
Typologie des paysages forestiers du sud du massif de Fontainebleau après la tempête de décembre 1999

Evaluation des dégâts forestiers à l'aide d'un semis de points et d'imagerie satellitale optique

Vincent Godard

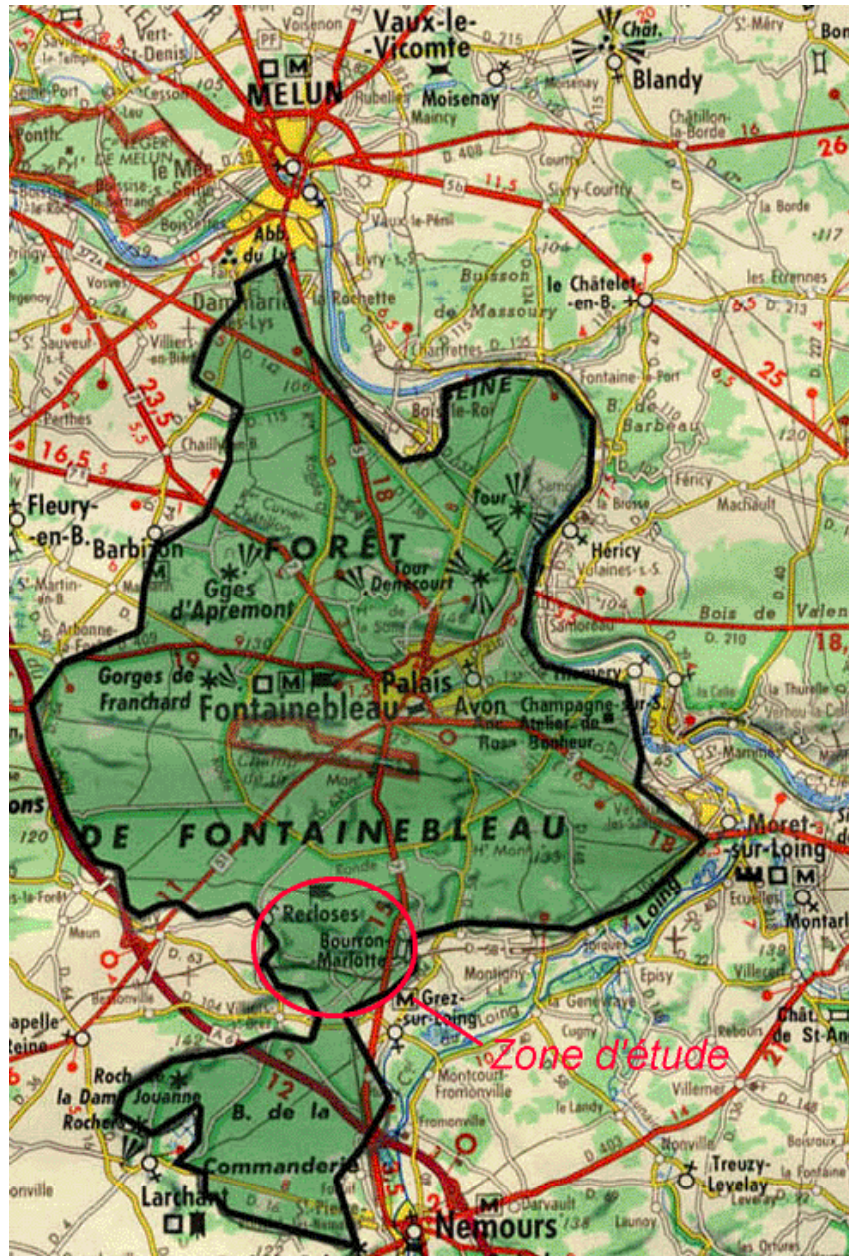
*Centre de Biogéographie Ecologie (CNRS FRE 2545)
Université de Paris8 – Maison des Sciences de l'Homme Paris Nord
4, rue de la Croix Faron, 93210 La Plaine Saint-Denis
vgodard@univ-paris8.fr*

RÉSUMÉ. Les tempêtes de décembre 1999 ont causé d'importants dégâts dans certaines forêts françaises. Différentes méthodes d'inventaire ont été mises en places pour évaluer l'impact tempétueux sur la ressource bois. Il s'agit de présenter ici une méthode combinant un échantillon de placettes enquêtées sur le terrain et des données satellitales optiques pour cartographier les conséquences de cet aléa sur un secteur, situé au sud de la forêt de Fontainebleau, qui associe des parcelles exploitées et d'autres en réserves biologiques intégrales. L'évaluation du résultat porte sur des aspects temporels, spatiaux et thématiques. Cette évaluation caractérise l'intérêt et la reproductibilité de la méthode pour l'observation et le suivi des transformations des territoires ruraux.

ABSTRACT. The tempest of 1999 resulted in significant damages in French forests. Various investigation methods have been used to estimate the impact of the tempests on forestry resources. The method described here combines sample of squares investigated locally and optical satellite data. The result of this alea on a sector, located in the south of Fontainebleau forest, associating plots in use and others kept as integral biological reserve. The estimation of the results concerns time, spatial and thematic aspects and thus, the interest and replication of the method of observation and the follow up of change in rural territories.

MOTS-CLÉS : échantillon, enquête, forêt, France, télédétection optique, tempête

KEYWORDS: forest, France, optical remote sensing, sample, survey, tempest



Source : d'après fond IGN, Série rouge au 1/250 000, n°103

Figure 1. Zone d'étude : secteur de Bourron-Marlotte (F. de Fontainebleau)

1. Introduction

Les deux tempêtes Lothar (26 décembre 1999) et Martin (27 et 28 décembre 1999) ont causé d'important dégâts aux forêts françaises. L'Inventaire forestier national (IFN), un des organismes qui avaient en charge l'évaluation des dégâts, estimait en 2002 que les chablis de 1999 représentaient 7 p.100 du volume total de la forêt française, soit 2,7 fois la récolte annuelle (Carouille, 2002, p.3). La France n'est pas le seul pays touché par ces deux tempêtes. L'Allemagne et la Suisse, par exemple, l'ont également été. Cependant, si l'Allemagne ne voit tomber qu'environ les trois quarts de sa récolte annuelle moyenne lors de cet épisode tempétueux, la Suisse constate des dégâts équivalant à 2,8 fois sa récolte annuelle. Au niveau européen, les écarts constatés ont été importants. Entre la France, qui voit partir en chablis 139,6 millions de m³ (récolte annuelle de 43 millions de m³) et l'Autriche où les chablis ne s'élèvent qu'à 0,4 millions de m³ (récolte annuelle de 14 millions de m³), les différences spatiales sont marquées (IFN, 2003, p.3).

De plus, à l'intérieur d'un même pays, toutes les régions n'ont pas été atteintes de la même façon. En France, 45 départements ont été totalement ou partiellement touchés. Les évaluations, portant sur la forêt de production, donnent une estimation, pour des dégâts touchant plus de 10 p.100 de son couvert, d'au moins 6,9 p.100 de la superficie boisée (IFN, 2003, p.2). Cette « imprécision » tient à la méthode d'estimation qui ne prend pas en compte les dégâts touchant des zones de moins d'un hectare, les bosquets et boqueteaux et qui sous-estime les dégâts diffus (entre 0 et 10 p.100 du couvert forestier touché).

De nombreuses méthodes ont été employées pour évaluer les dégâts liés aux tempêtes sur des milieux forestiers. Certaines reposent sur l'envoi d'un expert forestier pendant plusieurs semaines pour dresser une cartographie de l'intensité des dégâts et des surfaces touchées. Cette méthode est pratiquée par les compagnies d'assurance (Lallement, 2002). Elle est longue et coûteuse. Il est également possible d'envoyer une équipe de techniciens forestiers dresser un inventaire exhaustif des dégâts (Jaubert, 2001). C'est la méthode, également longue et coûteuse, que pratique l'Office national des forêts français (ONF). À l'instar des travaux de l'Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Île-de-France (IAURIF), des exemples de cartographie sur photographies aériennes post tempêtes existent également (Anonyme, 2000). Enfin, certaines méthodes vont marier photo-interprétation ou traitements d'images satellitaires et enquêtes de terrain. Cette approche a été développée par au moins deux contractants à l'appel d'offre du GIP-ECOFOR sur les « Recherches forestières à conduire à court terme suite aux tempêtes de fin décembre 1999 » de 2001 (Amat *et al.*, 2003, Stach *et al.*, 2002).

Les méthodes utilisées dépendent des objectifs poursuivis. Si l'on souhaite fournir une simple évaluation statistique de paramètres dendrométriques, une enquête s'appuyant sur quelques principes de la théorie de l'échantillonnage peut s'avérer précise et légère (Godard, 2003). En revanche, s'il est préférable de fournir en plus une cartographie des dégâts, il devient nécessaire d'envisager de passer du

semis de points d'enquête (surface d'information discrète) à une connaissance exhaustive (surface d'information continue).

Cet article se propose, à l'aide d'un exemple pris dans une forêt touchée par la tempête du 26 décembre 1999 de dégager et présenter une typologie d'un milieu forestier après tempête pour préparer l'analyse de ses transformations. Cette typologie fait appel à quelques traitements simples qui vont de l'échantillonnage jusqu'aux réalisations cartographiques à l'aide d'imagerie satellitale optique.

2. Choix de la zone d'étude

Dans le cadre du Programme du GIP-ECOFOR (Amat *et al.*, 2003), nous avons étudié des forêts situées dans l'arc du Bassin parisien, le long d'un transect ouest-est suivi par cette tempête, de la Normandie à l'Île-de-France. Ce sont le massif forestier de Conches-Breteuil dans l'Eure, les forêts d'Armainvilliers, d'Ozouer-le-Voulgis et de Fontainebleau en Île-de-France. Ce choix s'appuyait sur des variables relatives au milieu naturel (exploration des relations entre les phénomènes aérologiques et les caractères de surface, topographie, rugosité, orientation des reliefs, nature des sols et formations superficielles), à la propriété forestière (échantillons dans des forêts privées, communales et domaniales) et à la gestion sylvicole (essences, régimes forestiers, types de peuplements, conduite sylvicole). L'objectif était, dans la mesure du possible, de travailler sur des forêts présentant des conditions de milieux semblables pour dégager la part « anthropique » du dégât.

La forêt domaniale de Fontainebleau, à une soixantaine de kilomètres au sud-est de Paris dans la Couronne rurale, forme, avec la forêt domaniale des Trois Pignons et une frange de bois privés, un vaste massif de plus de 25 000 hectares. Cette forêt occupe des milieux physiques diversifiés et compartimentés. Les biotopes vont du pôle acide au pôle carbonaté. Quant aux bilans hydriques stationnels, ils vont du sec à l'hyperhumide. La zone d'étude, dite de Bourron-Marlotte, est située au sud du massif (*cf.* Figure 1) sur les plateaux sommitaux sous-tendus par le calcaire de Beauce plus ou moins recouvert de dépôts sableux ou limoneux. Ils portent essentiellement des futaies de chênes et de hêtres.

Intégralement incluse dans la forêt domaniale, la zone d'étude comporte deux réserves biologiques « Les Érables et Déluge » et « La Gorge aux Loups ». Bien que plus récentes que celles de « La Tillaie » et le « Gros Foutau », elles offrent de nouvelles parcelles soustraites à la gestion sylvicole et sont des sites exceptionnels pour étudier les modalités de chablis dans des peuplements « naturels » et les scénarios de reconstitution forestière dans les trouées et clairières (Lemée, 1987). En décembre 1999, les précipitations furent de 179 mm à Fontainebleau, pour une ETP de 166 mm. Le surplus hydrologique a fortement chargé les nappes. Contrairement à d'autres secteurs étudiés, Armainvilliers entre autres, l'engorgement des sols est resté limité aux plateaux couverts de limons.

3. Présentation méthodologique

Les méthodes mises en œuvre pour cette étude se décomposent en deux volets. Une présentation des méthodes d'échantillonnage et de collecte fait l'objet de la première section puis une seconde section décrit les différents traitements de l'information.

3.1. *Echantillonnage et collecte de l'information*

Différentes méthodes de collecte de l'information ont été exploitées, tant sur le terrain que sur les documents et bases de données dans le cadre du Programme du GIP-ECOFOR (Amat *et al.*, 2003). Une seule procédure aurait été préférable, mais la diversité des situations imposait de rechercher avant tout l'efficacité. Dans certains massifs, l'absence d'information sur les dégâts imposait de faire reposer intégralement la collecte sur une enquête de terrain. Dans d'autres, l'existence de bases de données ONF permettait une exploitation de celles-ci avec ou sans recours au terrain.

La procédure de tirage des unités d'enquête utilisée, sur le secteur forestier de Bourron-Marlotte, relève des tirages d'unités ponctuelles, *a priori* asurfaciques, mais pour lesquelles, en pratique sur le terrain, on inventorie une placette d'environ un tiers d'hectare. La procédure est comparable à celle développée par l'IFN pour les sondages de deuxième et troisième phase de l'inventaire général, soit un inventaire sur des placettes de 20 ares (IFN, 1985, p.35). C'est un tirage aléatoire et stratifié de points qui est appliqué (*cf.* Figure 2). La première strate correspond à la partie soumise de la forêt domaniale, la seconde est constituée des deux réserves biologiques intégrales (RBI), « Les Érables et Déluge » et « La Gorge aux loups » traitées conjointement. L'objectif de cette stratification était d'étudier en parallèle la forêt soumise et la forêt « naturelle » pour essayer de dégager un différentiel d'impact entre les deux milieux. Nous avons, en effet, constaté que 7,7 p.100 des arbres enquêtés avaient été touchés en forêt soumise alors qu'ils étaient 18,2 p.100 sur les réserves (Amat *et al.*, 2003, p.76), différence significative au seuil de 5 p.100 [test H de Kruskal et Wallis (Collectif, 1995, p.130)].

Le tirage des placettes échantillon a été réalisé en deux étapes à l'aide du logiciel IDRISI32. Un premier tirage, sur la zone hors réserves, a donné 12 points, un second, sur les réserves, 23 points. Le logiciel génère des coordonnées X et Y aléatoires (comme pour un tirage élémentaire) à l'intérieur des cases d'une grille pour assurer une bonne répartition des points (comme pour un tirage systématique). En pratique, la carte topographique importée puis géoréférencée sert de support aux tirages des échantillons. La phase de terrain a eu lieu de juin à septembre 2001. L'inventaire proprement dit porte sur des surfaces d'environ 3 600 m². En dehors des comptages prenant le centre de la placette pour référence, une placette est

enquêtée sous forme d'une succession de levés espacés de dix mètres et décrivant un carré de 60 m par 60 m.

3.2. Constitution des typologies

Des traitements multivariés ont été pratiqués pour constituer les typologies des paysages forestiers post tempête. Ils portent, d'une part, sur les variables collectées lors de l'enquête de terrain et, d'autre part, sur les enregistrements satellitaires. La première série de traitements ne concerne que les variables collectées sur le terrain. Elle sert à établir la typologie *au droit* des placettes échantillon. Elle ne permet pas de cartographier l'espace entre ces points. Cette première typologie est la typologie « optimale ». La deuxième série de traitements a pour objectif de caractériser les variables « radiométriques » à l'aide des variables collectées sur le terrain. Elle sert à établir la typologie *entre* les placettes échantillon. Enfin, la dernière série de traitements est une classification supervisée des données satellitaires. Elle permet d'établir la carte de l'impact tempétueux sur la zone d'étude.

3.2.1. Typologie construite sur les relevés de terrain

À l'issue de l'enquête de terrain et après un "recalibrage" des données collectées, il restait huit variables nominales telles : la de pente, le caractère aléatoire ou non de la répartition des arbres dans les différentes strates, la répartition des trouées, etc. ainsi que dix-neuf variables continues comme : le pourcentage de dégâts (calculé comme étant le rapport entre le nombre d'arbres touchés et le nombre d'arbres enquêtés), le nombre de chablis de feuillus, le taux de recouvrement des différentes strates, etc. L'ensemble des variables analysées, leur structure et un exemple de fiche d'inventaire sont regroupés dans les annexes du rapport d'étude (Amat *et al.*, 2003, p.108 et suivantes). Certaines variables ont été normalisées (logarithme décimal) avant traitements en raison de leur forte asymétrie droite.

Sur les 19 variables continues, 16 ont été traitées en variables continues actives, deux en variables continues illustratives (le nombre de volis, NBVO, et les dégâts sur le pin sylvestre, DPSY) car la normalisation n'a pas donné le résultat escompté (les coefficients d'aplatissement et d'asymétrie restant trop élevés) et une variable, différente de zéro pour seulement trois placettes a été éliminée (le nombre de chablis résineux, NBCR). Les 35 individus (placettes échantillon) ont été traités en individus actifs.

Des classifications ont été réalisées sur les facteurs issus d'une analyse en composantes principales (ACP), pour les forêts du secteur de Bourron-Marlotte à Fontainebleau. Ce sont des classifications ascendantes hiérarchiques par la méthode de Ward (perte d'inertie minimum, Nakache *et al.*, 2000, p.10). Classiquement, elles permettent de regrouper les individus, ici les placettes échantillon, dans une typologie qui fait ressortir des paramètres stationnels (sylvicoles, dendrométriques,...) significatifs, ainsi que les caractéristiques liées aux dégâts. On

peut donc espérer, dans le meilleur des cas, voir apparaître des classes où voisinent dégâts et modes de gestion ou dégâts et traitements.

En fonction du paramétrage du logiciel (SPAD5, Décisia), plusieurs partitions sont proposées. Elles sont ordonnées par perte d'inertie croissante. L'utilisateur retient la partition de son choix, en fonction du nombre de classes souhaitées mais aussi en fonction de la richesse des variables qui émergent, pour qualifier les classes ainsi que sa « tolérance » aux *outliers*, les classes à un seul individu.

3.2.2. Caractérisation des données satellitales par les relevés de terrain

En fonction de la date de prise de vue et des caractéristiques radiométriques, spectrales et spatiales du capteur, la typologie décrite au paragraphe 3.2.1. peut s'avérer inopérante pour qualifier la cartographie de l'impact tempétueux à l'aide de l'imagerie satellitale. Il apparaît alors préférable d'effectuer une pré-classification des données radiométriques tout en constituant simultanément une typologie « stationnelle » adaptée pour renseigner les différentes classes de la légende.

Un premier jeu de données satellitales a été traité dans le cadre du Programme du GIP-ECOFOR (Amat *et al.*, 2003). Il s'agissait de données du satellite SPOT4 du 23 septembre 2000. Il s'est avéré qu'un effet de brume et/ou l'ombre portée d'un système nuageux altérait la qualité radiométrique du signal. Des données issues du capteur ETM+ de Landsat7 ont ensuite été analysées. Leur traitement est présenté ici. Elles n'avaient pas, pour des questions de délai, été intégrées dans le rapport d'étude. Elles ont été fournies par l'Institut français de l'environnement (IFEN) par le biais d'un accord de valorisation des données acquises dans le cadre du programme Corine Land Cover 2000.

Ces données ont été fournies avec un certain nombre de prétraitements. À l'heure où ces lignes sont rédigées, il ne nous est pas encore possible de savoir lesquels précisément, les métadonnées ne nous sont pas encore parvenues ! Cependant, lors du changement de projection pour de l'UTM31N, initialement Lambert2 étendu, un contrôle a permis de constater sur quatre points amer, une erreur quadratique moyenne (RMS) de 0,67, soit pour du pixel Landsat de 30 m, une RMS d'environ 20 m. Pour ce qui est des corrections radiométriques, ne sachant pas la nature des traitements précédemment appliqués pour l'IFEN, aucune manipulation n'a été entreprise. Seules, des ACP ont été réalisées pour extraire des axes structurants, porteurs d'informations compactées et décorréelées, où les « bruits » (d'ordre technique) et perturbations (d'ordre atmosphérique) sont rejetés sur les dernières composantes, les moins informatives (Collet, 1992, p.121).

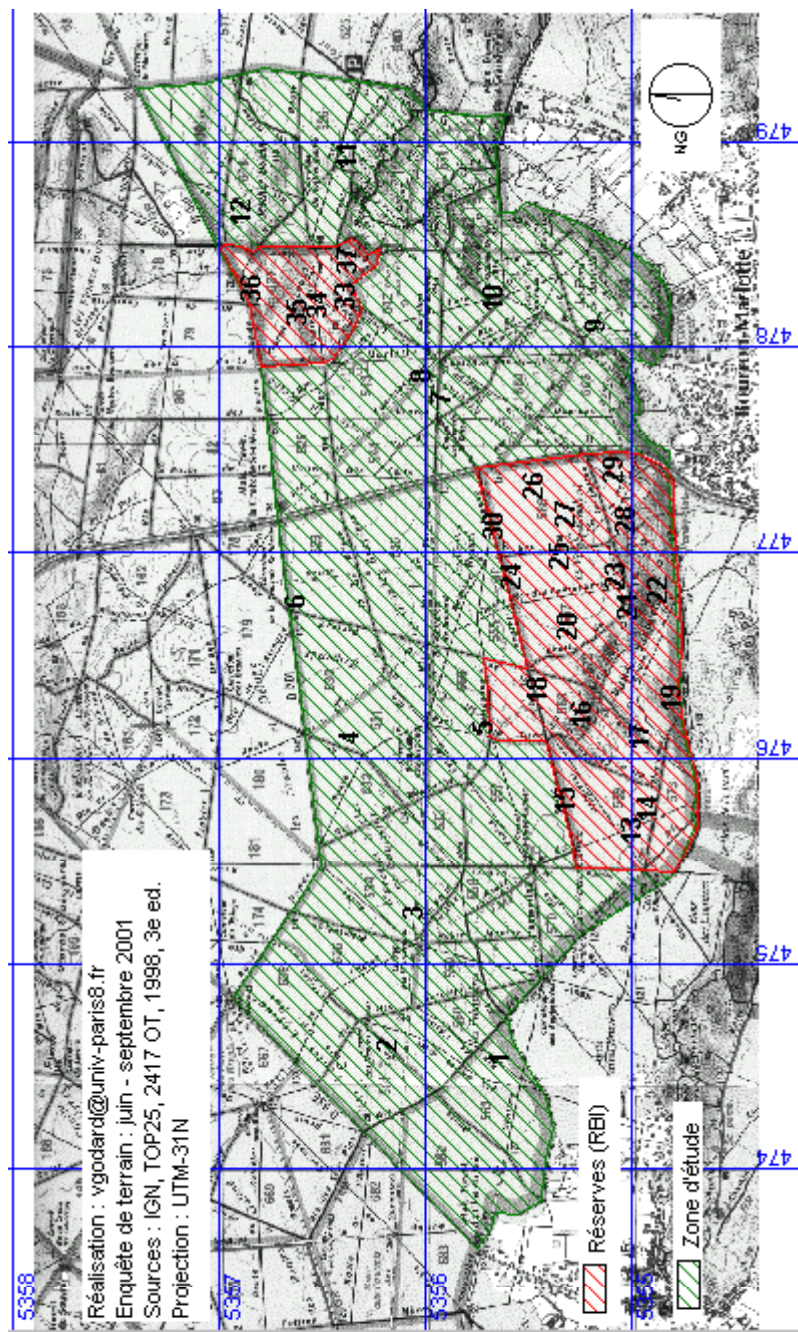


Figure 2. Répartition des points d'enquête sur le secteur de Bourron-Marlotte

La caractérisation, proprement dite, des données satellitales par les relevés de terrain, est précédée de l'extraction des valeurs radiométriques. L'emprise au sol des parcelles échantillon représente un carré de 60 mètres de côté. Pour palier l'incertitude du positionnement par GPS (Garmin 12 d'une précision moyenne décimétrique), cette emprise a été portée à 90 m de côté par rasterisation du fichier vecteur puis filtrage au « maximum » avec une fenêtre 3*3.

Le résultat du filtrage sert de masque pour extraire les données radiométriques des parcelles pour les différents canaux. Ces extraits sont ensuite traités dans un logiciel d'analyse multivariée (SPAD5), avec les données thématiques collectées sur le terrain. Les données (radiométries moyennes pour la parcelle échantillon) sont utilisées comme variables continues actives, alors que les données stationnelles ne sont qu'illustratives. En conformité avec les objectifs de l'analyse (typologie des dégâts forestiers), les variables actives ont été pondérées (Morineau *et al.*, 2000, p.17) à l'aide de la variable DEGA (nombre d'arbres touchés sur le nombre d'arbres enquêtés par parcelle, exprimé en pourcentage) pour faciliter la qualification des catégories. La variable DEGA n'apparaît plus dans les descriptifs des catégories, mais cette information reste accessible au travers des variables concernant le nombre des chablis de feuillus (NBCF), de résineux (NBCR), etc. L'objectif de ces traitements est que les catégories issues des classifications sur les facteurs, sous SPAD (ACP puis CAH), soient compatibles avec les classifications supervisées réalisées sous Idrisi32. Ces catégories vont permettre de renseigner les postes de légende issus des classifications.

Parmi les trois partitions les plus stables proposées par SPAD, une seule a été retenue. Il s'agit d'une partition en trois classes. Elle oppose une classe sans dégâts significatifs (Classe 1), où le couvert de la strate arborescente haute est significatif, à deux autres classes marquées par les dégâts l'une sur les résineux (Classe 2) et l'autre sur les feuillus (Classe 3). Les partitions qui ont été rejetées l'ont été pour les raisons suivantes : l'une comporte une classe de plus, mais celle-ci n'est décrite significativement par aucune variable stationnelles, c'est une classe « centrale », sans caractéristique propre, l'autre a huit classes, mais certaines ont un seul individu.

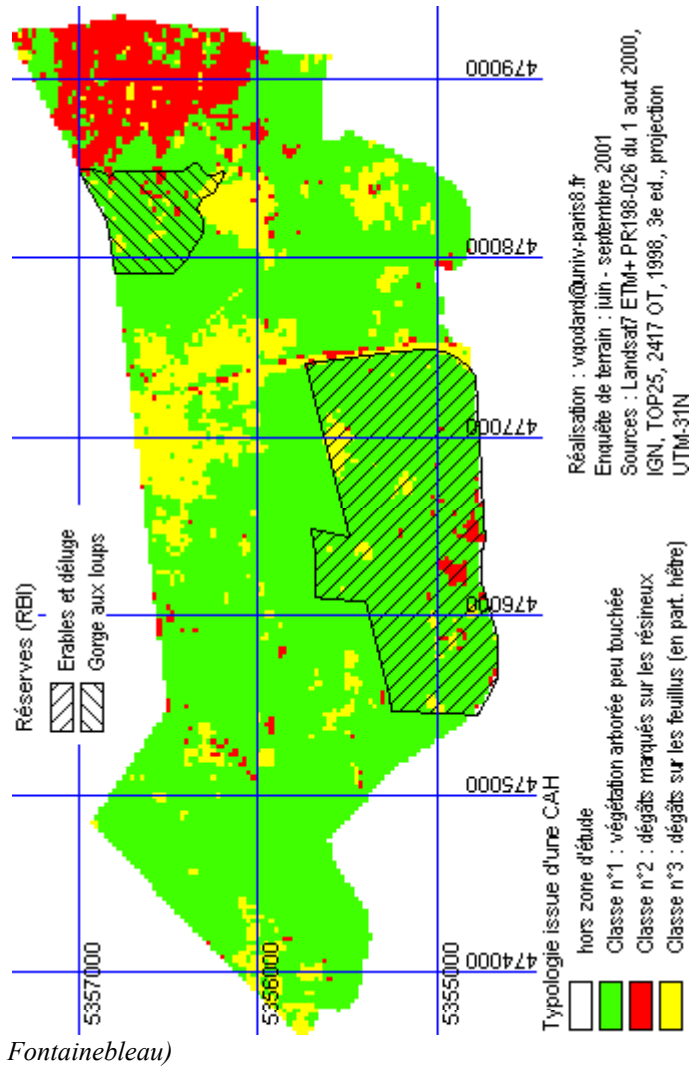
3.2.3. Traitement des données satellitales

Le traitement des données satellitales, décrit ici, concerne les classifications supervisées. La méthode de classification dont les résultats sont présentés est celle du « maximum de vraisemblance ». Lorsque les parcelles échantillon sont suffisamment homogènes, ses performances sont supérieures à celles de la plupart des autres « classificateurs » (Eastman, 2001, p. 65).

Le nombre des canaux à utiliser pour les classifications est fonction du nombre de pixels par thème. La partition retenue comporte trois classes dont deux avec deux parcelles échantillon de neuf pixels. Sachant qu'il faut dix fois plus de pixels (par thème) que de bandes spectrales utilisées pour la classification (Eastman, 2001, p.

60), avec seulement dix-huit pixels (2 parcelles de 3*3 pixels de 30 m de côté), c'est une classification avec deux canaux qu'il faut retenir. Les canaux privilégiés sont les deux premières composantes de l'ACP qui regroupent respectivement 82,4 p.100 et 12,9 p.100 de l'information radiométrique (la variance totale), soit à elles deux environ 95 p.100 de l'inertie.

Figure 3. Carte des dégâts sur le secteur de Bourron-Marlotte (F.D.)



La qualité des résultats est appréciée, à l'issue des classifications, en comparant, pour l'ensemble des parcelles échantillon, leur affectation d'origine puis leur affectation après classification au sein d'une matrice d'erreurs ou de confusions (*cf.* Tableau 1). Le faible nombre de zones d'entraînement, surtout pour les classes deux et trois, n'a pas permis de constituer deux sous échantillons, celui de l'initialisation des traitements et celui de leur contrôle. Il aurait été préférable de contrôler la qualité de la classification sur un échantillon de parcelles indépendant du processus de classification.

Verticalement, ce sont les pertes par érosion (**ErrorO**, erreur d'omission) qui sont signifiées. Pour la classe 2, sur les 18 pixels reconnus sur le terrain comme relevant de ce thème, 14 ont été correctement cartographiés, mais 4 ont été cartographiés en classe 1. Cela signifie que l'érosion de ce thème entre le terrain et la cartographie est de 22 p.100. En ligne sont portés les gains par accumulation (**ErrorC**, erreur de commission). Sur les 15 pixels cartographiés en classe 2, 14 ont bien été vus comme tel sur le terrain, toujours sur la diagonale, mais 1 avait été identifié comme vérité terrain de la classe 1. La classe 2 a donc « capturé » 1 pixel « étranger », d'où une accumulation qui se traduit par une erreur de commission de 7 p.100. C'est le thème 1 qui souffre le moins de confusion. L'erreur globale est de l'ordre de 4 p.100. Le détail des catégories, et donc des classes à forte ou à faible confusion, sera détaillé dans la partie concernant la typologie des dégâts et leur répartition spatiale (*cf.* 4.).

		Vérité terrain				
	Classes	1	2	3	Total	ErrorC
Carto	1	257	4	3	264	2,6 %
	2	1	14	0	15	6,7 %
graphie	3	3	0	15	18	16,7 %
	Total	261	18	18	297	
	ErrorO	1,5 %	22,2 %	16,7 %		3,7 %

Tableau 1. Matrice de confusions

Les résultats de la classification retenue sont satisfaisants (à la réserve près de l'indépendance de l'échantillon de contrôle). La qualité globale de la classification est de 83 p. 100, évaluée par l'indice globale de Kappa qui, bien qu'un des plus sélectifs, est le plus utilisé (Hudson *et al.*, 1987 ; Rosenfield *et al.*, 1986). Un indice de qualité par catégorie, le *Kappa Index of Agreement* (KIA), donne les résultats suivants (*cf.* Tableau 2) :

Avec 78 p.100, la classe 1 a tendance à « accumuler » des pixels qui viennent d'autres thèmes. L'érosion de « sa » vérité terrain, 87 p.100, est donc moins marquée que son « accumulation cartographique ». C'est tout le contraire pour la

classe 2 qui n'empiète pas cartographiquement sur les autres, 93 p.100 de précision, mais ne retrouve pas tous les pixels vus comme classe 2, 77 p.100 de vérité terrain. La classe 3 est stable en érosion et en accumulation, avec 83 p.100.

	Cartographie	Vérité terrain
Classe1	78.1%	86.2%
Classe2	92.9%	76.6%
Classe3	82.3%	82.3%

Tableau 2. *Qualité de la classification par classe*

4. Analyse et discussion des résultats obtenus

À la suite de l'analyse de la cartographie obtenue, et de la typologie qui sous tend sa légende, un certain nombre d'interrogations relatives au plan d'échantillonnage, à la résolution du capteur, à la date de prise de vue, etc. seront détaillées pour tenter d'expliquer les résultats et leur éventuelle opérationnalité.

4.1. Analyse de la spatialisation de la typologie

Classes	Zone d'étude	Réserves seules	Forêt gérée seule
1	78.6%	90.4%	75.5%
2	8.6%	3.5%	9.9%
3	12.8%	6.1%	14.6%

Tableau 3. *Répartition des trois classes par secteur d'étude*

La plupart des cartes de dégâts, qui ont été réalisées à l'issue des tempêtes de 1999, présentent une légende en quatre ou cinq classes allant de : aucun dégâts (0 à 10 p.100) à peuplement détruit (90 p.100 et plus), par exemple (IAURIF, 2000¹, Jaubert, 2001, *in* Amat *et al.*, 2003, p. 33, Stach *et al.*, 2002). L'objectif de cette étude était plutôt de réaliser une légende synthétique qui, au lieu de présenter une échelle d'intensité de l'impact, propose des associations de variables.

La Figure 3 montre que les classes contenant des dégâts significatifs occupent une surface restreinte et sont très localisés. À l'exception de quelques taches, elles

¹ Atlas sur les « Effets de la tempête du 26 décembre 1999 sur les forêts d'Île-de-France » publié à l'échelle du 1/20 000 par l'IAURIF, *in* Anonyme, 2000, p.24

touchent peu les réserves (RBI). Les plages les plus notables, par leur extension, sont concentrées dans la forêt gérée par l'ONF. L'analyse des statistiques collectées sur la carte (*cf.* Tableau 3) confirme cette répartition. La classe 1 (végétation arborescente peu touchée, mais avec des dégâts diffus) est partout largement majoritaire. La classe 2 (dégâts sur les résineux) n'est que de 3,5 p.100 dans les RBI, alors qu'elle représente presque 10 p.100 de la surface de la forêt gérée par l'ONF. Enfin, la classe 3 (dégâts sur les feuillus), à peine plus importante, prend, encore une fois, une part plus nette en forêt gérée que dans les réserves.

Ces résultats sont donc quelque peu en contradiction avec ceux issus de l'échantillonnage terrain, présentés à la section 3.1. Rien d'étonnant à cela car, comme le faisait déjà remarquer J. Meyer-Roux dans une série d'articles publiés en 1981 « *Le problème de l'obtention d'une statistique par télédétection peut donc se ramener à l'estimation du "biais moyen" de la classification des pixels.* » (Meyer-Roux *et ali.*, 1981a, 1981b), si la carte est « bonne » aux points d'enquête sa qualité est inconnue en dehors. Elle nécessite, pour être appréciée, la comparaison avec une source extérieure ; comme nous envisageons de le faire avec l'atlas de l'IAURIF (Anonyme, 2000, p.24). Ceci permettra, peut-être, de lever certaines ambiguïtés visibles sur la classification comme des zones linéaires de dégâts qui pourraient tout simplement être des éléments de voirie dont le comportement radiométrique se rapproche des zones où l'effet de sol marque les formations végétales perturbées (*cf.* Figure 3). Nous avons, sans doute là, un des éléments d'explication de la surestimation, par la classification, des dégâts dans la forêt gérée, par rapport aux résultats de la seule enquête de terrain.

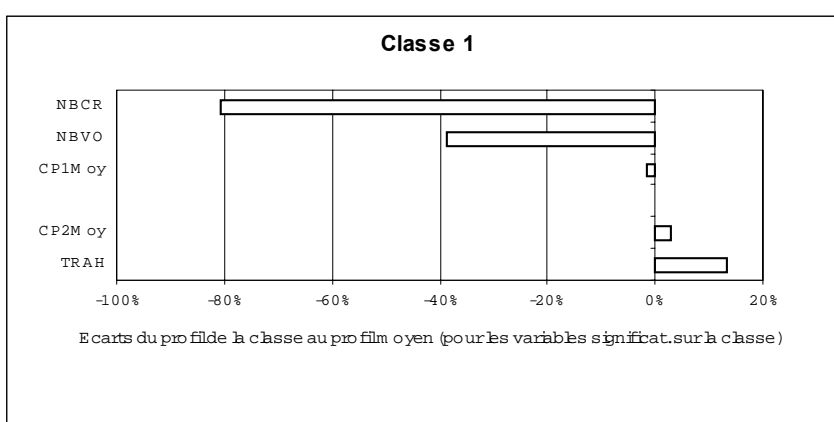
Que ce soit pour les résineux, surtout le pin sylvestre, ou les feuillus, surtout le hêtre, la spatialisée des dégâts recoupe la répartition de ces essences, telle qu'elle est représentée sur les documents du gestionnaire (ONF/ED, 1997). Il convient toutefois de détailler la légende pour analyser les variations de l'impact tempétueux qui est, de toutes façons, relativement faible et diffus.

4.2. Analyse des typologies

Deux typologies ont été réalisées. La première est obtenue sur les seules données stationnelles, collectées sur le terrain. Elle correspond à la description optimale que l'on peut obtenir pour la zone d'étude. La deuxième tient compte des données télédéteçtées. Elle permet de couvrir l'ensemble de la zone d'étude (alors que la première est strictement localisée aux parcelles échantillon). Cependant, elle est moins informative, voire un peu triviale, car des problèmes de taille de l'échantillon, de localisation, de dates d'enregistrement (peu compatibles avec la problématique), de confusions radiométriques,... vont entraîner une baisse de la significativité de certaines variables qualifiantes dans la classification, altérant la richesse de la première typologie, dite stationnelle. La deuxième typologie, celle qui est cartographiée, est présentée, puis comparée à la première pour analyse.

4.2.1. Description de la typologie cartographiée

À la suite des classifications sur les données radiométriques, la légende des trois classes obtenues est décrite. Deux sortes de variables sont représentées sur les figures n°4 à 6. Il s'agit, d'une part de variables stationnelles (illustratives), comme TRAH (taux de recouvrement de la strate arborescente haute) ou NBVO (nombre de volis), et d'autre part de variables ayant trait aux données satellitales (actives), comme CP2Moy (valeur moyenne des données radiométriques pour la deuxième composante de l'ACP).



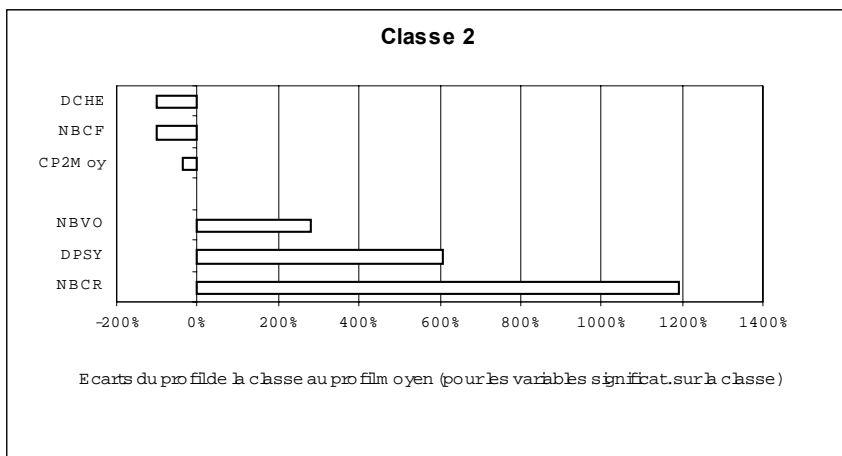
Ne sont décrites que les variables significatives (dont la valeur test est supérieure à 2). La valeur du profil de chaque variable correspond à la moyenne dans la classe moins la moyenne générale de cette variable le tout divisé par la moyenne générale de cette variable (exprimé en p. 100).

Figure 4. Profil typologique de la classe 1

En terme de variables, la première classe (*cf.* Figure 4) connaît une sur-représentation qui concerne essentiellement les taux de recouvrement de la strate arborescente haute (TRAH, plus de 15 m). Elle est associée à la variable radiométrique CP2Moy (deuxième composante de l'ACP). À l'inverse, sont sous-représentés les dégâts sous forme de volis (NBVO) et les chablis de résineux (NBCR), ainsi que les parcelles ayant une forte réponse pour la première composante (CP1Moy). C'est donc une forêt peu touchée par la tempête, avec un couvert à fort recouvrement, qui est décrite ici. Pour ce qui est des individus (les placettes), cette classe concerne majoritairement les points d'enquête situés dans les réserves biologiques intégrales, RBI, (22 sur 23), et pour une part plus faible celles du secteur géré par l'ONF (9 sur 12).

En terme de variables, la deuxième classe (*cf.* Figure 5) connaît une sur-représentation qui concerne essentiellement le nombre de chablis de résineux

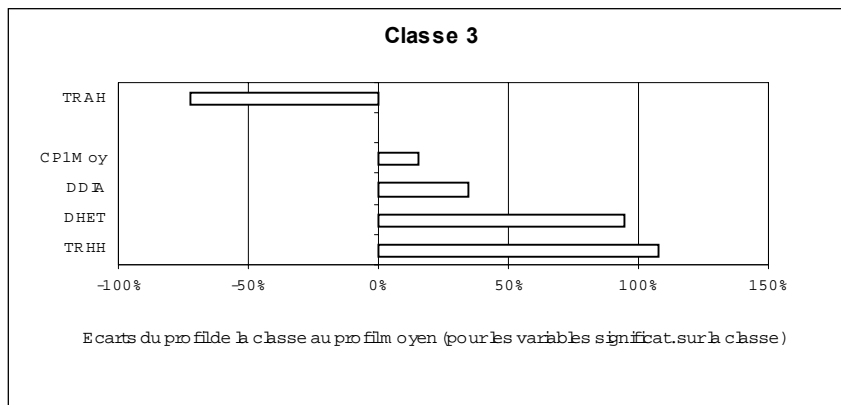
(NBCR), les dégâts, en pourcentage, sur le pin sylvestre (DPSY) et les nombres de volis (NBVO). Elle n'est pas associée à une variable radiométrique. À l'inverse, sont sous représentés les dégâts, en pourcentage, sur le chêne (DCHE), le nombre de chablis de feuillus (NBCF) ainsi que les parcelles ayant une forte réponse pour la deuxième composante (CP2Moy) de l'ACP. C'est donc la forêt de résineux touchée par la tempête, qui est décrite ici, sous forme de chablis et de volis. Pour ce qui est des individus (les placettes), cette classe ne concerne que des points d'enquête situés sur le secteur géré par l'ONF (2 sur 12).



Ne sont décrites que les variables significatives (dont la valeur test est supérieure à 2).

Figure 5. Profil typologique de la classe 2

En terme de variables, la troisième classe (*cf.* Figure 6) connaît une sur représentation qui concerne essentiellement les dégâts sur les feuillus et en particulier sur le hêtre (DHET) et les dégâts sur les forts diamètres (DDIA). En raison des trouées, le taux de recouvrement des herbacées hautes (TRHH) y est fort. Elle est associée à la variable radiométrique CP1Moy (première composante de l'ACP). À l'inverse, sont sous représentés les taux de recouvrement de la strate arborescente haute (TRAH, plus de 15 m). C'est donc la forêt de feuillus touchée par la tempête, qui est décrite ici, avec une essence plus significativement touchée, le hêtre, et de gros diamètres. Pour ce qui est des individus (les placettes), cette classe concerne un point d'enquête situés dans les RBI, et un autre dans le secteur géré par l'ONF.



Ne sont décrites que les variables significatives (dont la valeur test est supérieure à 2).

Figure 6. Profil typologique de la classe 3

4.2.2. Comparaison avec la typologie stationnelle

Cinq classes ont été obtenues sur la seule analyse des paramètres stationnels. Les principales différences concernent, bien sûr, la réduction du nombre de classes mais surtout, des pertes d'informations relatives à la richesse des descriptions, ainsi que des « migrations » de placettes d'un groupe à l'autre. Comme cela a été précisé dans l'introduction de la section 4.2., et dans la mesure où la typologie stationnelle n'est pas centrale dans la compréhension des classes issues des données télédéetectées, seule la description des différences entre la typologie stationnelle et télédéetectée est mise en avant dans cet article.

Dans le cadre de la typologie stationnelle, la classe 3, qui concerne les dégâts sur le hêtre, est éclatée en deux sous classes qui vont à elles deux capitaliser 16 placettes (soit 4 de la forêt gérée et 12 dans les RBI), au lieu de deux. Les variables représentées sur ces classes sont au nombre de sept et caractérisent la fréquence des dégâts sur le charme, le nombre de chablis en général et le nombre de chablis de feuillus en particulier. La sous représentation des fortes densités (nombre de tiges à l'hectare) y est marquée.

De la même manière, la classe 2, qui concerne le nombre de chablis de résineux et les dégâts sur le pin sylvestre, s'étoffe dans la typologie stationnelle de cinq individus supplémentaires (soit 3 de la forêt gérée et 4 dans les RBI), au lieu de deux. Là, le nombre de variables représentées n'augmente pas, il diminue même par perte du nombre de chablis de résineux. Ce sont les variables sous représentées, caractéristiques des placettes « captées » qui croissent. Elles infléchissent cette classe vers la faiblesse du dégât dans les feuillus. Les placettes qui ont rejoint cette classe connaissent une fréquence des dégâts sur le chêne et le hêtre faible un

nombre de chablis faible, surtout pour les feuillus, etc., et éventuellement des dégâts sur le pin sylvestre.

Il serait possible de poursuivre la comparaison sur de nombreux autres aspects. Cependant, il paraît plus intéressant de s'interroger sur les raisons de la perte de richesse informative de la typologie cartographiée par rapport à celle réalisée sur les paramètres stationnels.

4.3. Discussion

Devant le manque relatif de richesses des résultats, et les quelques contradictions relevées en section 4.1, plusieurs questions doivent être posées, et quelques pistes proposées. En premier lieu, il convient de se demander si le plan d'échantillonnage était adapté à un paysage forestier où les dégâts faibles et diffus dominant. Ensuite, toujours pour les mêmes enjeux, en terme de géométrie et de période d'acquisition, les données satellitales retenues (Landsat ETM+) sont-elles adaptées ?

4.3.1. Adéquation du plan d'échantillonnage

Dès le mois de mai 2000, il était possible de savoir que 91 p.100 de la superficie boisée d'Île-de-France portait moins de 10 p.100 d'arbres abattus (IAURIF, 2000, p. 5) et qu'en forêt de Fontainebleau, 0,9 p.100 de la superficie boisée portait plus de 50 p.100 d'arbres abattus, 3,7 p.100 de la superficie boisée portait entre 10 et 50 p.100 d'arbres abattus et 95,4 de la superficie boisée portait moins de 10 p.100 d'arbres abattus (IAURIF, 2000, p. 4). De ce fait, il fallait s'attendre à des dégâts globalement faibles et diffus donc difficiles à appréhender. Il est donc cohérent, avant toute autre interrogation, de contrôler que le plan d'échantillonnage est adapté à l'intensité des dégâts.

Effectivement, sur le secteur d'étude géré par l'ONF, ce sont surtout les arbres âgés de la futaie qui ont été abattus par la tempête, donc ceux qui connaissaient les plus faibles densités (à l'inverse des taillis vieillissants sur Armainvilliers ou Conches-Breteuil, Amat *et al.*, 2003). C'est également le cas des deux RBI qui ont récemment été mises en réserve. En s'appuyant sur la sylviculture du chêne, le nombre de tiges à l'hectare peut descendre jusqu'à 100 avant les dernières coupes dites d'ensemencement (doc. ONF *in* Bazire *et al.*, 1991, p.32). De ce fait, avec moins de 10 p.100 d'arbres touchés à l'hectare, il peut y avoir 10 arbres ou moins abattus. Combien les placettes échantillon peuvent-elles en saisir ?

Avec environ 3 600 m², soit aux alentours d'un tiers d'hectare, une placette échantillon devait permettre d'enquêter trois à quatre arbres touchés par la tempête. Sur les 2 550 arbres enquêtés sur le secteur de Bourron-Marlotte, 373 étaient chablis ou volis, soit pour 35 placettes, une moyenne de 10,7 arbres touchés. Quinze placettes avaient 4 arbres touchés ou moins, parmi celles-ci trois n'avaient aucun arbre touché. Le plan d'échantillonnage a donc permis de saisir la faiblesse et la

diffusion des dégâts. Ce qui ne pouvait pas être le cas si l'on utilisait comme référentiel les données cartographiques (issues de photo-interprétation) de l'IFN, en raison de la non prise en compte des dégâts affectant moins d'un hectare de superficie (Stach *et al.*, 2002, p.125 et 144). Cependant, le nombre de placettes échantillon était-il suffisant pour saisir la diversité des situations ?

On peut regretter, a posteriori, de ne pas avoir plus de 35 placettes dans l'échantillon. En effet, dès lors que certaines classes de la typologie ne comportent que deux échantillons, il est logique de se demander si un plus grand nombre de points d'enquête n'aurait pas permis d'affiner le résultat. Il faut mettre cette interrogation en balance avec la lourdeur de l'enquête terrain. En effet, sur le seul site de Fontainebleau, à raison de 4,4 placettes par jour et une moyenne d'une heure et 20 minutes d'enquête par placette, il a fallu huit jours effectifs de terrain, soit une moyenne de 6 h et demi d'enquête par jour, sans compter les temps de liaison. On peut se rendre compte de la « lourdeur » de l'inventaire sur une placette en consultant la fiche modèle présentée dans la rapport (Amat *et al.*, 2003, p. 108-109). Dans la mesure où cet inventaire faisait suite à la campagne de terrain sur Armainvilliers et précédait celui du massif de Conches-Breteil (92 placettes), il était difficile de doubler les placettes.

4.3.2. Adéquation du capteur

À partir du moment où l'on considère le plan d'échantillonnage comme satisfaisant, ce sont les données satellitales qu'il faut analyser pour déterminer leur adéquation à la problématique. Un premier essai sur de la données SPOT4 avait permis une typologie en cinq classes (Amat *et al.*, 2003, p. 80-88). Cependant, ces données contenaient une altération radiométrique (effet de brume et/ou ombre portée) qui pouvaient perturber les traitements. Il a donc été testé les mêmes types de traitements sur des données Landsat7 ETM+ dont les résultats sont proposés ici. Leur richesse moins fine peut être attribuée à, au moins, deux causes.

En premier lieu, la date d'enregistrement est moins favorable pour les données Landsat. Elles sont du 1^{er} août 2000 alors que les données SPOT sont du 23 septembre 2000. D'autres équipes ont également démontré qu'il était préférable de recourir à des dates tardives (du printemps tardif à l'été) pour améliorer la discrimination dans l'intensité des dégâts (Stach *et al.*, 2002, p.142). La pluviosité assez marquée en 2000 a sans doute également retardé cette période favorable de discrimination qui combine stade phénologique, stress hydrique, dégâts,... De ce fait, un enregistrement Landsat plus tardif, du 28 août 2000, qui n'a pas encore été exploité, pourrait apporter un gain informatif pour de futures typologies. De même, il conviendra de comparer le résultats de cette future classification, et de l'actuelle, avec les résultats de la photo-interprétation post-tempête de l'IAURIF (Anonyme, 2000, p.24). Ceci permettra sans doute de lever l'incertitude quant aux contradictions entre les résultats de l'enquête de terrain et les classifications.

En second lieu, il convient de s'interroger sur l'adéquation entre la résolution spatiale du capteur ETM+ de Landsat et les dégâts. Avec un pixel de 30 m de côté, la précision géométrique de ce capteur est faible par rapport à celle des capteurs embarqués sur SPOT4 (pixel multispectral à 20 m de côté). Elle est 50 p.100 moins fine ! Est-elle capable de percevoir la chute ou le bris d'un seul individu ?

Quartiles\Composantes (ACP)	CP1	CP2	CP3
Q1 (25 p.100)	33%	46%	57%
Q2 (50 p.100)	48%	56%	81%
Q3 (75 p.100)	74%	78%	106%

Tableau 4. Variabilité radiométrique des placettes échantillon (coef. de var. en p.100)

Si l'on se réfère à la projection au sol des houppiers de la strate arborescente des arbres de plus de 15 m, celle ci peut atteindre, dans les forêts de plaine de l'Europe médiane, 15 à 20 m (Amat *et al.*, 1984, p.118). La trouée qui en résulte est plus en rapport avec la géométrie des pixels SPOT4 que Landsat. Cet aspect peut être appréhendé par l'analyse de la variabilité des valeurs spectrales au sein des neuf pixels constituant la placette échantillon (*cf.* Tableau 4). On y constate que la variabilité augmente avec le numéro de la composante de l'ACP, donc avec la baisse de la part d'information spectrale. Ainsi, pour le premier quartile (Q1), 25 p.100 des placettes ont une variabilité radiométrique [appréciée par le coefficient de variation (écart-type divisé par moyenne des valeurs radiométriques mesurées sur les neuf pixels de la placette) exprimé en p.100] inférieure ou égale à 33 p.100 sur la première composante (CP1) – donc 75p.100 des placettes en ont une supérieure à 33 p.100 !, à 46 p.100 sur la deuxième composante (CP2) et 57 p.100 sur la troisième (CP3).

De ce fait, avec des dégâts diffus, la variabilité radiométrique des placettes est assez élevée et explique, pour partie, le faible nombre de classes produit en raison des confusions de classification générées. Cependant, même si la géométrie des pixels SPOT4 semble plus adaptée que celle de Landsat, il ne faut toutefois pas espérer détecter systématiquement un chablis ou un volis en raison de l'imparfaite superposition de la trouée et du pixel, occasionnant des pixels mixtes. Ne faudrait-il pas, dès lors, se pencher sur d'autres capteurs ?

Plusieurs essais d'imagerie radar ont été tentés pour déterminer l'impact tempétueux sur les forêts. Les résultats sont partagés. L'utilisation du coefficient de rétrodiffusion sur des données issues de la Bande C d'ERS2 n'a pas donné les résultats escomptés (Stach *et al.*, 2002, p.109). En revanche, les images de cohérence, dérivées d'une paire d'images interférométriques d'ERS, ont semblé apporter des résultats beaucoup plus significatifs (Dwyer *et al.*, 2000, Herrmann *et*

al., 2000). Actuellement, de toute façon, la résolution spatiale de l'imagerie radar civile n'est pas significativement meilleure que celle de l'optique.

C'est bien, dans le court terme, de l'imagerie optique qu'il faut attendre une meilleure prise en compte des dégâts faibles et diffus. Des simulations de données optiques, 2,5 m pour SPOT5, (mais aussi radar) à très haute résolution (THR) ont, semble-t-il, donné de très bons résultats (Maire, 2002). Depuis les tempêtes de 1999, le satellite SPOT5 est opérationnel. La disponibilité en THR ou en 5 ou 10 m est possible. D'autres capteurs, qui fournissent de la donnée métrique tels Ikonos ou Quick bird, devraient également permettre une meilleure prise en compte de ce type de dégâts.

5. Conclusion

En forêt de Fontainebleau, le suivi de la transformation d'un territoire rural forestier s'est appuyé sur une chaîne méthodologique allant d'un plan d'échantillonnage simple au traitement d'imagerie satellitale optique moyenne résolution. Une typologie des paysages forestiers post-tempête a permis de dégager trois classes qualifiant : des secteurs où les dégâts significatifs sont absents, ceux où ce sont les résineux qui ont été touchés, en particulier le pin sylvestre, et ceux où ce sont les feuillus, en particulier le hêtre. Cette typologie, pour des raisons de trop grande précocité de la prise de vue et de faible résolution spatiale du capteur, n'est pas aussi fine que les paramètres stationnels pouvaient le laisser espérer. Elle comporte même quelques contradictions spatiales par rapport aux résultats de l'enquête de terrain.

La détection des peuplements fortement touchés par les tempêtes de 1999 ne semblent pas être un problème. En revanche, de nombreux auteurs ont souligné la difficulté de saisir les dégâts faibles et diffus, soit pour des raisons de méthode d'enquête, soit pour des raisons de faible adéquation des capteurs à l'objet d'investigation. Il est donc difficile de comparer les résultats obtenus dans cette étude avec ceux de l'IAURIF (IAURIF, 2000, p.5) et de l'IFEN (Carouille, 2002, p.10) en raison de la non prise en compte, par ces organismes, des dégâts affectant moins d'un hectare de superficie.

Si les forts dégâts sont bien perçus, après un délais de un à huit mois (Stach *et al.*, 2002, p.142-143), reste le problème de l'objectif et de l'opérationnalité, car avec des méthodes d'investigations par photo-interprétation, classification, segmentation, etc., de données aéro-spatiales qui « oublient » facilement la moitié du volume des chablis (Carouille, 2002, p.10), il convient de rester prudent quant aux applications éventuelles.

Que Gérard Vallée pour son accueil et ses conseils, Francis Bertrand et l'IFEN pour les données Landsat, les étudiants de Paris 8 et tous ceux qui ont collaboré à la collecte des données de terrain : Sultan Aralioglu, Anna Godard, Lisa Godard, Alexandra Grandmoujin, Stéphane Guillez, Kim Dae Young, Mickael John-Pierre, Brice Oyharçabal, ainsi qu'Annick Sevestre et l'atelier de cartographie de Paris IV et Bertrand Julien-Laferrière du Centre de biogéographie, trouvent ici la marque de ma gratitude et soient remerciés pour leur contribution à cette étude.

6. Bibliographie

- Anonyme, L'Île-de-France cartographie sa tempête, *Géomatique Expert*, n°4, mai, 2000, p. 20-24.
- Amat J.-P., Hotyat M., *Étude du couvert forestier par les images Landsat : bilan et évaluation sur la forêt domaniale de Fontainebleau*, Travaux de l'Institut de Géographie de Reims, n°57-58, 1984, p.103-135.
- Amat J.-P., Godard V., Hotyat M., Bilan des dégâts : Milieu, gestion, histoire et scénarios de reconstitution dans les sylvosystèmes touchés par les tempêtes de décembre 1999, GIP-ECOFOR, Min. agriculture, 2003, 132 p.
- Bazire P., Gadant J., *La forêt en France*, Paris, La documentation française, Notes et études documentaires n°4928, 1991, 142 p.
- Caroulle F., Les forêts françaises après les tempêtes de décembre 1999. Seine-et-Marne, Nogent-sur-Vernisson, IFN, 2002, 21 p.
- Collectif, *Aide-Mémoire statistique*, Montreuil, CISIA.CERESTA, 1995, 286 p.
- Collet C., *Systèmes d'information géographique en mode image*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, Col. Gérer l'environnement, n°7, 1992, 186 p.
- Dwyer E., Pasquali P., Holecz F., Arino O., Mapping Forest Damage Caused by the 1999 Lothar Storm in Jura (France), Using SAR Interferometry, *Earth Observation Quarterly*, n°65, March, 2000, p.28-29.
- Eastman J.-R., *IDRISI Guide to GIS and Image Processing*. Volume 2. Worcester (MA), Clark Labs, 2001, 144 p.
- Godard V., L'évaluation des paysages : empirisme ou probabilisme, question d'objectif. Une réflexion sur le plan d'échantillonnage accompagnée d'un exemple d'évaluation des dégâts tempétueux pris dans la forêt de Conches-Breteuil (Eure), in : *L'évaluation du paysage : une utopie nécessaire ? À la recherche d'indicateurs / marqueurs pluridisciplinaires*. Montpellier 15 et 16 janvier 2004., à paraître, 9 p.
- Herrmann A., Fellah K., Fraipont P. de, Yésou H., Mapping Forest Damage Using SAR Coherence Product in Northeastern Part of France, *Earth Observation Quarterly*, n°65, March, 2000, p.30.
- Hudson, W.D., Ramm C.W., Correct formulation of the Kappa coefficient of agreement, *Photogramm. Eng. Remote Sens.* Vol. 53, num. 4, April, 1987, p. 421-422.

- IAURIF, Cartographier la tempête. 2 - La tempête en chiffres, *Note rapide sur l'environnement*, n°25, mai 2000, p. 1-6.
- IFN, But et méthodes de l'inventaire forestier national, Paris, Ministère de l'agriculture, Service des forêts, 1985, 67 p.
- IFN, Les tempêtes de décembre 1999. Bilan national et enseignements, *L'If*, n°2, décembre 2003, p. 1-8.
- Jaubert G., La tempête du 26 décembre 1999 : effet sur les peuplements forestiers et sur la gestion sylvicole. Application au Groupe technique de Gretz-Armainvilliers, Créteil, Université Paris XII, mémoire de Maîtrise, 2001, 163 p. (+ annexes).
- Lallement B., L'apport de l'analyse spatiale dans la compréhension des dégâts forestiers causés par la tempête de 1999. Etude du groupement forestier de Conches-Breteuil (Eure), Paris, Université Paris I, mémoire de Maîtrise de géographie, 2002, 79p.
- Lemée G., Dynamique de fermeture par régénération et évolution morphométrique du hêtre dans les vides d'une forêt non exploitée (réserves biologiques de la forêt de Fontainebleau), *Bulletin d'Ecologie*, XVIII, 1987, p. 1-11.
- Maire C., Évaluation de l'apport des données optique et radar de Très Haute Résolution (THR) pour la cartographie des dégâts de tempête en milieu forestier. *Revue XYZ*, n°93, 2002, p. 28-35.
- Meyer-Roux J., Sigman R., Craig M., Ozga M., « Estimation des superficies à l'aide des données LANDSAT et de l'enquête TER-UTI », *Cahiers de Statistique Agricole*, n° 5/6, septembre-octobre, 1981a, p. 11-17.
- Meyer-Roux J., Sigman R., Craig M., Ozga M., « Cartographie et statistique en télédétection », *Cahiers de Statistique Agricole*, n° 6/6, novembre-décembre, 1981b, p. 9-14.
- Morineau A., Alujat-Banet T., *Analyse en composantes principales*, Montreuil, CISIA CERESTA, 2000, 150 p.
- Nakache J.-P., Confais F., *Méthodes de classification. Avec illustrations SPAD et SAS*, Montreuil, CISIA CERESTA, 2000, 192 p.
- ONF/ED, Forêt domaniale de Fontainebleau, Carte des essences, 1997, éch. graph. : 1/100 000
- Rosenfield, G.H., Fitzpatrick-Lins, K., « A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. », *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 52, num. 2, February, 1986, p. 223-227.
- Stach N., Deshayes M., Le Toan T., Evaluation des dégâts de tempête par télédétection satellitaire : Aspects méthodologiques et opérationnels – 1^{ère} phase, GIP-ECOFOR, Min. agriculture, 2002, 148 p. + annexes.