute résolution, issues par exemple de la constellation Pléiades-Spot 6 et 7.

## Remerciements

**Source des images Pléiades :** © CNES 2012, distribution Airbus DS / Spot Image : image mise à disposition par le CNES dans le cadre de la Recette Thématique Utilisateurs (RTU) Pléiades.

Tous nos remerciements à l'équipe ORFEO du CNES, pour avoir accepté ce projet et programmé très rapidement l'acquisition des données et à l'équipe de l'Agence ONF Aube-Marne pour son aide et la mise à disposition des relevés de terrain.

Le Département recherche, développement et innovation de l'ONF bénéficie du soutien de l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence n° ANR-11-LABX-0002-01 (Laboratoire d'Excellence ARBRE).

## Références

- Baumann M., Ozdogan, M., Wolter, P., Krylov, A., Vladimirova M., Radeloff V.C. 2014. Landsat remote sensing of forest windfall disturbance. *Remote Sensing of Environment*, 143, 171–179.
- Blaschke T. 2010. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65 (1), 2–16.
- Blaschke T. 2005. Towards a framework for change detection based on image object. *Göttinger Geographische Abhandlungen*, 113, 1–9.
- Bouallegue M., Bourgeois L., Rouquet E. 2010. *Quelle perspective d'utilisation de la télédétection pour aider à la gestion de crises chablis à l'ONF?. TGAE training report*, AgroParisTech-ONF, 70p.
- Breiman L. 2001. Random Forests. *Machine Learnings*, 45 (1), 5–32.
- Chehata N., Orny C., Boukir S., Guyon D., Wigneron J.P. 2014. Object-based change detection in wind storm-damaged forest using high-resolution multispectral images. *International Journal of Remote Sensing*, 35 (13), 4758–4777.
- Chen G., Hay G.J., Carvalho L.M.T., Wulder M.A. 2012. Object-based change detection. *International Journal of Remote Sensing*, 33 (14), 4434–4457.
- Dees M. 2014. Can the challenges for operational satellite based storm damage mapping in forests be met? – An analysis of Rapid Eye based mapping of a medium scale storm damage event in forests in North-West Poland. *ForestSat2014, Riva del Garda (oral presentation)*. Summary available at <http://ocs.agr.unifi.it/index.php/forestsat2014/ForestSAT2014/paper/view/341> [accessed december 15, 2014].
- Desclée B., Bogaert P., Defourny P. 2006. Forest change detection by statistical object-based method. *Remote Sensing of Environment*, 102 (1–2), 1–11.
- Elatawneh A., Wallner A., Manakos I., Schneider T., Knoke T. 2014. Forest Cover Database Updates Using Multi-Seasonal RapidEye Data—Storm Event Assessment in the Bavarian Forest National Park. *Forests*, 5 (6), 1284–1303.
- Gardiner P., Blennow K., Carnus J.M., Fleischer P., Ingemarson F., Landmann G., Lindner M. et al. 2010. Destructive storms in European forests: past and forthcoming impacts. Final Report to European Commission – DG Environment. European Forest Institute, 138 pp.
- Genuer R., Poggi J.-M., Tuleau-Malot C. 2010. Variable selection using random forests. *Pattern Recognition Letters*, 31 (14), 2225–2236.
- Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I. 1973. Textural Features for Image Classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 3 (6), 610–621.
- Honkavaara E., Litkey P., Nurminen K. 2013. Automatic Storm Damage Detection in Forests Using High-Altitude Photogrammetric Imagery. *Remote Sensing*, 5 (3), 1405–1424.
- Hussain M., Chen D., Cheng A., Wei H., Stanley D. 2013. Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 80, 91–106.
- IGN. 2011a. BD Ortho Version 2 - Descriptif de contenu. 17p.
- IGN. 2011b. BD Topo Version 2.1 - Descriptif de contenu. 166p.
- IGN. 2013. Guide IGN Pléiades, V 1.2 du 01/08/13. 12p
- Litkey P., Nurminen K., Honkavaara E. 2013. Automatic Detection of Storm Damages Using High-Altitude Photogrammetric Imaging. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1 (1), 195–200.
- Meyer C., Geldreich P., Yesou H. 2001. Apports des Données Simulées SPOT5 Pour l'Évaluation Des Dégâts De Tempête Dans La Forêt. Cas De La Forêt De Haguenau (Alsace, France). *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 164-165, 162–173.
- Nelson M.D., Healey S.D., Moser W.K. 2009. Combining satellite imagery with forest inventory data to assess damage severity following a major blowdown event in northern Minnesota, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 30 (19), 5089–5108.
- Observatoire Français des Tornades et Orages Violents. 2012. Quels épisodes orageux ont marqué l'histoire climatique de Champagne-Ardenne? - Orages localement violents le 7 juin 2012 Available at: <http://www.keraunos.org/region/champagne-ardenne/orages-violents-champagne-ardenne-grele-foudre-vent-tornade-inondations-pluie-extreme.html> [Accessed August 20, 2012].
- ONF. 2003. Guide "gérer la crise chablis." (instruction 03-T-45)
- Remelgado R., Notarnicola C., Sonnenschein R. 2014. Forest damage assessment using SAR and optical data: evaluating the potential for rapid mapping in mountains, *EARSel eProceedings, Special Issue: 34th EARSel Symposium, 2014*, 76-81.
- Rich R.L., Frelich L., Reich P.B., Bauer M.E. 2010. Detecting wind disturbance severity and canopy heterogeneity in boreal forest by coupling high-spatial resolution satellite imagery and field data. *Remote Sensing of Environment*, 114 (2), 299–308.
- Stach N., Deshayé M. 2009. Estimation des dégâts de tempête : l'œil, l'avion et le satellite. *In La forêt face aux tempêtes*. Éditions Quae, 49–68.
- Wang W., Qu J.J., Hao X., Liu Y., Stanturf J.A. 2010. Post-hurricane forest damage assessment using satellite remote sensing. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150 (1), 122–132.