

**Centre de Biogéographie-Écologie
FRE 2545 CNRS / ÉNS LSH LSH - Lyon
45 rue de France, 77 300 Fontainebleau**

Jean-Paul AMAT, Vincent GODARD, Micheline HOTYAT

Réponse à l'appel à propositions du ministère de l'Agriculture et de la Pêche

**Recherches forestières à conduire à court terme
suite aux tempêtes de fin décembre 1999**

BILAN DES DÉGÂTS :

**MILIEU, GESTION, HISTOIRE
ET SCÉNARIOS DE RECONSTITUTION**

**DANS LES SYLVOSYSTÈMES TOUCHÉS PAR
LES TEMPÊTES DE DÉCEMBRE 1999**

Décembre 2003

Remerciements :

Gérard VALLÉE pour son accueil et ses conseils

Les étudiants de P8 et tous ceux qui ont collaboré à la collecte des données de terrain : Sultan ARALIOGLU, Antoine BOUFFANDEAU, Josselin BURHIG, Quentin BURHIG, Anna GODARD, Lisa GODARD, Alexandra GRANDMOUJIN, Stéphane GUILLEZ, KIM Dae Young, Mickael JOHN-PIERRE, Brice OYHARÇABAL

Philippe JAMET, directeur du pôle Géo-environnement, École nationale supérieure des Mines de Paris (ENSMMP)

Jean-Marc GOUGIS, chef du service départemental ONF de Seine-et-Marne

Édouard JACOMÉ, chef de groupe technique ONF de Fontainebleau

Denis RENAUDET, chef de groupe technique ONF de Gretz Armainvilliers.

Éric BOURLARD, technicien ONF mis à la disposition de la forêt des Hospices civils de Lyon (massif de Breteuil, Eure).

Philippe DAVID, expert forestier

Éric HINCELIN, ingénieur au Centre régional de la Propriété forestière (CRPF) de Normandie, délégation d'Evreux

Joël BOULIER, Université de Paris 1

Annick SEVESTRE et l'atelier de cartographie de Paris IV

Bertrand JULIEN-LAFERRIÈRE, Centre de biogéographie

ARGUMENTAIRE

Le projet de recherches que nous présentons nous semble répondre aux deux principaux objectifs de l'appel d'offres, à savoir : "observer les dégâts pour en tirer des enseignements" et "anticiper sur les questions liées aux travaux de reconstitution". La nature et l'amplitude des dégâts mesurent la violence de la catastrophe. Pour une forêt donnée, celle-ci dépend de la sensibilité, ou vulnérabilité, de cette forêt à l'"aléa tempête". Cette sensibilité résulte d'interactions complexes, actuelles et passées, entre des faits de nature et des faits de société. Les faits de nature sont portés par les milieux d'accueil et leurs composantes physiques et biologiques, comme le cortège dendrologique régional, explicités, lorsqu'ils existent, dans les catalogues de stations. Les faits de société se matérialisent surtout par les deux paramètres du cortège dendrologique actuel et des structures de peuplement qui sont les, conséquences plus ou moins directes des modes de gestion passés et des enjeux sociétaux qui pèsent sur la forêt.

Ce projet répond aux préoccupations du donneur d'ordres dans le recensement et l'étude des dégâts et à l'exigence d'une évaluation de ces dégâts préalable aux travaux de réhabilitation des peuplements. Il explore les axes de réflexion suivants :

- Evaluer le poids du milieu physique. Ont été présentées et analysées les composantes morpho-pédologiques. Ainsi la carte des épaisseurs de formations superficielles permet de spatialiser le réservoir hydrique et les variables qui influent sur les modes d'exploration et de typologie des systèmes racinaires. L'objectif est de définir les variables discriminantes, de proposer leur utilisation pour la typologie des stations forestières.
- Préciser le rôle des structures des peuplements forestiers et des lisières (typologie structurale et composition floristique), donc des contacts et des écotones, dans l'intra-forestier comme aux marges des milieux ouverts.
- Evaluer le poids de l'histoire sociétale dans les caractères des peuplements soumis à la tempête. Cette histoire est introduite surtout par le biais des documents de gestion forestière et des corpus iconographiques.

Sur le plan méthodologique, données du milieu, données de gestion et organisation des paysages sont paramétrées par l'intégration et l'analyse combinatoire, sous Système d'information géographique, de cartes thématiques de l'analyse paysagère, topographiques, géologiques, pédologiques, environnementales.

I – CHOIX ET PRESENTATION DES FORETS ÉTUDIÉES

Les forêts étudiées se situent dans l'arc du Bassin parisien, le long d'un transect ouest-est suivi par la tempête, de la Normandie à l'Ile-de-France. Ce sont le massif forestier de Conches-Breteuil dans l'Eure, les forêts d'Armainvilliers et de Fontainebleau en Ile-de-France. A l'origine du projet étaient incluses des forêts du massif de l'Argonne, entre Champagne et Lorraine. L'importance des développements de la recherche sur les forêts occidentales, et la mise en place des équipes correspondantes, nous les ont fait abandonner.

Les variables discriminantes du choix relèvent du 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), de la propriété forestière (échantillons dans forêts privées, communales et domaniales) et de la gestion sylvicole (essences, régimes, types de peuplements, conduite sylvicole).

A – LE CHOIX DES MILIEUX PHYSIQUES

1. Milieux physiques homogènes

1.1. Le massif forestier de Conches-Breteuil (Eure, Haute-Normandie)

Le vaste massif forestier de Conches-Breteuil se déploie sur près de 15.000 hectares, affectant la forme d'un quadrilatère limité par les deux vallées de la Risle et de l'Iton, et à l'est, par les terroirs ruraux de la Plaine de Saint-André. Il est composé de forêts généralement aménagées en taillis sous futaie et percées de nombreux chemins et layons.

Trois secteurs forestiers sont étudiés dans ce massif, la forêt des Hospices civils de Lyon (1 113 ha), propriété des Hospices civils de Lyon, le groupement forestier de Souvilly (1 142 ha), propriété du comte de Béarn et le secteur du Huttier (1 300 ha), appartenant à un syndicat de propriétaires.

1.1.1. Géomorphologie

Les trois unités forestières occupent un plateau d'altitude moyenne 170-180 m, légèrement incliné vers l'est, marqué par le léger encaissement du vallon sec du Lème.

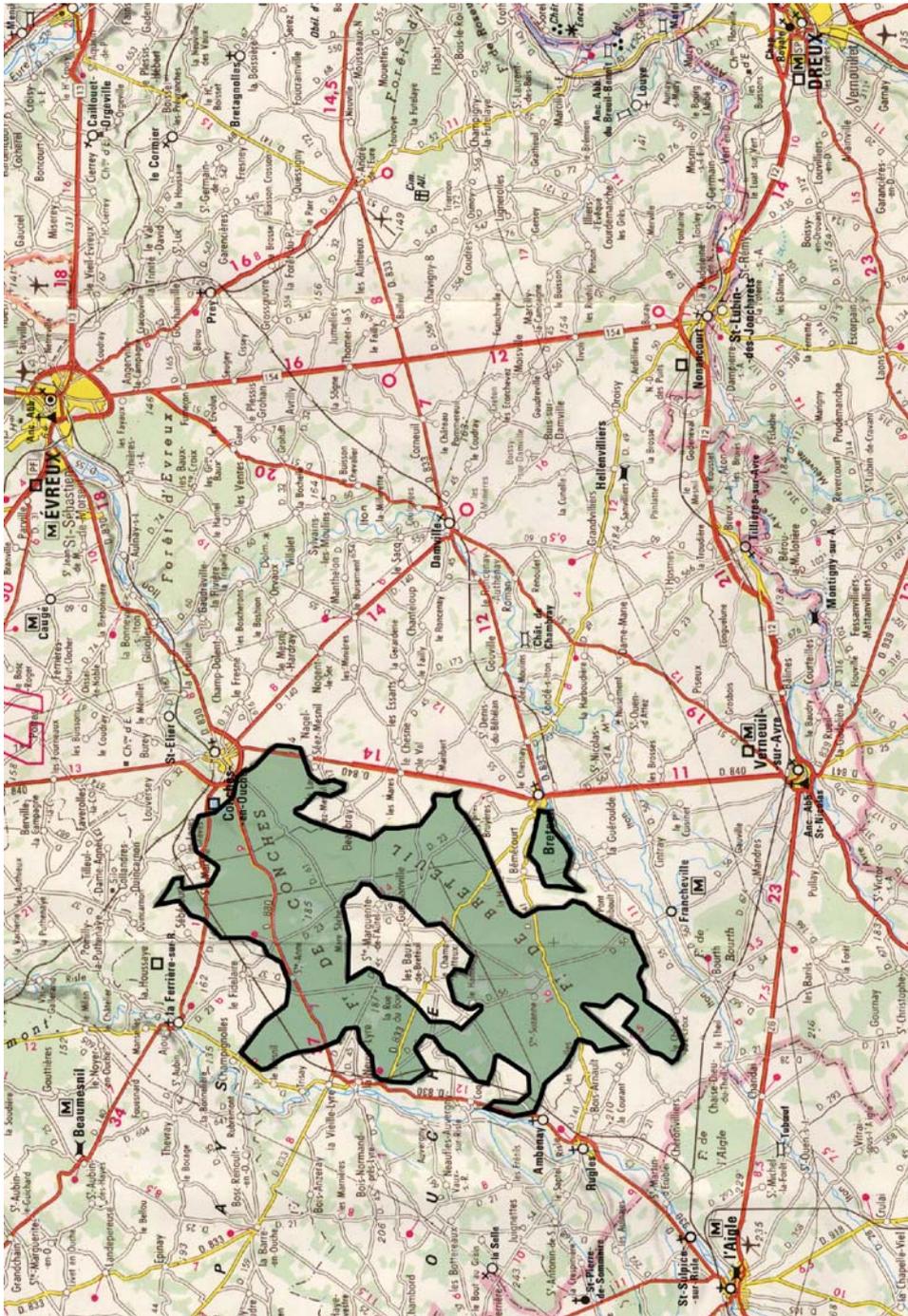
Le substratum de craies dominantes est daté du Crétacé supérieur à la limite Turonien-Cénomaniens. Le pendage général se relève vers le sud-ouest. Trois légères déformations tectoniques du substrat, d'orientation moyenne NE-SW, suivent un probable accident qui va de Bonneville-sur-Iton à Conches, puis à la vallée du Lème. Ces trois déformations sont situées, l'une en forêt de Breteuil à l'ouest de Bémécourt, l'autre à Beaubray et la dernière au sud-est de Conches. Elles n'influent pas sur la topographie générale.

Les formations superficielles qui sous-tendent la surface topographique sont diversifiées.

- **Une formation résiduelle à silex** inclus dans une matrice argileuse ou argilo-sableuse (Rs) recouvre d'un manteau épais et continu les terrains crayeux du Crétacé supérieur. Masquée localement par les sables stampiens ou des limons, biefs et limons à silex, elle affleure largement sur les bords des plateaux et sur les versants de vallée où elle est souvent solifluée. Cette formation représente 40 % de la surface forestière du Pays d'Ouche.

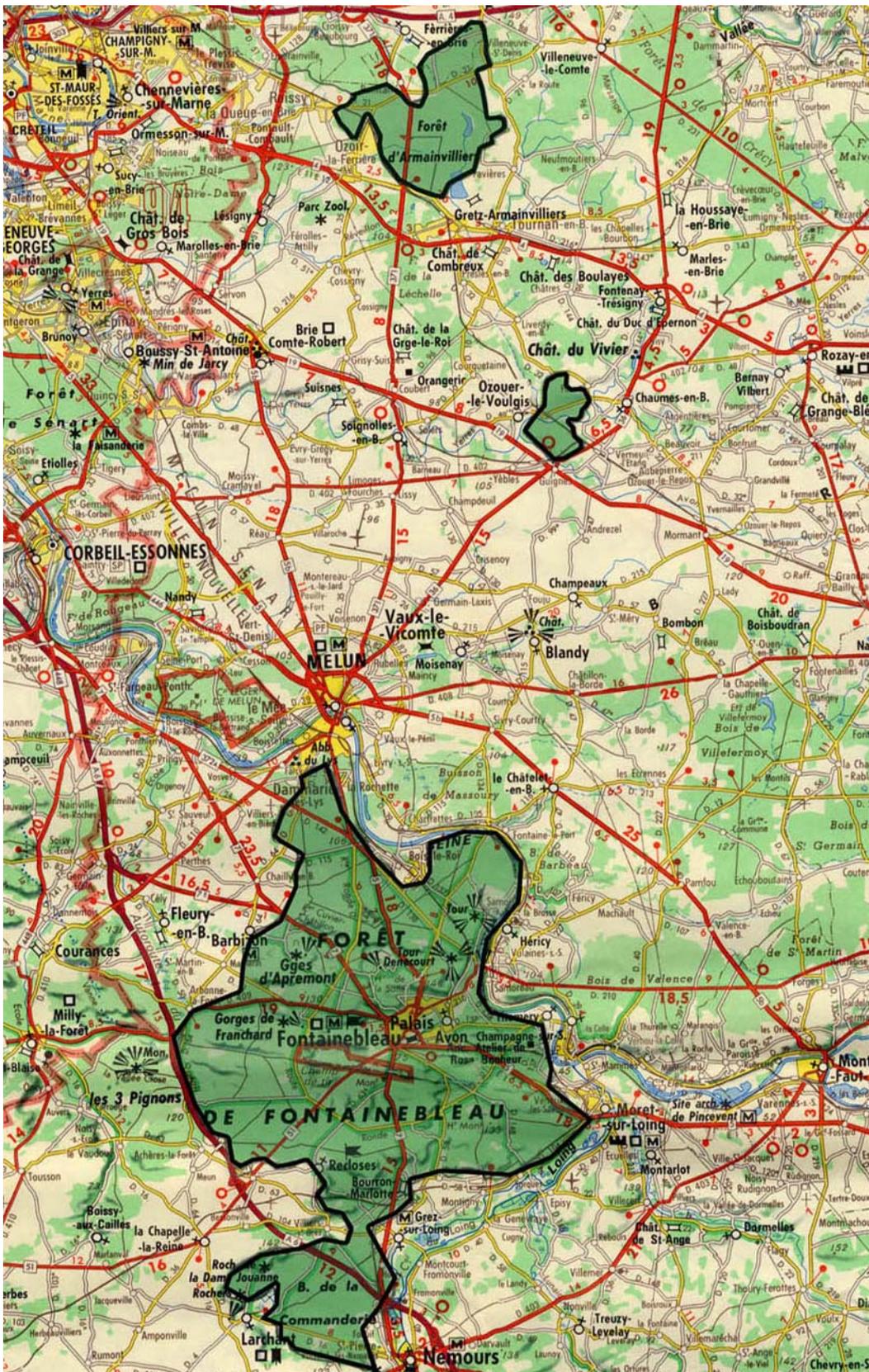
- **Une formation composite** à fragments de silex dans une matrice principalement argilo-sableuse (biefs) ou limoneuses (limons à silex) (B-LPs), épaisse de un à plusieurs mètres, couvre de vastes superficies. Cette formation représente 30 % de la surface forestière du Pays d'Ouche.

Figure 1 – Carte de localisation des forêts étudiées : Massif de Conches-Breteuil



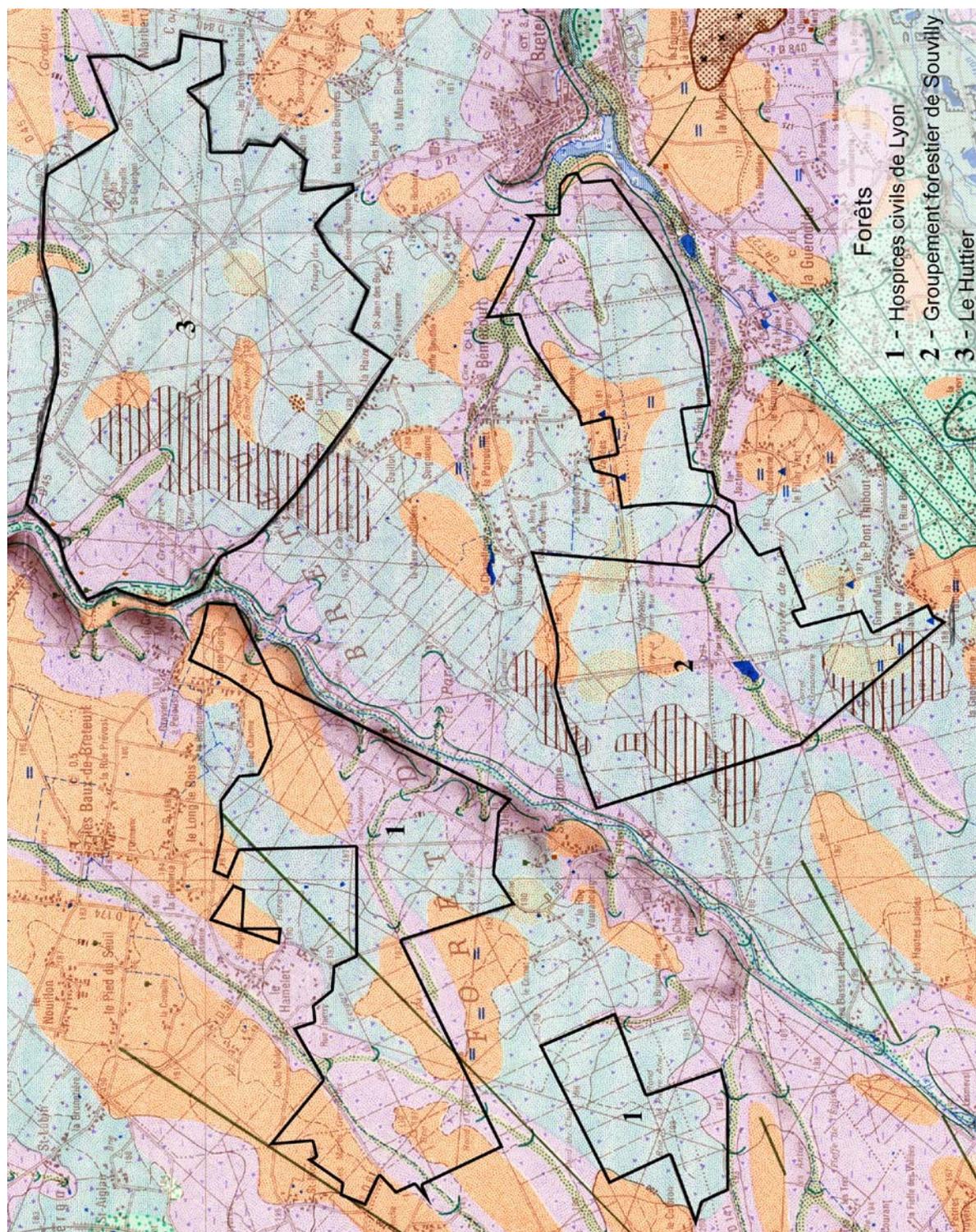
Source : fond IGN, Série rouge au 1/250 000, n°102

Figure 2 – Carte de localisation des forêts étudiées : Forêts franciliennes



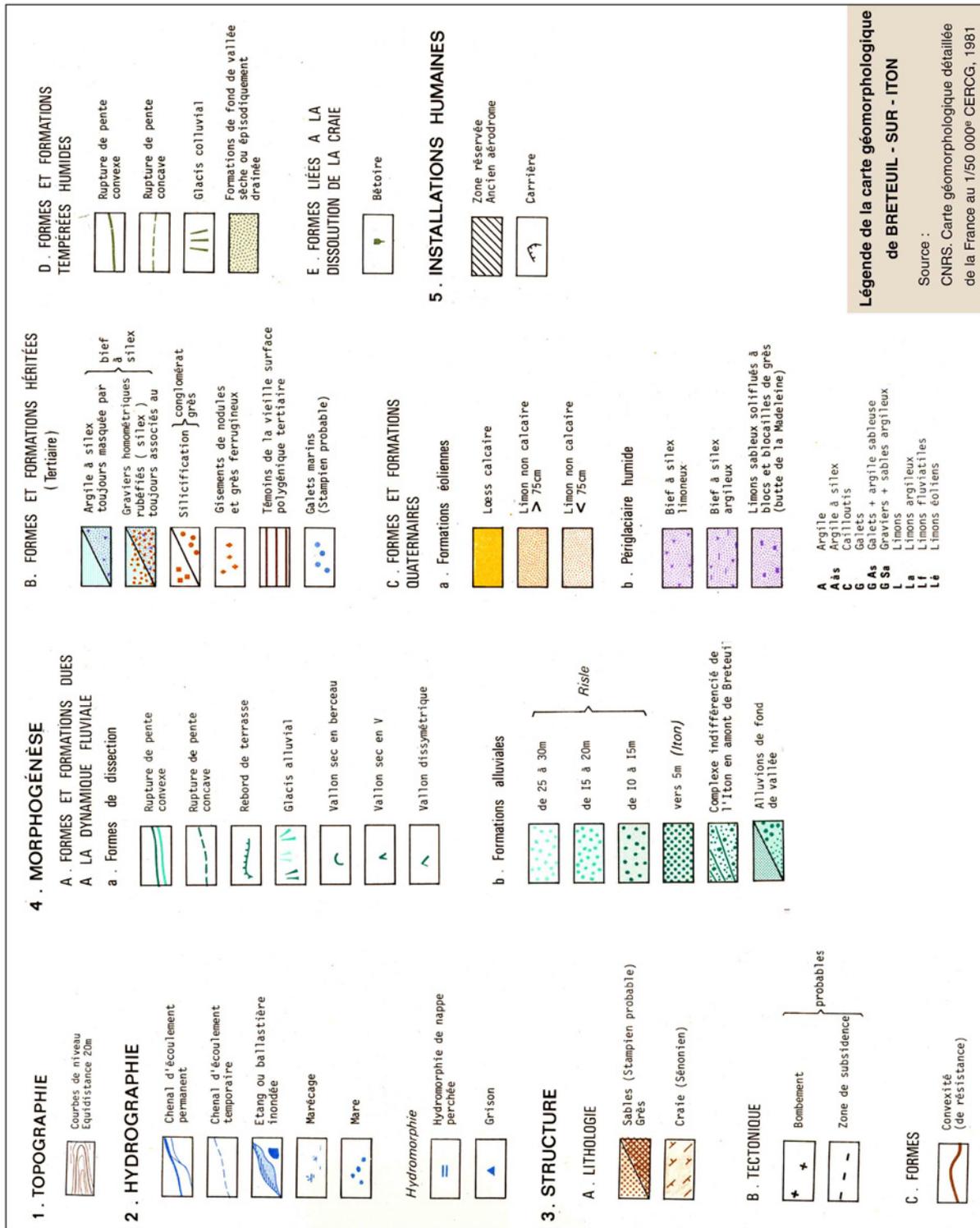
Source : fond IGN, Série rouge au 1/250 000, n°103

Figure 3 – Les forêts étudiées et la géomorphologie à Conches-Breteil



Source : Cartes géomorphologiques du CNRS, Breteil-sur-Iton 1/50 000

Légende la carte géomorphologique de Breteuil-sur-Iton



Légende de la carte géomorphologique de BRETEUIL - SUR - ITON
 Source :
 CNRS. Carte géomorphologique détaillée de la France au 1/50 000^e CERCG, 1981

Source : Cartes géomorphologiques du CNRS, Breteuil-sur-Iton 1/50 000

Des limons indifférenciés, souvent argileux (LP) : Ces dépôts éoliens (lœss) mis en place par les vents dominants d'ouest et de sud-ouest au cours des périodes froides du quaternaire présentent des affleurements limités et disséminés. En général, ces limons sont anciens, argileux, de couleurs variables : brun-rougeâtre, brun-jaune ou grises. Les couvertures sont minces, toujours inférieures à 5 mètres d'épaisseur. Ces limons représentent 5 % de la surface forestière du pays d'Ouche.

Des colluvions indifférenciées de versants et vallons secs ont été mises en place par le ruissellement et la solifluxion sur les versants et les fonds des vallons aujourd'hui secs, parfois de vallons drainés par de faibles écoulements d'eau, comme le ruisseau du Lème. Ces colluvions très caillouteuses contiennent de nombreux fragments de silex gélivés, dans une matrice tantôt limoneuse, tantôt argileuse ou argilo-sableuse. Leur épaisseur, mal connue, varie de quelques décimètres à plusieurs mètres. Ces colluvions représentent 2 % de la surface forestière du pays d'Ouche.

L'extrait de la carte géomorphologique de Breteuil-sur-Iton (*cf.* Figure 3), coupure de la carte géomorphologique de la France au 1/50 000, publiée durant les années 1970-1990 par le CNRS est fondée sur la représentation de la nature et des épaisseurs des formations superficielles. Elle est très intéressante pour la caractérisation des potentialités des milieux physiques. Elle offre ainsi des données pour l'estimation des réservoirs hydriques et donc pour le calcul des bilans d'eau.

1.1.3. Les groupements végétaux

- **La hêtraie calcicole** est présente sur les versants fortement érodés à sols carbonatés.

- **La hêtraie chênaie mésotrophe**, qui occupe en Haute-Normandie une surface importante, colonise des milieux très variés, des colluvions limono-argilo-calcaires aux formations à silex en passant par des limons et certaines alluvions anciennes.

- **Les forêts acidiphiles :**

- **La hêtraie chênaie acidiphile à houx** s'observe sur des sols acides, dégradés ou non, mais variés : limons, formations à silex, alluvions anciennes.

- **Les chênaies acidiphiles** sont relativement rares en Haute-Normandie.

- **Les chênaies climaciques** se trouvent dans les zones moins arrosées ou sur un sol particulièrement sec, superficiel, rocailleux ou sableux.

Le hêtre perd alors sa vigueur et seul le chêne subsiste.

1.1.4. L'approche climatique par la méthode du bilan d'eau stationnel

1.1.4.1. Données générales

La région du Pays d'Ouche connaît une pluviosité assez faible mais bien répartie sur l'année. A la station de Breteuil-sur-Iton les précipitations moyennes annuelles (période 1951-1980) sont de 622 mm, tombant en 118 jours. Novembre, mois le plus arrosé, reçoit 72 mm ; à l'opposé, Avril en reçoit 42. Avec 150 mm cumulés (soit 24 % du total annuel), l'été (juil., août et sept.) n'est pas déficitaire. La température moyenne annuelle est de 10,2°C ; l'amplitude est réduite, juillet atteint 17,6° et janvier 2,9°. L'humidité atmosphérique est forte. Les valeurs de l'indice d'aridité de Martonne sont de 31 pour l'indice annuel ($A = P / T+10$), de 24 pour le semestriel ($A_s = P \times 2 / T+10$), soit un bioclimat subsec. L'irrégularité interannuelle est notable. Sur les 14 années 1985-1998, la moyenne des précipitations est de 627 mm ; 1994, année la plus arrosée, reçut 793 mm (+ 1,6 écart-type), 1996, la moins humide, 472 mm (- 1,4 écart-type) (GUIOT, 2001, pp.15-18).

L'ETP calculée pour la station de Breteuil (voir *infra* fiche de bilan d'eau) est de 637 mm. Le déficit climatique annuel, ETP P, est de 15 mm pour la période trentennale, 10 mm pour la période

1985-1998. L'année 1996 est très déficitaire avec 165 mm (soit 35 % de l'abat) alors que 1994 a connu un surplus de 156 mm. Par contre, si l'on ne prend plus justement en compte que l'ETP de la saison végétative, soit 556 mm, les valeurs sont respectivement : 66 mm, 71 mm, 84 mm, + 237 mm. Ces contrastes montrent quelle fonction essentielle assume la réserve en eau des sols et, en terme de ressource du milieu, les volumes du réservoir offert par la couverture pédologique. Ils laissent supposer le rôle déterminant des conditions stationnelles dans l'alimentation des peuplements forestiers. Pour affiner la connaissance des caractères bioclimatique à l'échelle stationnelle il a été fait appel au bilan d'eau stationnel.

1.1.4.2. Approche par le bilan d'eau stationnel

Ce sont les disponibilités hydriques, thermiques et radiatives du climat régional et de ses variantes mésologiques qui créent la potentialité bioclimatique du milieu physique. Pour évaluer celle-ci, la méthode du bilan hydrologique est bien adaptée aux impératifs d'échelle spatiale (FORTIN et SEGUIN, 1975). Le réservoir du sol abrite la partie de la réserve d'eau que la plante utilise pour pallier les éventuels déficits pluviométriques. Le bilan d'eau stationnel (BES), établi pour tout sylvofaciès, donne l'état mensuel, la dynamique intra-annuelle et le bilan saisonnier de la réserve en eau disponible pour les plantes. Le calcul du BES évalue le déficit hydrique stationnel, paramètre intégrateur qui, mesurant l'éventuelle déficience de l'offre hydrique, rend compte du potentiel bioclimatique du sylvofaciès (HOUZARD, 1984, AMAT, 1999). Les végétaux commencent à souffrir de la sécheresse bien avant que la RU soit sur le point d'être épuisée et la réserve utilisée (Rut, voir annexe) est estimée à 40 à 70 % de la RU. La différence RU-RFU est aussi appelée "la réserve de survie".

Le bilan d'eau a été établi pour le poste météorologique de Breteuil-sur-Iton (période 1951-1980) et celui d'Evreux (année 2000). La station météorologique de Trappes (Yvelines) a fourni les données d'insolation permettant le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) puis de l'évapotranspiration réelle (ETR). Des coefficients d'ajustement des variables radiatives, thermiques et hydriques aux conditions stationnelles des forêts étudiées permettent de passer des données de tout réseau de mesures (Météorologie nationale, services agricoles et forestiers...) aux sites des sylvofaciès enquêtés.

Les principes de la méthode de calcul du bilan d'eau stationnel sont présentés en annexe 1.

1.1.4.3. Les résultats

La comparaison des barrettes de classes de déficit de Breteuil (*cf.* Tableau 37 des bilans d'eau stationnels, Annexe 1) montre deux comportements. D'abord l'accroissement sensible des déficits entre des R de 150 mm et de 50 mm : celui de la PAVP (période d'activité végétale potentielle, soit tous les mois dont la température moyenne dépasse 7° C) passe de 105 à 174 mm (+ %), celui de l'été, de 86 mm à 133 mm (+ %) ; ensuite l'allongement de ce déficit, passant de 4 à 5 mois pour les classes déficient et plus. Les biofaciès se différencient nettement selon la réserve hydrique, passant de déficient à très sec.

L'IPB (indice de potentialité bioclimatique) pour les forêts du secteur passe de 395 (classe faible) pour une RU de 150 mm à 282 (très faible) pour 50 mm. En terme de production ligneuse, l'équivalence avec les valeurs de l'indice CVP donnent des valeurs de 8,5 à moins de 6,5 m³/ha/an.

1.1.4.4. L'intérêt de la méthode des bilans d'eau stationnels

Tableau 1 - Découpage bioclimatique pour les essences feuillues, Normandie, R = 100 mm

Bioclimat, R=100	H%	IPB	autécologie	Essences												
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
humide	< 3	500-550	hygrophiles	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	< 3	450-500	à	O	O	O	O	O			O	O	O	?	?	
	3-10	420-500	mésos-hygrophiles				O	O	O			O	O	O	?	
de transition	10-15	400-520	Mésos-hygrophiles				O	O				O	?	O		
	14-18	460-500	à				O	O				O		O		
	15-20	350-460	mésophiles				?	?				O		O		
sec	20-25	350-450	tolèrent les												O	
	25-30	< 350	ambiances sèches													
très sec	> 30	< 320	xérophiles													

Essences : 1 Châtaignier, 2 C. pédonculé, 3 C. sessile, 3 C. rouge d'Amérique, 4, Erable sycomore, 5 Frêne, 6 Hêtre, 8 Merisier, 9 Noyer commun, 10 N. d'Amérique, 11 Peupliers.

Potentiel de production forestière d'un site : O, généralement convenable ; ?, possible, mais à apprécier selon autres facteurs du climat.

Le Centre régional de la propriété forestière de Normandie et le département de géographie de l'université de Caen conduisirent en 1989 une étude d'application de la méthode des bilans d'eau stationnels au diagnostic bioclimatique des stations forestières de Basse-Normandie (Collectif, 1994). Le catalogue de stations réalisé intègre le climat aux autres facteurs de production. Il offre une aide à la décision pour les orientations régionales de production et c'est un document de travail pour l'établissement de diagnostics de potentialités stationnelles. Le découpage de l'espace en classes de valeurs selon la réserve utile du sol est associé aux tableaux d'adaptation des essences forestières au climat donnés par le croisement de l'indice de potentialité bioclimatique, du déficit hydrique et de l'autoécologie des essences (cf. Tableau 1 et Tableau 2).

Cette démarche a permis de définir des *zones d'équipotentialités bioclimatiques* puis de les cartographier à l'échelle régionale.

Tableau 2 - Découpage bioclimatique pour les essences feuillues, Normandie, R = 50 mm

Bioclimat, R=50	H%	IPB	autécologie	Essences												
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
humide	< 5	500-550	hygrophiles	O	O	O	O	O	?			O	O	O	O	?
	< 5	450-500	à	O	O	O	O	O	?			O	O	O	?	
	5-10	400-510	mésos-hygrophiles			?	O	O	O			O	O	O		
de transition	10-15	490-520	Mésos-hygrophiles				O	O				O	?	O		
	9-15	390-460	A									O		O		
	15-20	350-460	Mésophiles									?		?		
sec	20-25	320-460	Tolèrent les									?				
	25-30	290-390	Ambiances sèches													
très sec	30-35	250-290	Xérophiles													
	> 35	< 250														

Même légende que le tableau précédent.

Travaux en cours :

Une carte des réserves hydriques forestières est en cours de réalisation, établie par le croisement des données morpho-pédologiques fournies par la carte géomorphologique de Breteuil-sur-Iton et des tableaux de bilan hydrique pour des réserves de 150, 100, 75 et 50 mm.

Une telle démarche ouvre des perspectives dans le cadre de la reconstitution des peuplements abattus par les tempêtes mais aussi dans les réflexions de prospective sur les aménagements et resitue la vulnérabilité forestière dans un contexte de risques liés aux éventuelles modifications des aléas climatiques.

Le seul exemple, durant l'été 2003, d'une vague de chaleur conjuguée à la sécheresse estivale a montré l'importance de la Ru.max : sur les grands versants boisés de Bourgogne ou des Préalpes les arbres desséchés soulignaient les lignes de sols minces sur niveaux calcaires sub-affleurants.

Soulignons en particulier que les modifications du régime hydrique sont en relation avec :

- l'accroissement de la durée de la période d'activité végétale potentielle
- le décalage de la répartition saisonnière des précipitations vers la période estivale
- l'augmentation de l'ETP et la possibilité corrélative d'augmentation de l'ETR. Les recherches peuvent ainsi s'orienter vers :
 - La construction, dans les catalogues de stations forestières, des profils de RU, Rutot et RUmax à l'échelle stationnelle,
 - La compréhension des relations entre réserves en eau et arbres actuellement installés
 - L'amélioration des équilibres entre les ressources en eau et les essences objectif, indigènes ou exotiques.

1.2. Forêt domaniale d'Armainvilliers

La forêt domaniale d'Armainvilliers, à une trentaine de kilomètres à l'est de Paris, couvre 1 451 ha des 4 300 ha du massif forestier de Ferrières – Armainvilliers. Elle s'étend, dans le département de Seine-et-Marne, sur les communes de Chevry-Cossigny, Gretz-Armainvilliers, Favières, Ozoir-la-Ferrière, Pontcarré, Roissy-en-Brie et Croissy-Beaubourg. Appartenant à la « Ceinture verte » du Plan vert de la région Ile-de-France, cette forêt est au cœur d'un système spatial urbain - périurbain - rural. L'explosion, ces dernières décennies, du milieu périurbain a entraîné une forte augmentation des pressions urbaines, économiques et écologiques. La demande sociale sur la forêt s'est renforcée et élargie.

1.2.1. Géomorphologie, hydromorphie et pédologie

Les milieux physiques de la forêt d'Armainvilliers présentent une grande homogénéité. Sur un plateau presque parfait légèrement incliné du nord au sud la pente moyenne est de 2 pour mille, pour une amplitude de 9 m, entre 115 et 106 mètres d'altitude. Les seuls éléments qui affectent, faiblement, ce relief sont les nombreuses mares et fossés et quelques monticules, vestiges d'aménagements militaires de campagne datant de la guerre de 1870. L'absence de pente pose de sérieux problèmes de drainage ; le massif est quadrillé par un réseau de drains.

Cette surface tabulaire porte des placages de limons des plateaux (LP des cartes géologiques) dont l'épaisseur varie de 1,50 à 5 mètres. Ce complexe d'argiles et de sables quartzux renferme de nombreuses concrétions calcaires et ferrugineuses. Les limons reposent sur l'assise du calcaire de Brie (Stampien inférieur, d'épaisseur 10 mètres) aux couches supérieures très décalcifiées en argiles à meulière. Le calcaire n'a ainsi aucune influence sur les caractères du milieu (absence des calcicoles dans les cortèges floristiques). Le complexe sannoisien et ludien des Argiles vertes et Marnes blanches et bleues forme la base de la série sédimentaire, épaisse d'une

cinquantaine de mètres. Il assure l'existence d'une nappe phréatique pérenne dite "réservoir oligocène".

L'alternance de niveaux perméables et imperméables détermine l'économie de l'eau et l'écologie forestière, sur ce plateau sans écoulement, est dominée par les phénomènes saisonniers d'hydromorphie. De la mi-octobre à la fin mars, le niveau d'eau est très élevé dans les rus, les fossés et les mares ; en juillet et en août l'eau est quasiment absente, le support argileux est induré, marqué par de nombreuses et souvent spectaculaires fentes de dessiccation. Les formations superficielles, argileuses et peu perméables, induisent la présence quasi généralisée d'un horizon illuvial Btg de sol lessivé hydromorphe, compact et imperméable, qui apparaît toujours à moins de 40 cm de la surface. Ainsi, au lendemain immédiat de la tempête la nappe apparaissait dans toutes les cuvettes de chablis, à une profondeur constante de 20 à 30 cm en moyenne.

Le complexe pédologique associe trois types de sols suivant la profondeur d'apparition des signes d'hydromorphie. Les sols bruns lessivés hydromorphes à humus mull à mull-moder et sols lessivés acides hydromorphes à humus moder avec une nappe à partir d'une trentaine de centimètres de profondeur. Lorsque l'hydromorphie apparaît dès la surface de l'horizon A1, voire dans l'humus, les sols sont hydromorphes à pseudo-gley à humus mull à moder. Dans ce type de milieux les tempêtes de 1990, qui avaient affecté uniquement les résineux (50 % abattus sur une cinquantaine d'hectares), avaient révélé la sensibilité au vent des quelques peuplements de Douglas plantés hors station. A la fin de décembre 1999 les sols étaient presque ennoyés, sous l'effet d'une combinaison de facteurs : absence de pente topographique, climat particulièrement humide des deux dernières années, insuffisance du réseau de drainage. Les conditions stationnaires déterminent la durée de la saturation en eau. Quoi qu'il en soit, l'engorgement est constant de l'automne au printemps, parfois toute l'année. Notons aussi qu'au risque de dégradation des sols hydromorphes s'ajoute celui de l'acidification en cas d'ouverture de clairières.

1.2.2. Climat

Le climat, de type tempéré océanique, est doux mais relativement sec. Les données des deux postes de Ferrières (ONF) et de Favières couvrent les années 1980 à 1998. Les précipitations moyennes sont respectivement de 719 et 744 mm/an. Le maximum a été enregistré en 1981 avec 927 mm. Des déficits importants ont marqué les années 1990, avec 579 mm et surtout 1996, avec 524,7 mm. La température moyenne annuelle est de 10,7°C sur le massif ; février a une moyenne de 3,5° et juillet de 24,1°C. Les années 1998 et 1999 ont été particulièrement pluvieuses et fraîches. L'indice d'aridité de Martonne est de 34,7 pour Ferrières, 36 pour Favières (à rapprocher de la valeur 31 pour le massif de Conches).

Une sécheresse biologique apparaît régulièrement au mois d'août, mois le plus sec avec février. Le mois de décembre est le plus arrosé. Une partie de l'abat est ainsi perdu pour les plantes et alimente l'hydromorphie. L'ETP Thornthwaite annuelle est de 670,3 mm (poste de Ferrières), soit un excédent de précipitations de 48,7 mm. Mais ramené à la saison végétative, c'est un déficit climatique de 158,3 mm qui apparaît. La réserve en eau R doit palier le déficit des précipitations (l'étude des bilans d'eau stationnels est en cours).

Les deux années 1998 et 1999 ont été marquées par des précipitations supérieures à la moyenne et l'automne 1999 fut particulièrement arrosé. Le mois de décembre a enregistré un record de pluie (Anonyme, 2000). Les lames d'eau ont été de 193 mm à Ferrières pour une moyenne mensuelle départementale de 64 mm. L'année ne fut pas pourtant la plus humide du dernier demi-siècle. Ainsi « Fontainebleau, pourtant poste "humide", n'atteint pas les 1 000 mm qu'il avait largement dépassés en 1958 » (Anonyme, 2000, p.7 les pluies furent inégales du 1^{er} au 6 décembre, quasi ininterrompues du 7 au 19, toujours marquées mais irrégulières du 21 au 31. A Melun, il a plu 167h 10 mn. Avec une ETP mensuelle de 10 mm, l'excédent climatique atteint 183

mm à Ferrières. Sur ce plateau très mal drainé, la tempête arrive sur des sols engorgés depuis la fin novembre.

Durant le mois, les vents dominants sont du sud-ouest (200-260°) à 65 %, contre 38 % en décembre normal. Le 12, un coup de vent franchit les 100 km/h.

1.2.3. Drainage et assainissement:

La forêt d'Armainvilliers s'étend sur deux bassins versants que le drainage individualise mal. En revanche elle est parcourue par un réseau de drains, constitué au fil des siècles, soit 16,9 km de collecteurs principaux et 19,7 km de collecteurs secondaires. Chaque parcelle possède ainsi un plan d'assainissement. A l'Est, le déversement se fait dans les étangs de la propriété du roi du Maroc, mais l'entretien des fossés y a longtemps été défectueux. Les eaux du Parc Pereire sont, elles, dirigées vers le ru du Réveillon mais le golf attenant à la forêt obstrue une partie du passage. A l'Ouest, l'exutoire naturel, le ru de la Marsange, a subi toutes sortes d'obstructions dans sa traversée de la commune d'Ozoir-la-Ferrière, qui limitent fortement son efficacité : des risques de débordement existent lors de violents orages. Enfin, le réseau du Bois Prieur est devenu inefficace. De nombreuses mares participent aussi à la collecte des eaux pluviales.

L'assainissement de la forêt est rendu très difficile par l'obstruction des exutoires, l'urbanisation des lisières, l'importance des infrastructures bordières et internes, le manque d'entretien. Le bilan est peu favorable. D'une part, les eaux stagnent par insuffisance de circulation et le milieu ne se ressue pas ; d'autre part, la forte hydromorphie n'arrange pas les capacités d'écoulement. Pour toutes ces raisons, le réseau de drainage interne à la forêt a été repris pendant la durée du plan d'aménagement de 1973 (ONF, 1983).

1.2.4. Stations forestières

Trois types de stations forestières dominent dans la forêt.

- La chênaie pédonculée oligotrophe à Molinie domine dans la forêt. Formation à strate arborescente à couvert léger, à strate arbustif discrète ou absente, à strate herbacée haute dominée les Graminées, Canche flexueuse, Houlique molle et surtout *Molinia caerulea*. On la trouve sur des sols à pseudo-gley. Sa variante mésotrophe s'enrichit de Charme et de Tilleul à petite feuille.
- La chênaie pédonculée-charmaie occupe les zones les mieux drainées sur sols bruns lessivés et sols lessivés à bonne réserve en eau. Elle se caractérise par un taillis dense à Charme, avec noisetier en strate arbustive. Le Merisier est fréquent en strate arborescente. Dans les endroits les plus humides (frange orientale de la forêt, talwegs) apparaissent des espèces de l'Aulnaie-frênaie, le Peuplier grisard et le Saule marsault.
- La chênaie-frênaie est localisée sur certains sols bruns lessivés, profonds, frais et caillouteux. En strates arborescentes, le Chêne pédonculé et le Frêne sont accompagnés du Hêtre, de l'Erable champêtre et du Tilleul, *Tilia cordata*.

Démentant cette réelle uniformité des conditions physiques les peuplements présentent une grande diversité d'essences, de structures, d'âges aux échelles parcellaire et intra-parcellaire. En première analyse, et témoignages, toute la forêt fut parcourue par des flux d'air de mêmes caractéristiques. Les variables discriminantes de la géographie des chablis seraient donc à

rechercher dans les types de peuplements. Cette remarque est suggérée par une rapide comparaison entre deux parcelles contiguës, la 29, qui porte un perchis et une jeune futaie de chênes issus de la glandée de 1948-1949, intacts, et la 9, qui porte un taillis de la rotation et taillis vieillis de feuillus divers jetés à bas. Seule une bande bordière du chemin et de son fossé latéral est intacte. La présence de cette bande pose deux hypothèses liées : plus grande profondeur locale de la nappe, parce que mieux drainée, et morphologies des ligneux mieux adaptées à des conditions écologiques de lisière. Sur le plan sylvicole, la perte de 27 % (en surface) des peuplements du groupe de régénération exigeait une modification à l'aménagement.

A ces massifs forestiers marqués par une homogénéité à petite et moyenne échelles des conditions du milieu, s'opposent les forêts présentes sur des milieux différenciés.

2. Milieux physiques différenciés

2.1. La forêt communale d'Ozouer Le Voulgis

La forêt communale d'Ozouer Le Voulgis couvre une surface de 313,90 ha (dont 309 ha de bois) dans le département de Seine-et-Marne, sur les communes de Charmes-en-Brie, Guignes, Ozouer le Voulgis et Yèbles. C'est la plus grande forêt communale de la région Ile-de-France.

Cette forêt, composée de deux ensembles, le bois Communal au nord (206 ha) et le bois de Vitry, qui fait face au village de Guignes (107,9 ha), appartient à la Ceinture verte et à la Couronne rurale. Ses peuplements forestiers sont installés sur des milieux physiques contrastés appartenant à des plateaux et des versants à double orientation. La vallée de l'Yerres, orientée est-ouest, dessine des méandres encaissés d'une trentaine de mètres dans le plateau de Brie. Cette topographie est favorable à la naissance de couloirs à vent, particulièrement en situation tempétueuse.

La recherche a pris comme point de départ une carte des zones de dégâts par classes de surface détruite à l'échelle intra-parcellaire, établie en avril 2000 par le centre technique de l'ONF de Gretz-Armainvilliers. Elle s'articule sur la confrontation de ce document avec la carte des peuplements, les cartes topographique et géologique et les différentes missions de photographies aériennes. Elle s'appuie sur une étude fine de terrain.

2.1.1. Géomorphologie et pédologie

La forêt communale occupe le rebord occidental d'un élément du plateau de Brie, entaillé par les rus de la Marsange et de Chevry au nord et à l'ouest, par le ru d'Avon au sud. La vallée de l'Yerres divise la forêt en deux ensembles. L'altitude varie de 102 mètres sur le plateau portant le bois Communal à 66 mètres au bord de l'Yerres. La pente moyenne sur le rebord du plateau est de 5 à 6 %. Le substrat est constitué de meulières et de calcaires du Sannoisien, ceux-ci avec le faciès d'argiles rouges à meulière. Cette couche repose sur les Marnes blanches et les Argiles vertes souvent confondues. Les limons de couverture (LP), d'épaisseur moyenne 1 mètre, s'amincissent puis disparaissent sur les hauts de versants. Dans le bois de Vitry les limons contiennent des sables et des fragments de grès de Fontainebleau. Le banc rocheux a été exploité pour la pierre meulière dans ses passées les plus massives. D'anciennes carrières forment de larges sillons sur le massif du bois de Vitry, surtout autour des parcelles 35, 36 et 41.

- Le plateau et les pentes faibles portent des sols bruns plus ou moins lessivés à humus mull acide. L'hydromorphie apparaît vite avec la diminution de la pente. Là où l'argile imperméable et compacte apparaît en fond de profil, la nappe d'eau est quasiment sub-affleurante ; le

développement vertical des pains racinaires est alors limité. Au centre du plateau l'écoulement est difficile et l'hydromorphie entretient des pseudo-gleys à humus mull acide à mull-moder.

- Sur les pentes, les colluvions en transit, argilo-meuliers, portent des sols jeunes, très superficiels et peu cohérents. La pierrosité améliore la pénétration des racines et la richesse chimique.

- En bas de pente le colluvionnement domine, qui favorise la présence de sols bruns argileux, à composante carbonatée. La texture grossière améliore aussi la pénétration racinaire.

2.1.2. Climat

Les caractères climatiques sont très voisins de ceux de la forêt d'Armainvilliers. Mais les bilans hydriques sont moins favorables car les réserves en eau des sols sont, mis à part les stations sur plateau limoneux, plus faibles. Les déficits hydriques de la saison végétative sont donc accentués.

2.2. La forêt domaniale de Fontainebleau

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, le cœur, enserré dans une couronne de bois privés, d'un vaste massif de plus de 25 000 hectares (*cf.* Figure 2).

2.2.1. Géomorphologie et pédologie

Cette forêt occupe des milieux physiques diversifiés et compartimentés. Les biotopes vont du pôle acide au pôle carbonaté et les bilans hydriques stationnels du sec à l'hyperhumide. Au sud-ouest, les plateaux sommitaux sont sous-tendus par le calcaire de Beauce plus ou moins recouvert de dépôts sableux ou limoneux; ils portent des futaies de chênes et de hêtres. Vers le nord, cette assise disparaît; alors affleure une dalle de grès fissurée, dont la dislocation a donné naissance à des "chaos" pavant les versants. Les platières gréseuses et leurs versants dessinent des échines séparées par des vallées parallèles creusées dans les sables stampiens, le plus souvent sans drainage; elles sont recouvertes de landes à callune piquetées de bouleaux et de pins. Dans les vallées sèches (creusées et drainées durant les phases du Quaternaire), des pelouses rases et de maigres landes occupent les milieux les plus « séchards ». Enfin, des peuplements résineux, issus de plantations ou de diffusion spontanée sont disséminés dans cette forêt, qui offre une conjonction de toutes les histoires, climatique, morpho-pédologique, politique, socio-économique et culturelle dont l'entrecroisement permet de comprendre les paysages forestiers d'avant la tempête.

Dans la forêt domaniale, les réserves biologiques de la Tillaie et du Gros Foutau sont, depuis longtemps, des sites exceptionnels pour étudier les modalités de chablis dans des peuplements "naturels" et les scénarios de reconstitution des trouées et clairières (LEMEE, 1987). Très récente, la réserve "Les Erables et Déluge" offre de nouvelles parcelles soustraites à la gestion sylvicole

L'objectif n'est pas ici de présenter les caractères géomorphologiques et pédologiques de l'ensemble du massif, ni les logiques de constitution des grandes unités physiques, par ailleurs bien étudiées dans le cadre de recherches pédologiques (voir en particulier, A. M. Robin, 1993). Des géomorphologues ont, par ailleurs, travaillé à l'établissement de la carte géomorphologique de Fontainebleau au 1/50 000, dans le cadre d'une Recherche coopérative sur programme du CNRS (RCP 77). Les maquettes au 1/25 000 de la partie méridionale de la forêt ont été utilisées pour les relevés de terrain réalisés dans les 160 hectares de la réserve "Les Erables et Déluge" et leur

périmètre (GRANDMOUGIN, 2003, carte 19, p. 35). Cette carte, levée à grande échelle, à la tarière sur les plateaux recouverts de limons, fournit de précieuses informations sur les formations superficielles, leur nature, leur épaisseur et leur origine. Ainsi, la parcelle 567, plus précisément étudiée, occupe un plateau à substrat calcaire recouvert de sables soufflés (originaires des versants sableux dénudés lors de la dernière période froide du Quaternaire) dont l'épaisseur est inférieure à 75 cm.

2.2.2. Climat

L'ambiance climatique régionale ne diffère guère de celle de la forêt d'Armainvilliers. Les précipitations annuelles à la station de Fontainebleau ville sont de 723 mm (période 1951-1980), de 697 mm pour une période plus longue (1883-1970). Le maximum annuel est de 1 109 mm (en 1958), le minimum, de 462 mm (en 1976). Pour une station située au cœur de la forêt joue l'effet « grand massif boisé », comme le montre la différence assez nette avec la station de Melun, à l'extérieur du massif, 631 mm (1951-1980). La température moyenne est de 10,1°C. L'ETP estimée Thornthwaite est de 659 mm, ménageant un surplus climatique (ETP-P < 0) de 64 mm. Mais le déséquilibre saisonnier est marqué ; alors que le surplus hydrologique, perdu pour la plante durant les trois mois d'hiver, atteint 97 mm, l'appel à la réserve durant les six mois de la saison végétative monte à 206 mm. La valeur de l'ETR varie donc selon les conditions stationnelles qui déterminent le volume du réservoir d'eau : présence et épaisseur des formations superficielles, granulométrie, position topographique. 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 Armainvilliers, l'engorgement des sols resta limité aux plateaux couverts de limons.

B - LES PEUPELEMENTS ET LEUR HISTORIQUE

1. Le massif normand de Conches-Breteuil

1.1. Historique de la forêt de Breteuil

La forêt de Breteuil, qui appartient à une dizaine de propriétaires sylviculteurs, est restée aux mains de l'aristocratie jusqu'en 1789. Sous la Révolution de riches bourgeois achètent les fiefs démembrés et des cantons jadis abandonnés à la jouissance des communautés rurales GUIOT, 2000).

En 1830, Louis-Philippe rachète une grande partie des biens. La forêt comprenait alors sept séries de taillis sous futaie dont six à la révolution de 30 ans, la dernière, de 25 ans. La forêt porte aujourd'hui encore l'empreinte de cette gestion dont le parcellaire, marqué par des carrefours en étoile des allées de chasse.

Le démantèlement reprend à la mort de Louis-Philippe, le 26 août 1850. À la fin du XIX^e siècle, existent encore deux grands propriétaires, le Comte de Béarn qui possède 3 000 hectares et réside au château de Souvilly et M. Olry Roederer qui détient 8 000 hectares. C'est l'époque fastueuse de la chasse à courre. L'Eure compte, en 1893, une dizaine d'équipages avec meute et fanfare. Une longue série de mutations vont se produire pendant le XIX^e et le XX^e siècle. Elles aboutissent au découpage que l'on connaît actuellement. C'est en 1950, à la suite d'un décès sans héritier, que les 1.113 ha des cantons de Coupe-gorge, des Marettes et du Bel-Herbier ont été légués aux Hospices civils de Lyon. Quant aux forêts du Comte Jean de Béarn, elles sont gérées par le Groupement forestier de Souvilly.

1.2. La forêt d'établissement public des Hospices civils de Lyon

La forêt d'établissement public des Hospices civils de Lyon couvre 1 114 ha., gérée par l'ONF, est constituée à 80 % de taillis sous futaie et de futaies de feuillus, à 20 % de futaies résineuses. Sa superficie est de 80 % des résineux (sur 110 ha) sont tombés, dont 80 % d'épicéas communs et d'épicéas de Sitka, 12 % de douglas, 4 % de pins sylvestres et 4 % de pins weymouth et *Abies grandis*. Cela représente 30 000 m³ de vente sur estimation. Selon les parcelles, 3 à 31 % en volume des feuillus de diamètre supérieur à 30 cm (chêne et hêtre) sont tombés, soit 120 000 m³ estimés. L'estimation est de 3 500 m³ pour le taillis.

1.3. La forêt du Comte de Béarn

La forêt du Comte de Béarn compte 1 100 ha de forêt et 680 ha de parc, dévolu pour partie à un élevage de sangliers destinés à la chasse. La gestion privée s'assure le concours du CRPF et d'une coopérative forestière. La forêt est constituée de 20 % de résineux, douglas, épicéas, pins laricio et pins sylvestres, et de 80 % de feuillus (chêne, hêtres et charmes dominants). Sa superficie est de 1 142 ha. La tempête a rasé 100 ha environ de résineux (5 % de la forêt), alors que l'estimation est de 10 % pour les feuillus. Certaines parcelles sont touchées à 45 %.. Les parcelles de résineux ont été entièrement nettoyées.

1.4. Le secteur forestier du Huttier

Propriété d'un ensemble de gestionnaires privés et géré par le groupement forestier de Conches-Breteuil, le secteur du Huttier constitue une surface boisée d'un seul tenant de 1 300 ha, située dans la partie méridionale du massif de Conches-Breteuil ; il est représentatif des dynamiques sylvicoles sur le groupement forestier, dont il constitue 75 p.100 de la surface forestière.

Jusque dans les années 1950, le secteur du Huttier a été traité en taillis sous futaie à la rotation de trente ans. Depuis, la politique incitative du Fond Forestier National, a lancé la conversion vers la futaie résineuse, avec à terme la volonté du groupement d'obtenir 50 % de futaie de feuillus et 50 % de futaie de résineux.

Selon les dernières estimations disponibles par le plan simple de gestion de 1991, les deux tiers de l'espace forestier sont encore couverts de feuillus, dont presque 90 % sont en TSF. Les 10 % restant sont des futaies plantées de hêtres pour moitié puis du chêne et du peuplier principalement. La futaie du TSF est à 80 % du chêne et pour 10 % du hêtre. Le taillis, qui souffre d'un manque d'entretien croissant, est constitué de charmes, de trembles et de bouleaux.

Parmi les résineux, le douglas est l'essence prépondérante avec 70 % du tiers de l'espace forestier restant. Il est suivi du sapin de Vancouver (*A. grandis*), puis de l'épicéa.

2. Les forêts franciliennes

2.1. Forêt domaniale d'Armainvilliers

Le massif forestier de Ferrières-Armainvilliers est géré par la division de Melun du service départemental de Seine-et-Marne. Le groupe technique d'Armainvilliers gère la forêt domaniale du même nom ainsi que la FD de Coubert, et des forêts communales, dont celle d'Ozoir-le-Voulgis.

2.1.1. Historique :

Durant le Moyen Age, la forêt d'Armainvillers appartenait à un immense massif en forme de croissant qui allait de Grisy-Suisnes au sud à Crécy-la-Chapelle. Du IXe au XVIIIe siècle, le massif était partagé entre communautés religieuses et seigneuries laïques. C'est de quelques villes franches créées au milieu des bois que s'étendirent les défrichements qui le démantelèrent peu à peu (HIGOUNET, 1990). Jusqu'à la Révolution, le massif resta partagé entre divers domaines féodaux et la couronne ; ainsi Louis XV donna-t-il la forêt d'Armainvillers à Louis de Bourbon, duc de Penthièvre, petit-fils de Louis XIV. La Révolution les démembra au profit de riches familles parisiennes. Fouché acquit une partie de Ferrières sous Napoléon Ier. La plupart des anciens propriétaires récupérèrent leurs domaines à la Restauration. Parmi ceux-là, la famille d'Orléans ; mais Napoléon III la contraignit en 1853 à vendre ses biens aux "de Rothschild" et aux Péreire, qui agrandirent par la suite leur domaine par achat et échange. La première acquisition de l'État date de 1936 et porte sur 1 193 ha. Le vendeur, la famille Péreire, se réserva le droit d'exploiter les arbres de plus de un mètre de circonférence. Divers achats et échanges, en 1957 mais surtout entre 1974 et 1996, constituèrent l'actuel massif. La dernière acquisition fut celle du bois Prieur [qui appartenait à la commune de Sèvres (92) et à la Caisse des Dépôts et Consignations] réalisée en deux fois, en 1991 et 1993.

2.1.2. Répartition des essences

Les feuillus représentent 97,6 % des peuplements, respectivement chênes, 40% ; tilleul, et charme, 23% ; autres bois blancs, 23,2%, et les autres essences précieuses (hêtre, frêne, châtaignier, érable, fruitiers) 6%. Les résineux comptent pour 2,4 %.

2.1.3. L'aménagement forestier

Cette forêt devenue périurbaine a été divisée en deux séries en 1995 afin de mieux répondre aux deux objectifs de production ligneuse et d'accueil au public. La première série, sur 1 197 ha, forme le massif principal et le bois de Beaubourg. Elle a pour objectifs l'accueil du public et la production de bois d'œuvre de chêne et de feuillus de qualité. L'essence objectif est le chêne rouvre. Le traitement est une conversion - transformation en futaie régulière, par parcelle et sous parcelle. La seconde série, 254,47 ha, est constituée du bois Prieur et du parc Pereire. L'objectif principal est l'accueil du public. L'essence objectif est la même et le traitement est une conversion - transformation en futaie irrégulière par parquet.

2.1.4. Une forêt surexploitée

Lorsque l'Etat acquit la forêt en 1936, la majorité des gros arbres avait donc été exploitée. Aujourd'hui, dans des peuplements dominants de taillis sous futaie pauvres en réserves le manque de chênes de belle taille est flagrant. La régénération naturelle est problématique. Par ailleurs des plantations d'essences inadaptées furent faites après la seconde guerre mondiale, surtout les résineux (Douglas, Epicéa, Sapin de Vancouver...). Bien affaiblis, ils résistent difficilement aux contraintes et, après avoir été particulièrement frappés par la tempête de 1990, ils représentent le plus gros des dégâts de celle de 1999. Malgré tout, des peuplements d'avenir existent, dont les perchis de chênes issus de la glandée exceptionnelle de 1949, à la vigueur est prometteuse.

2.2. Forêt communale d'Ozouer le Voulgis

2.2.1. Historique

Jusqu'en 1978, la commune possédait, par un don seigneurial datant du Moyen-Age, le seul bois Communal. Une subvention du Conseil régional permit l'acquisition du bois de Vitry en 1978. Cette opération avait pour but de promouvoir l'accueil du public et d'assurer la conservation du patrimoine boisé.

2.2.2. Essences et peuplements :

Les Chênes représentent 72 % des essences ; Châtaignier et Charme, 12 % ; les feuillus tendres, 8,5 % et les divers, dont le peuplier, 5 %. Les résineux comptent pour 2,5 %. Le type de peuplement dominant est le taillis sous futaie. Le TSF pauvre en réserve de chênes est dominant mais le TSF est aussi très bien représenté.

2.2.3. L'aménagement

La forêt a été divisée en deux séries, pour répondre aux objectifs affichés par la municipalité. L'objectif pour le bois Communal, appelé Massif Nord est la production de bois de qualité, menée en parallèle de l'exercice de la chasse. Le traitement est la conversion en futaie régulière. Les essences objectif sont les chênes, sessiles, pédonculés et rouges et les essences d'accompagnement de valeur comme l'érable sycomore, le merisier, le châtaignier. Les objectifs pour le bois de Vitry sont l'accueil d'un public de proximité (Commune de Guignes et communes voisines en particulier) et la production de bois de qualité. Le traitement se fait par conversion - transformation en futaie régulière de chêne sessile. L'essence objectif est le chêne.

2.3. Forêt domaniale de Fontainebleau

2.3.1. Historique

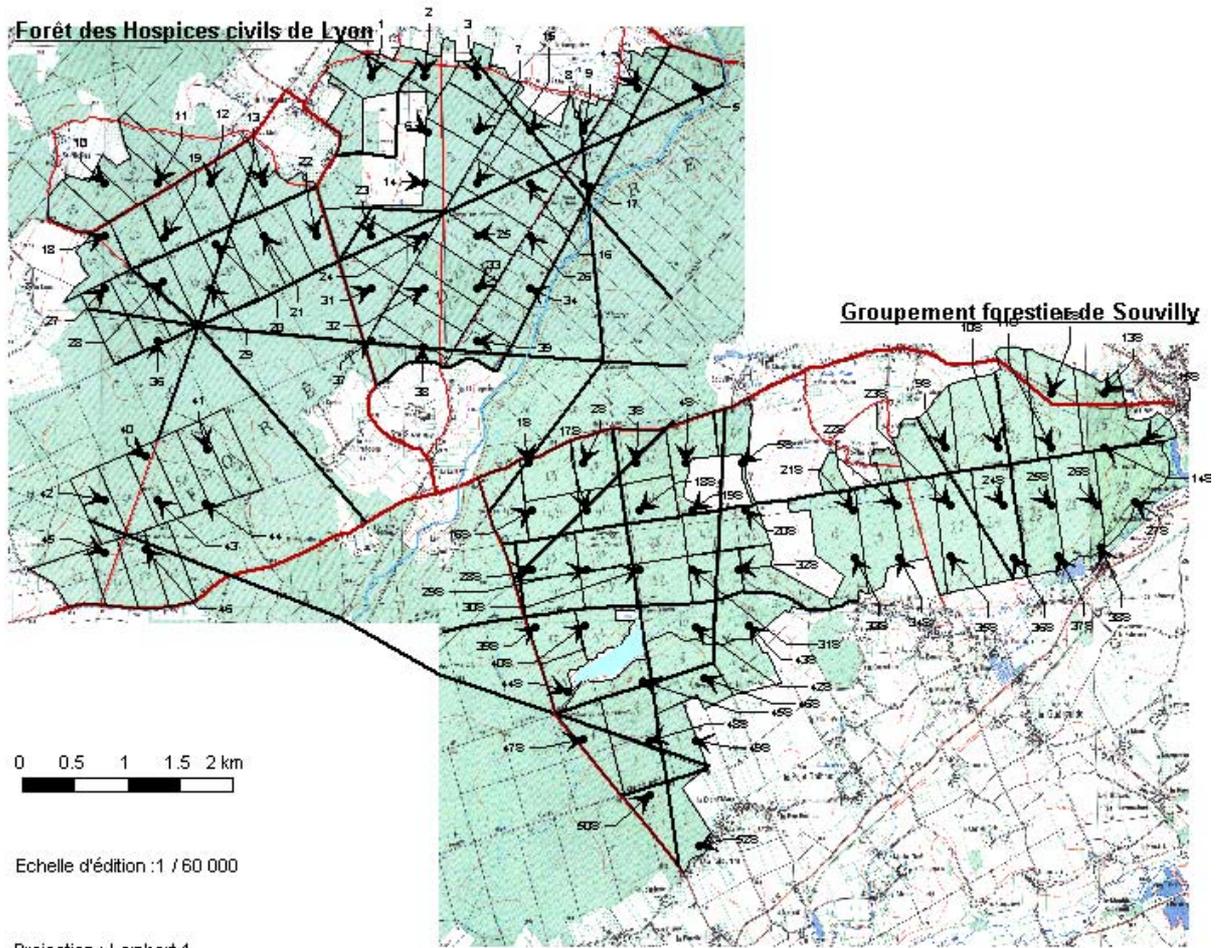
Il n'apparaît pas nécessaire de développer ici l'analyse historique de cette forêt domaniale emblématique, dont la vocation d'accueil au public est aujourd'hui clairement affirmée. Notons seulement les grandes étapes de la conduite des peuplements. Forêt royale vouée à la chasse, elle fut gérée jusqu'au début du XVIII^e siècle en vue d'obtenir une densité maximale de gibier ; gestion catastrophique de la forêt qui, en 1709, se composait pour la moitié de sa surface de vides et de landes. Un gigantesque effort de reconstitution de peuplements feuillus porta alors sur près de 6 000 ha. A partir de 1830, l'introduction des résineux, pins sylvestres surtout, accéléra la remise en état de 5 000 ha environ. Mais une vive concurrence s'instaura dès lors entre les espèces. De 1850 à 1970, le rythme des coupes ralentit fortement, provoquant le vieillissement des peuplements. Depuis cette date, les aménagements promeuvent un effort constant de renouvellement, intégrés dans une gestion patrimoniale de la forêt, politique dont les réserves biologiques sont un maillon important.

2.3.2. Aménagements et réserves

Les plus anciennes réserves biologiques intégrales (RBI), la Tillaie et le Gros-Fouteau, datent de 1953, prenant alors le relais des séries artistiques de 1853. Dans certains secteurs de la Tillaie, les coupes furent interrompues au XIX^e siècle (TENDRON, 1983). Les réserves ont donné lieu à de très nombreuses études pluridisciplinaires, menées notamment dans le cadre du Programme biologique international (LEMEE, 1987). Elles portent des hêtraies quasiment pures ; seuls quelques îlots et bouquets de chênes subsistent. Cette domination du hêtre a des causes phytoécologiques et historiques. Au XVII^e siècle, des mesures avaient été édictées pour protéger le chêne ; des parcelles en régénération furent clôturées ; l'exploitation en fut limitée dans certains cantons. Au XIX^e siècle, les mouvements artistiques bloquèrent les opérations de rajeunissement des vieilles futaies. Le hêtre prospéra alors sous des couverts de plus en plus sombres.

La RBI des Erables et Déluge a été instaurée par le nouvel aménagement forestier, approuvé pour la période 1996-2015. L'intérêt porté à cette réserve, outre l'importance des dégâts qui ont frappé le sud du massif, tient à la prise en compte de l'impact des interventions sylvicoles passées, encore lisibles dans les structures paysagères actuelles. Les mélanges futaie-taillis de feuillus sont plurispécifiques ; les pins et les bouleaux sont localement abondants, témoignant d'anciennes ouvertures plus ou moins cicatrisées.

Figure 4 – Répartition des points d'enquête dans la Forêt des Hospices civils de Lyon et le GF de Souvilly

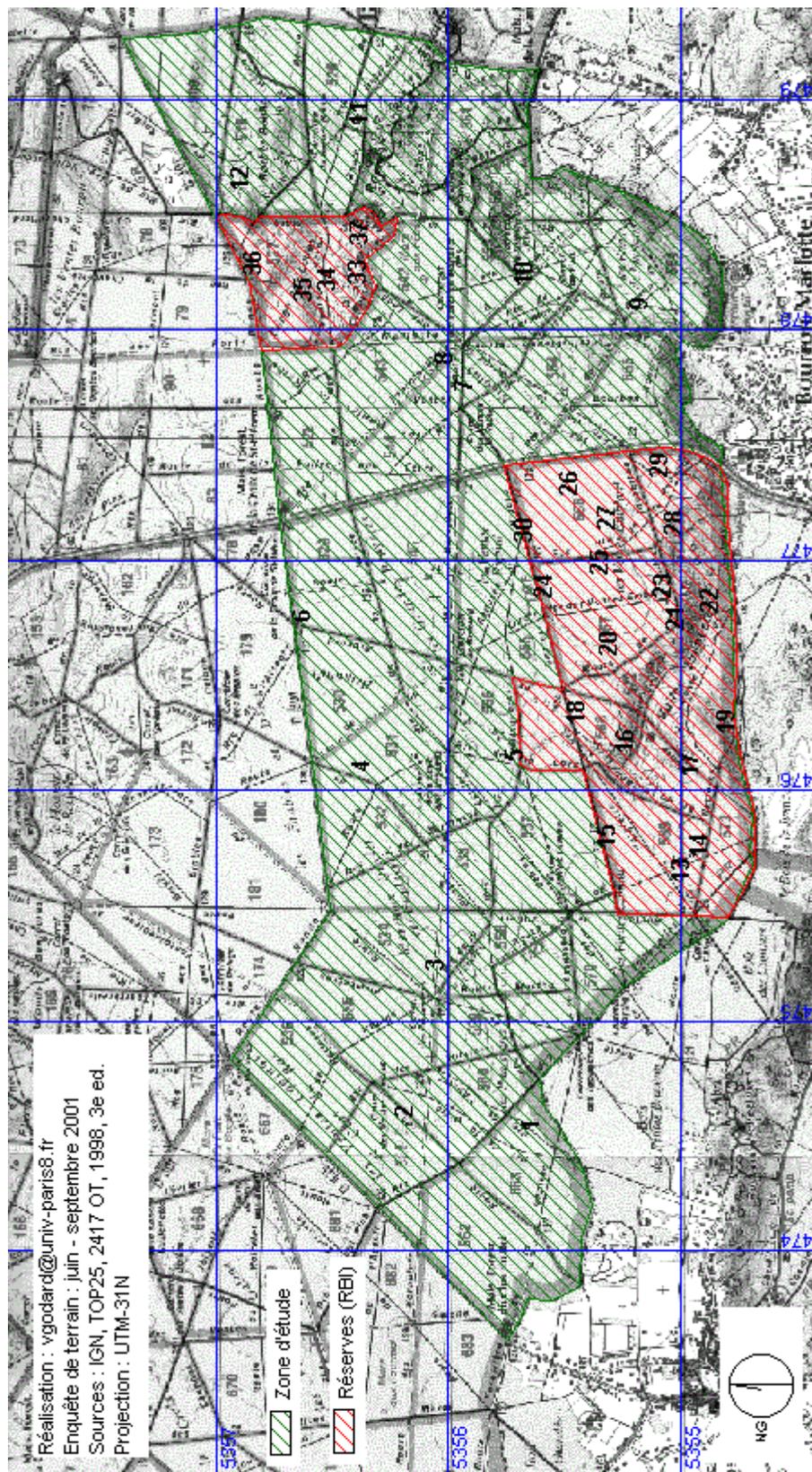


Voie	
	Départementales
	Autres routes
	Allées cavalières
Parcellaire	
	Limite de parcelle et numéro d'un point d'enquête
Hydrographie	
	Etang
	Cours d'eau

Réalisation : vgodard@univ-paris8.fr (2003)

Sources : enquête et conception du SIG G. GUIOT 2001, carte IGN 19140

Figure 5 – Répartition des points d'enquête dans la Forêt de Fontainebleau



II - METHODOLOGIE

Les méthodes mises en œuvre pour cette étude se décomposent en deux volets. Une présentation des méthodes d'échantillonnage et de collecte fera l'objet du premier chapitre puis un second chapitre décrira les différents traitements de l'information.

1. Échantillonnage 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. 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. Il convient donc de présenter les différents cas de figure dans leur spécificité pour évaluer ensuite la possibilité de comparer les résultats obtenus.

Deux procédures de tirage des unités d'enquête ont été utilisées. L'une relève des tirages d'unités ponctuelles, *a priori* asurfaciques, mais pour lesquelles pratiquement on inventorie, sur le terrain, une placette d'environ un tiers d'hectare. La procédure est comparable à celle développée par l'Inventaire forestier national pour les sondages de deuxième et troisième phase de l'inventaire général (IFN, 1985, p.35) soit un inventaire sur des placettes de 20 ares. L'autre relève des tirages surfaciques pour lesquels l'information est disponible à la parcelle ou sur un découpage infra parcellaire. La méthode relève des tirages de segments libres (FOURNIER, 1985, p.7), voire des recensements.

La collecte de l'information est, là aussi, tributaire du terrain d'étude, des données disponibles et des équipes de recherche. Les procédures de collecte sont décrites pour chaque terrain d'enquête. Les fiches d'enquête utilisées sont présentées en annexes.

1.1. Échantillonnages ponctuels

1.1.1. Tirage systématique de points

Cette procédure de tirage a été appliquée sur les forêts des Hospices civils de Lyon et du groupement forestier de Souvilly (*cf.* Figure 4). Pratiquement, les cartes topographiques sont importées puis géoréférencées dans le SIG Géoconcept. Ensuite, une grille, dont l'origine a été tirée aléatoirement, est appliquée sur la zone d'étude. Les intersections sont distantes de 500 m sur le terrain ; chacune devient un point d'enquête. Sur la forêt des Hospices civils de Lyon, 44 points ont été enquêtés, 47 sur celle du groupement forestier de Souvilly. La phase de terrain a eu lieu d'août à novembre 2000.

L'inventaire proprement dit porte sur des surfaces d'environ 2 100 m². En dehors des comptages prenant le centre de la placette pour référence, une placette est enquêtée sous forme d'une succession de stations espacées de cinq mètres et décrivant un rectangle de 30 m par 70 m.

La fiche d'enquête (annexe 1) est commune, dans ses grandes lignes, à plusieurs secteurs d'inventaire. Le contenu des questions abordées est détaillé ci-après :

1. **La pente** : sans objet, secteur d'étude plan.
2. **L'exposition** : sans objet en raison de l'absence de pente.
3. **Taux de recouvrement des essences par strate** : l'enquêteur indique pour chaque station de la placette s'il est sous un ou plusieurs arbres de plus de 15 mètres, de 7 à 15

mètres ou de moins de 7 mètres, si cet ou ces arbres sont debout, chablis ou volis. Il note aussi la présence d'une strate herbacée haute (1 à 2 mètre) et d'une strate herbacée basse (<1 mètre).

4. **Structure horizontale des strates prépondérantes** : Pour chaque strate, on indique si les arbres sont isolés, en bouquets, en lignes selon un maillage géométrique, ou répartis aléatoirement ou en nappe.
5. **Présence de trouées** : si oui, trouées exceptionnelles, rares, fréquentes ou dues à la tempête.
6. **Stade du traitement** : selon la structure du peuplement (taillis, taillis sous futaie ou Futaie), taillis au stade du recépage, de jeunes cépées ou vieillissants ou (et) futaie au stade du semis ou plants, du fourré, du gaulis ou du perchis.
7. **Rapport francs de pieds/cépées** : estimation du nombre d'arbres à tronc unique (futaie) par rapport au nombre d'arbres à troncs multiples (les cépées du taillis).
8. **Espacement moyen entre les arbres** : distance moyenne calculée entre les dix premiers arbres, pris à partir du centre de la placette, et ce centre.
9. **Diamètre moyen des arbres** : calcul du diamètre moyen des dix premiers arbres pris à partir du centre de la placette.
10. **Dégâts tempête** : présence de marqueurs de la tempête (parcelle nettoyée, présence d'espèces héliophiles liées à une trouée de tempête, ...).
11. **Détails du peuplement** : décompte exact du nombre d'arbres enquêtés, précisant l'espèce (chêne, hêtre, charme, etc.), la hauteur (+ de 15m, 7 à 15m, - de 7m), le diamètre (petit bois, bois moyen, gros bois ou très gros bois) et son état (debout, chablis, volis).

1.1.2. Tirage aléatoire et stratifié de points

Cette procédure de tirage a été appliquée en forêt de Fontainebleau, sur le secteur de Bourron-Marlotte (*cf.* Figure 5). La zone d'étude est divisée en deux sous-parties : les deux réserves biologiques intégrales (RBI), la réserve Les Érables et Déluge et la réserve La Gorge aux loups ; dans une partie soumise de la forêt domaniale. Le tirage des points échantillons a été réalisé en deux étapes à l'aide du logiciel IDRISI. Un premier tirage, sur la zone hors réserves, a donné 12 points, un second, sur les réserves, 23 points. Dans les deux cas, le tirage est aléatoire et stratifié. 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).

Pratiquement, les cartes topographiques ont été importées puis géoréférencées, avant de servir de support aux tirages des échantillons. La phase de terrain a eu lieu de juin à septembre 2001.

La fiche d'enquête (*cf.* Annexe n°2, Fiche n°2 - Enquête de terrain pour la Forêt de Fontainebleau) est peu différente de celle utilisée pour la forêt des Hospices civils de Lyon et du GF de Souvilly (*cf.* section précédente et Annexe 2, Fiche n°1 - Enquête de terrain pour la Forêt des Hospices civils de Lyon et celle du Groupement forestier de Souvilly).

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 stations espacées de dix mètres et décrivant un rectangle de 60 m par 60 m.

1.2. Échantillonnages surfaciques

Les deux secteurs présentés ici sont des recensements, car support d'un échantillonnage surfacique qui se veut 'exhaustif'. Il s'agit de levés issus d'une enquête de terrain, dont le but est d'établir une cartographie et des tableaux de dégâts, avec ou sans l'aide d'une photo-interprétation. L'unité d'enquête est la parcelle ou la sous-parcelle.

1.2.1. Cartographie exhaustive sans photo-interprétation

Cette procédure d'enquête a été appliquée pour la forêt d'Armainvilliers. La zonation a été effectuée, par report sur carte, à l'issue de martelages ou de tournées d'observations pour évaluer les dégâts (JAUBERT, 2001, p.26).

Les données collectées sur le terrain sont le volume de chablis par parcelle, ventilé en quatre classes, 0 à 10 % ; 11 à 40 % ; 41 à 70 % ; 71 à 100 % du bois sur pied. Les autres données concernent la structure du peuplement, le stade de développement, les essences (prépondérantes et secondaires) et les données du milieu (essentiellement topographiques et pédologiques). Le détail est présenté en annexe 3. Ces données ont été collectées sur des documents cartographiques existants (ONF, 2001a, b et c ; IGN, 1998).

La campagne de photographies aériennes financée par l'ONF et la région IDF en janvier 2000 s'est révélée difficilement exploitable. Les clichés, en soleil rasant, ne permettent que difficilement de distinguer les arbres debout de ceux qui sont couchés. Les photos n'ont donc été utilisées qu'exceptionnellement, en complément des levés de terrain.

1.2.2. Cartographie exhaustive avec photo-interprétation

Cette procédure d'enquête a été retenue pour le secteur du Huttier du Massif de Conches-Breteil. C'est un ingénieur délégué par la compagnie d'assurance du GF qui a établi la localisation des arbres touchés par la tempête (LALLEMENT, 2002, p.28). Une cartographie a été établie au 1/5 000 sur le fond réalisé lors de l'édition du plan simple de gestion de 1977. L'information porte sur les dégâts par type de peuplements (feuillus, résineux et peupleraies) et par intensité. Cette information est **infra parcellaire** (cf. Figure 20).

Le pourcentage d'arbres touchés est exprimé en six classes d'intensité de dégâts :

15 à 20 % => très faible ;

20 à 35 % => faible ;

36 à 50 % => moyen ;

51 à 75 % => assez fort ;

76 à 90 % => fort ;

91 à 100 => très fort.

En deçà de 15 %, les assurances considèrent qu'il n'y a pas de dégâts à indemniser.

De plus, le GF a commandé, après la tempête, une couverture photographique aérienne pour dresser une première estimation des dégâts. Sur les 212 clichés, 84 couvrent le secteur du Huttier. Ce sont des prises de vues obliques à grande échelle, entre le 1/5 000 et 1/10 000 au centre de la photo. On peut y distinguer les arbres cassés ou couchés et le sens de la chute.

2. Le traitement de l'information

Différentes méthodes de traitement de l'information ont été pratiquées. Les étudiants et les chercheurs qui avaient en charge un secteur forestier n'ont pas tous travaillé simultanément. Ils ont donc pu profiter des expériences acquises pour exploiter de nouvelles pistes. Certains premiers travaux réalisés par des étudiants encore peu avancés, ont donné lieu à une "reprise" des données qui a permis de compléter l'analyse par de nouvelles approches. Une seule procédure aurait sans doute été préférable, mais la diversité des situations et des calendriers imposait, là encore, de rechercher l'efficacité. Dans certains massifs, le dégagement était en cours, pour d'autres, les réserves de Fontainebleau par exemple, il n'y avait pas urgence.

Il est possible de distinguer trois types de traitement de l'information collectée. La première approche, qualifiée de statistique, a servi à produire des tableaux d'estimations des dégâts. La deuxième, qui se nourrit de la première, relève des méthodes de cartographie classique. Enfin, la dernière s'oriente vers des analyses mettant en jeu des données satellitales.

2.1. Les traitements statistiques

Selon les zones d'études (et les compétences des chercheurs), les traitements statistiques vont de la simple analyse univariée, dont le but est de produire un tableau des dégâts pour un massif donné, par traitements sylvicoles, par essence, etc., à des traitements multivariés, portant ou non, sur des données spatialisées.

2.1.1. Traitements univariés

Chaque massif étudié présente des traitements de statistique univariée où un certain nombre d'indicateurs (moyenne, mode, fréquence, ...) sont fournis variable par variable, à savoir : dégâts moyens à la parcelle, par essence, etc. ; classe de hauteurs la plus touchée ; surface terrière des arbres touchés par parcelle ; quantité ou volume des arbres couchés ou cassés exprimés en m³ ou en années de récoltes, etc.

L'objectif est souvent de fournir aux gestionnaires des indicateurs pour évaluer les dégâts du massif et se situer par rapport à la moyenne du groupement forestier, du département, etc. C'est ce type d'information que contiennent les premiers mémoires réalisés (GUIOT, 2001, JAUBERT, 2001) dont l'objectif était bien, entre autres, de fournir aux gestionnaires quelques descripteurs de base, ceux-ci se chargeant, par ailleurs, des analyses.

En dehors de ces comparaisons, l'analyse univariée ne permet pas de distinguer les variables qui jouent un rôle prépondérant dans la compréhension des dégâts, ni dans leur explication. Il faut pour cela, recourir au moins aux traitements bivariés qui permettent de dégager des comportements associés, voire concordants.

2.1.2. Traitements bivariés

Même si le désir en a été manifeste, il n'a pas été possible, dans le cadre de cette étude, de chercher une corrélation entre les dégâts et la vitesse locale des vents, facteur principal, car les données aérologiques manquent à l'échelle des parcelles, voire même des massifs forestiers étudiés. Cependant, certains facteurs "secondaires" influent sur la résistance d'un peuplement, comme la

teneur en eau des sols (très importante lors de la tempête) ou comme certaines caractéristiques du peuplement lui-même (âge, essences, gestion, ...).

Il a donc été recherché, parmi les nombreuses variables caractéristiques des peuplements celles qui paraissent le mieux corrélées aux dégâts. Dans la mesure où la plupart des sites étudiés possèdent une grande homogénéité de relief et de composition pédologique, on peut considérer que ce sont les caractéristiques intrinsèques du peuplement qui sont à mettre en relation avec les dégâts constatés.

Cette démarche statistique, de recherche de corrélations, concerne surtout le massif forestier de Conches-Breteil, aux travers de la forêt des Hospices civils de Lyon et du GF de Souvilly (GUIOT, 2001), et la Forêt d'Armainvilliers (CARDENAS, 2001).

2.1.3. Traitements multivariés

Les traitements multivariés ont été entrepris pour réaliser des typologies sur les variables enquêtées. Ils ont parfois été conduits avant les analyses bivariées afin de dégager de l'ensemble de l'information collectée les variables les plus pertinentes au regard des effets de la tempête.

Deux types de données ont été traités, celles issues des fiches d'enquêtes, et celles provenant d'enregistrements satellitaires (forêt de Fontainebleau pour le moment). Cette approche a nécessité de reprendre toutes les données collectées par les étudiants et les chercheurs, pour épurer les tableaux d'une part et pour essayer, *in fine*, d'esquisser une comparaison entre les secteurs étudiés.

C'est ce travail de "recalibrage" des données qui a été le plus long et le plus fastidieux. En effet si certains tableaux qui étaient sous forme dichotomique complète (chaque variable est éclatée en autant de colonne qu'il y a de modalités et pour chacune d'entre elles la réponse ne peut être que zéro ou un, non ou oui, en fonction de la valeur que prend l'individu statistique pour cette variable) permettaient des analyses des correspondances multiples, d'autres n'étaient que des tableaux de mesures [les variables en colonnes sont dans des unités incompatibles (pourcentages, ratios, dénombrement, ...) et leur somme en lignes, voire en colonnes, n'a pas de sens] comportant des données manquantes ou des paramètres à recalculer. À l'issue de cette "mise aux normes", des analyses factorielles ont été entreprises sur les secteurs étudiés.

Des classifications ont été réalisées sur les facteurs issus d'une analyse en composantes principales (ACP), pour les forêts des Hospices civils de Lyon et du GF de Souvilly et celle du secteur de Bourron-Marlotte à Fontainebleau ; d'une analyse des correspondances multiples (ACM), pour la forêt d'Armainvilliers. Ce sont des classifications ascendantes hiérarchiques par la méthode de Ward (perte d'inertie minimum, NAKACHE 2000, p.10). Classiquement, elles permettent de regrouper les individus, ici les placettes échantillon, dans une typologie qui fait ressortir des paramètres sylvicoles et dendrométriques significatifs, et des 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.

2.2. Les traitements cartographiques

Comme pour les traitements statistiques, selon les zones d'études (et les compétences des chercheurs) les traitements cartographiques s'échelonnent de la simple discrétisation univariée, en général au moins une carte de dégâts, jusqu'à des typologies issues de traitements multivariés.

2.2.1. Traitements univariés

Chaque massif étudié présente des traitements cartographiques univariés où un certain nombre de variables sont successivement représentées variable par variable, à savoir : dégâts moyens à la parcelle, par essence, etc. ; classe de hauteurs la plus touchée ; surface terrière des arbres touchés par parcelle ; quantité ou volume des arbres couchés ou cassés exprimés en m³ ou en années de récoltes etc.

L'objectif est souvent de fournir aux gestionnaires une visualisation spatiale des dégâts occasionnés aux massifs. C'est ce type d'information que l'on trouve dans les premiers mémoires réalisés (GUIOT, 2001 et JAUBERT, 2001, LALLEMENT, 2002) dont l'objectif était bien, entre autres, de fournir aux gestionnaires quelques descripteurs de base. Ceux-ci se chargeant, par ailleurs, des analyses.

Le mode de collecte de l'information (sondage ponctuel ou surfacique) conditionne le mode de représentation. Dans le cas de levés "exhaustifs" de terrain, l'information est disponible à la parcelle ou à la sous parcelle. C'est le cas des cartes de dégâts de la forêt domaniale d'Armainvilliers (*cf.* Figure 6 tirée de JAUBERT, 2001, np, Annexe section 1, carte 2) et de celle du GF de Conches-Breteuil pour le secteur du Huttier (*cf.* Figure 20, tirée de LALLEMENT, 2002, p.34). Les paliers des légendes sont en général imposés par les gestionnaires ou par des références extérieures à l'enquête. Elles ne sont donc pas directement compatibles.

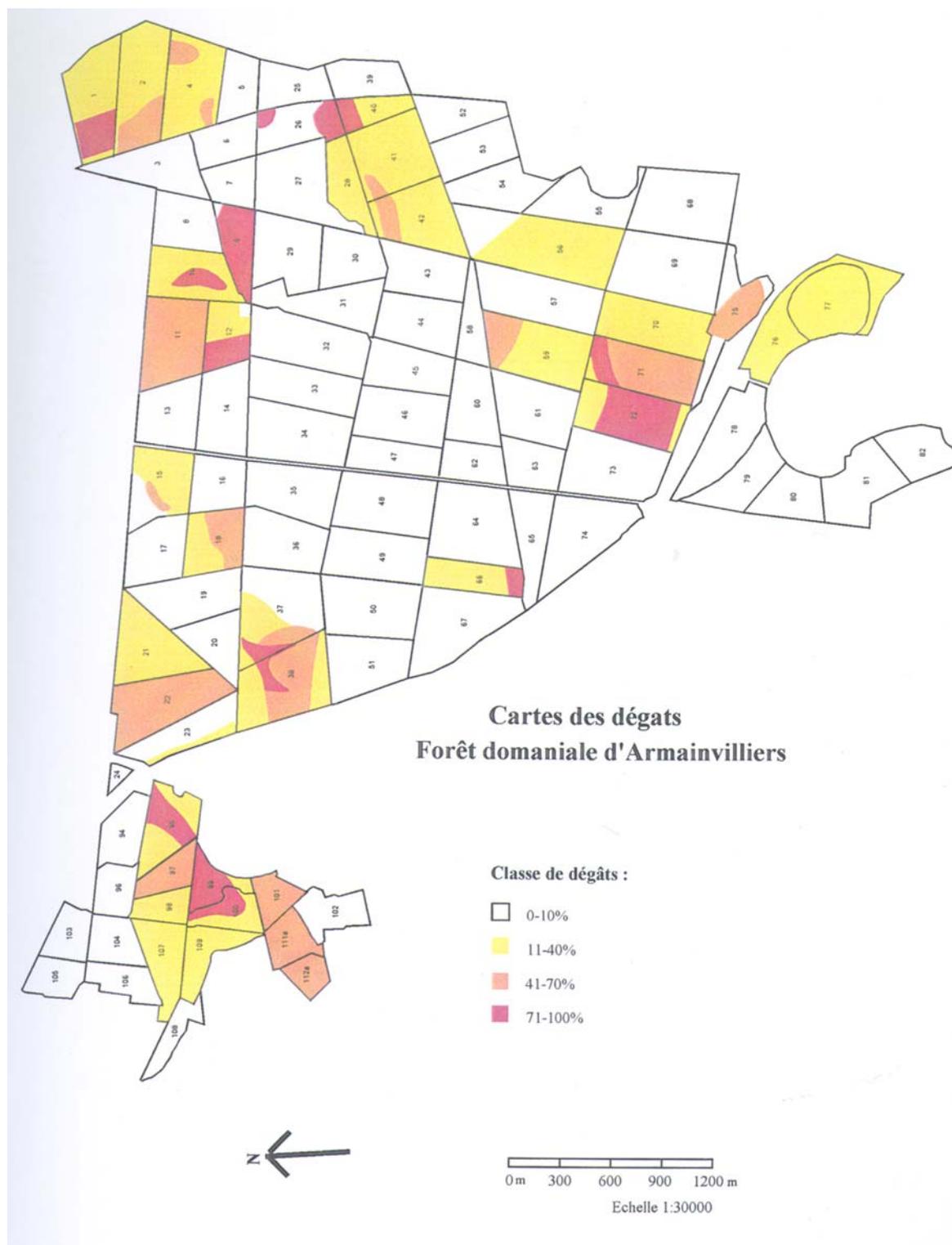
Ce mode de collecte, et donc de représentation, occupe toute la surface de la parcelle. Il n'en va pas de même avec les échantillonnages ponctuels qui n'apportent pas d'information entre deux points de sondage. Le cartographe peut alors choisir de représenter son information sur le fond topographique de l'IGN ou bien sur une autre information surfacique comme la nature des peuplements. C'est le cas de la carte de répartition des dégâts dans la forêt des Hospices civils de Lyon et de celle du GF de Souvilly (*cf.* Figure 7 tirée de GUIOT, 2001, p.88).

En dehors d'une vision de la répartition de la variable représentée, les dégâts par exemple, la cartographie univariée ne permet pas, à moins de comparer deux à deux des collections de cartes, de distinguer les variables qui jouent un rôle prépondérant dans la compréhension des dégâts, ni dans leur explication. Il faut, pour cela, au moins recourir aux traitements bivariés qui permettent de dégager des comportements associés, voire concordants.

2.2.2. Traitements bivariés

La cartographie bivariée a essentiellement été pratiquée par Gwennaëlle GUIOT. Elle concerne donc surtout le massif forestier de Conches-Breteuil, forêts des Hospices civils de Lyon et du GF de Souvilly (GUIOT, 2001). Il y a aussi quelques exemples pour la Forêt d'Armainvilliers (CARDENAS, 2001).

Figure 6 – Classes de dégâts en forêt domaniale d'Armainvilliers



Sources : JAUBERT, 2001, np, Annexe section 1, carte 2

Cette cartographie bivariée fait suite à l'analyse statistique du même nom qui permet de repérer, en amont, les variables présentant une liaison suffisante et significative. Une fois les couples de variables identifiés, leur représentation est fonction de la nature de la variable. Plusieurs cas de figure sont possibles :

- les deux variables sont qualitatives [par exemple : essences (Qual.) et classes de dégât (Qual.)] ;
- une variable est qualitative l'autre quantitative [par exemple : rapport francs de pied / cépée (en classes, Qual.) et pourcentage de dégât (Quant.)] ;
- les deux variables sont quantitatives [par exemple : hauteur du peuplement (Quant.) et pourcentage de dégât (Quant.)].

Selon les variables, les modes de représentation diffèrent.

Dans l'exemple présenté ici (*cf.* Figure 7 tirée de GUIOT, 2001, p.88), les cercles sont proportionnels au rapport francs de pied / cépée (pseudo Quant.) et la valeur (montée en intensité du jaune clair au rouge) est fonction de la classe de dégâts (Qual.). Cela permet d'apprécier visuellement la relation existant entre le pourcentage de dégâts et la présence d'un taillis (classe des 20 – 80, voire 40 - 60), d'un taillis-sous-futaie (TSF, classe des 60 – 40, voire 80 - 20) ou d'une futaie (classe des 80 – 20 et surtout des 100 - 0). Le fond auquel il est associé est relatif à la nature du peuplement d'après les plans de gestion. Bien qu'ils soient anciens (1987 pour les Hospices, 1977 pour le GF de Souvilly), ces plans apportent une information sur le contexte des points échantillon.

Le rapport francs de pied / cépée est qualifié de pseudo Quantitatif car il n'aurait pas dû être cartographié en classes (distribution discrétisée) mais sur une échelle de rapport (distribution continue). Cette représentation, bien que non conforme aux règles de la sémiologie graphique (BERTIN, 1967), permet de voir que les "gros" cercles (TSF ou futaie) sont associés aux valeurs les plus sombres (les dégâts les plus forts) et ce dans un environnement à dominante résineuse. Une analyse synthétique des dégâts et de leur typologie est proposée en 3^e partie.

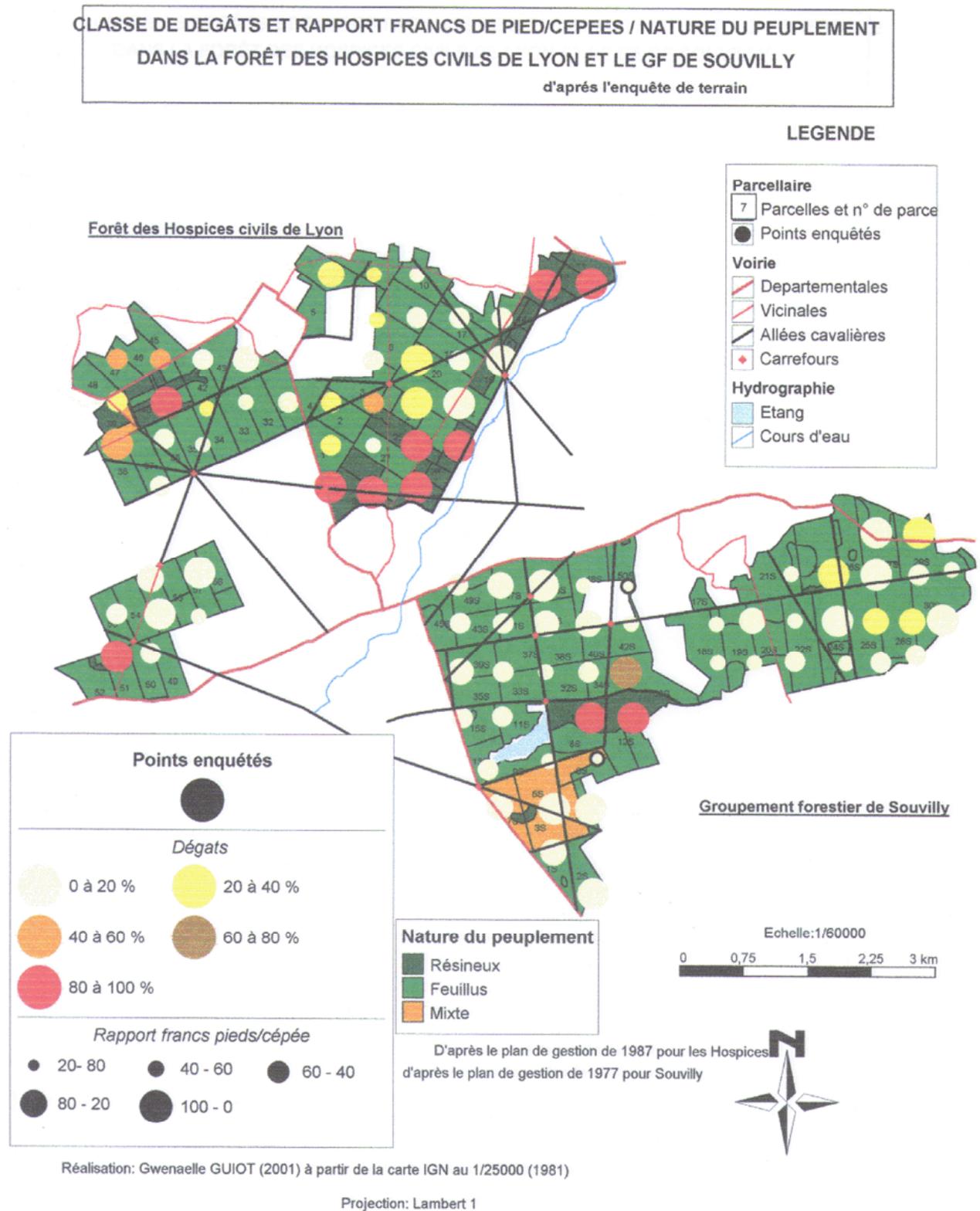
2.2.3. Traitements multivariés

La cartographie multivariée (à plus de deux variables) a essentiellement été réalisée pour synthétiser les travaux de l'ensemble des chercheurs. Elle concerne donc surtout les massifs forestiers ou plusieurs étapes d'analyse se sont succédées, à savoir : le massif forestier de Conches-Breteuil, forêt des Hospices civils de Lyon et du GF de Souvilly, la forêt d'Armainvilliers et celle de Fontainebleau sur le secteur de Bourron-Marlotte.

L'objectif de cette cartographie est de visualiser la répartition des typologies et de permettre une première analyse spatiale. Les traitements multivariés (ACP ou AFC puis CAH, *cf.* 2.1.3. du II) conduisent à créer une nouvelle variable pseudo numérique. Elle informe sur la classe d'appartenance de chaque individu de l'échantillon. Cette variable est importée dans le SIG pour représenter les résultats de la typologie.

Lorsque le traitement s'applique à des points échantillon, ceux-ci sont dotés d'une surface suffisante et identique pour représenter cette information de type qualitatif. Entre chaque point, il est possible de mettre un "fond". Cependant, celui-ci doit apporter un réel complément informatif pour ne pas nuire à l'information cartographiée initialement.

Figure 7 – Classe de dégâts et rapport francs de pied / cépée dans la Forêt des Hospices civils de Lyon et le GF de Souvilly



Source : GUIOT, 2001, p.88

La représentation de la typologie, en implantation surfacique (information de base connue « à la placette », cas de la forêt domaniale d'Armainvilliers), ne permet pas ces raffinements. Elle permet tout au plus de la resituer dans un environnement plus général contenu dans une base de données de type fond topographique ou autre. Cela permet, le cas échéant, d'apprécier l'agencement et la répartition des classes de la typologie à l'intérieur d'un massif plus vaste mais également par rapport à un contexte de trouées forestières ou de contacts avec d'autres milieux, agricoles ou autres, favorisant l'impact des vents (*cf.* 2.4. du II).

2.3. Le traitement des données satellitales

Les données satellitales sont utilisées, dans ce travail, pour extrapoler l'information des points de sondage à l'ensemble des forêts incluses dans chaque zone d'étude. Deux zones d'étude étaient concernées, le secteur de Bourron-Marlotte et celui de la forêt des Hospices civils de Lyon et du GF de Souvilly. Pour ce dernier secteur, des contraintes de calendrier universitaire n'ont pas permis à la chercheuse d'aboutir dans les délais avec les données dont elle disposait. Les nouvelles données ne seront finalement livrées qu'en septembre 2003 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. Ce sera également le cas pour le deuxième jeu de données couvrant la forêt de Fontainebleau. Ces données télédéteectées sont des enregistrements du capteur ETM+ du satellite américain Landsat 7. Actuellement, seules des données optiques issues du satellite SPOT4 ont été traitées. Elles concernent le secteur de Bourron-Marlotte. Parmi les dates d'enregistrements disponibles au catalogue Spot Image, nous avons retenu celle du 23 septembre 2000. Cependant, ces données contiennent une altération radiométrique (effet de brume et/ou ombre portée) qui a perturbé les traitements (*cf. infra*).

Condition à la consultation des catalogues des données satellitales disponibles, deux temporalités sont à prendre en compte, une intra annuelle, l'autre inter annuelle. A l'intérieur de l'année et en zone tempérée, en raison de décalages dans les stades phénologiques des végétaux présents sur le terrain, les prises de vues de fin d'été sont souvent favorables à l'analyse du couvert forestier. En effet, la végétation herbacée est sénescente voire déjà sèche, les feuillus connaissent des décalages importants permettant une assez bonne discrimination entre eux et, bien sûr, avec les résineux. Sur les images de fin de printemps – début d'été, les confusions thématiques sont beaucoup plus importantes, car l'activité chlorophyllienne généralisée entraîne une saturation des capteurs centrés sur les bandes rouge et proche infra rouge (PIR). La séparation des objets y est donc plus complexe. L'automne et l'hiver, pour des raisons d'éclaircissement et de stades phénologiques ne sont pas pertinents quant à nos objectifs.

Dans le cadre d'une temporalité intra-annuelle, attendre l'automne qui suit un épisode tempétueux hivernal pour retenir un enregistrement satellital impose de travailler sur un secteur ou une partie des dégâts est déjà traitée (débardage, arrachage des souches, ...), laissant des espaces à nu, bien différents, radiométriquement parlant en tous cas, des espaces où aucun travail de déblaiement n'a été entrepris. C'est une part d'erreur qu'il faut accepter et prendre en compte dans les résultats. L'erreur d'interprétation ira croissant si, pour l'année de l'aléa, aucune image n'est disponible, pour des raisons de couvert nuageux par exemple, et qu'il faut attendre la fin de l'été suivant, soit un an et demi plus tard.

2.3.1. Les prétraitements effectués

Les données traitées portent sur le secteur de Bourron-Marlotte dans la partie méridionale de la forêt domaniale de Fontainebleau. Un extrait de l'enregistrement du 20 septembre 2000 réalisé

par le satellite SPOT4 a été géoréférencé par rapport au fond topographique 1/25 000 de l'IGN. Le système de projection retenu, UTM31 Nord basé sur le système géodésique WGS84, est directement compatible avec les relevés de parcelles effectués au GPS (système de positionnement par satellites). Tous les relevés de terrain ont été effectués avec des GPS Garmin 12 après le 1^{er} mai 2000, date à partir de laquelle la dégradation du signal (SA, Selective Availability) a été stoppée par les autorités américaines. La qualité du positionnement est en générale meilleure que dix mètres.

Ce secteur de 5,7 km d'ouest en est et de 2,7 km du nord au sud a bénéficié de 11 points de calage. Leur faible nombre, en raison de la petite taille de la zone d'étude et d'un paysage forestier offrant rarement beaucoup de points de calage, n'a permis d'utiliser qu'une fonction polynomiale du premier degré (*linear* sous IDRISI V32). L'erreur quadratique moyenne est de ce fait de 17,5 m (RMS = 0.875 pour un pixel de 20 m), ce qui reste raisonnable. Les réaffectations se sont faites au plus proche voisin.

Pour ce qui est de leur qualité radiométrique, les données souffrent d'un effet de brume et/ou de l'ombre portée d'un banc nuageux traversant le sud de la Forêt de Fontainebleau. Nous avons toutefois réalisé les traitements d'extraction et le traitement de l'information de cette image bruitée, sans corrections radiométriques ni égalisation des détecteurs afin de conserver de la dynamique à cette image et dans la mesure où l'on espérait rapidement un autre jeu de données satellitaires, homogène radiométriquement.. Celui-ci nous est parvenu trop tardivement (délais de mise au point des conventions avec l'UE !) pour être exploité dans ce rapport, mais fera l'objet de publications.

2.3.2. Les traitements

Les traitements proprement dits des données satellitaires comportent plusieurs étapes de l'extraction des données des points d'enquête à l'extrapolation à l'ensemble de la zone d'étude. La première étape consiste à réaliser un fichier image où les parcelles enquêtées occupent leur dimension "exacte", c'est-à-dire 60 mètres de côté. Pour cela, les parcelles contenues dans une couche vecteur issue des fichiers GPS sont rasterisées, puis il leur est appliqué un filtrage au "maximum" avec une fenêtre 3*3. Ce type de filtrage, dans un fichier où le pixel est à 20 m, donne un carré de 60 mètres de côté et affecte le numéro de la parcelle à chacun d'entre eux. Ce fichier sert de masque pour extraire les données radiométriques de parcelle. Ces extraits sont ensuite traités dans un logiciel d'analyse multivariée, SPAD, avec des données thématiques collectées sur le terrain.

Il est possible soit de se contenter des données brutes fournies par Spot Image soit de créer des néocanaux où sera générée ou concentrée une information plus pertinente que celle d'origine. De plus, comme leur dynamique est peu développée (*cf.* canaux 1 et 2 sur la Figure 8), certains canaux d'origine risquent d'être peu discriminant et donc de n'apporter aucune aide dans la réalisation de la typologie des forêts étudiées. Des analyses en composantes principales (ACP) non standardisées ont été réalisées sur l'ensembles des fichiers images [bande du vert (B1), du rouge (B2), du PIR (B3) et du MIR (B4) de SPOT 4)]. La part d'information (variance) de chaque composante est la suivante :

1^{ère} composante (CP1) = 69 p. cent ;

2^e composante (CP2) = 29 p. cent ;

3^e composante (CP3) = 3 p. cent ;

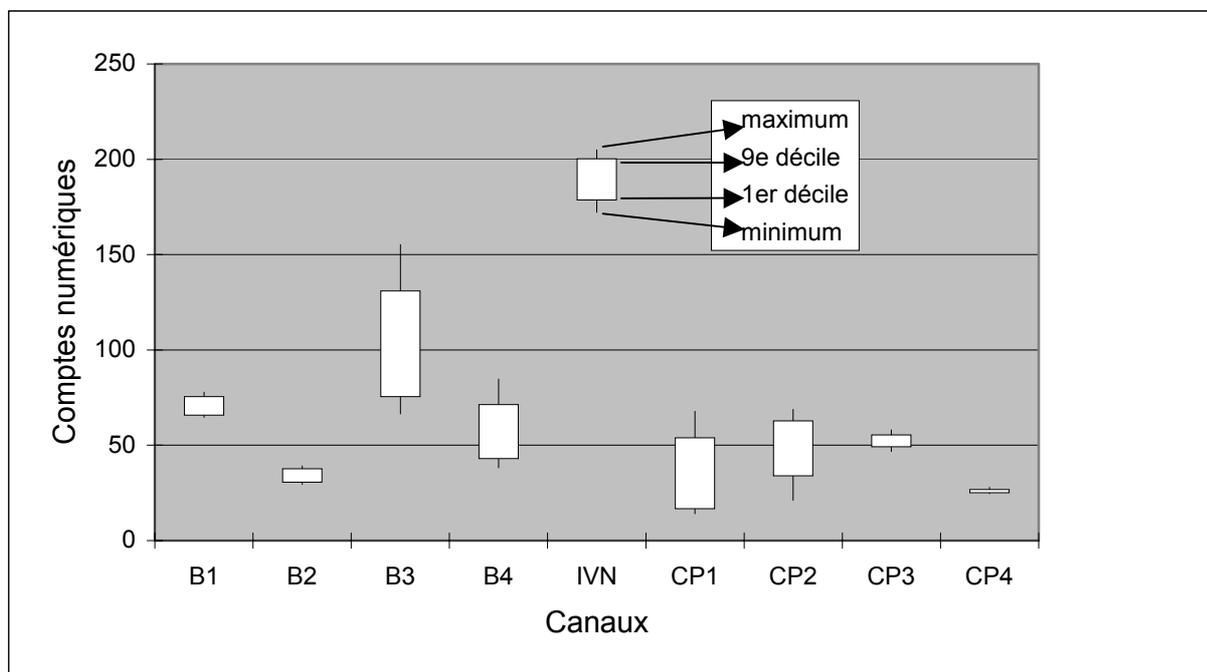
4^e composante (CP4) = 0,3 p. cent ;

Seules les deux premières composantes, qui portent une part significative d'information, seront retenues pour la suite des traitements. Un indice de végétation normalisé (IVN) a également été généré. C'est la combinaison habituelle :

(bande du PIR – bande du rouge) / (bande du PIR + bande du rouge)

qui porte habituellement une part d'information à forte dynamique. Ici, il n'est que la quatrième bande par ordre décroissant de dynamique.

Figure 8 – Dynamique radiométrique des 35 placettes d'enquête



Pour établir la typologie des placettes à partir des paramètres stationnels (dendrométrie, ...) puis généraliser cette information à l'ensemble de l'espace étudié, des analyses multivariées ont été réalisées en utilisant comme variable active la moyenne des données radiométriques de chaque parcelle pour chaque canal, à l'exception des composantes trois et quatre (CP3 et CP4) trop peu informatives. Les paramètres stationnels ont été utilisés comme variables illustratives. Une pondération à l'aide de la variable continue "Dégâts" (pourcentage des arbres touchés sur le total des arbres présents) a été ajoutée pour favoriser les paramètres stationnels dans les descriptions des typologies. Des ACP puis des classifications ascendantes hiérarchiques (CAH) ont été chaînées pour aboutir à des partitions comprises entre une et dix classes.

A l'issue des classifications, en plus de la typologie décrivant les caractères relatifs de chaque groupe, les individus sont affectés à chaque type et classés par ordre de proximité au centre de classe. Les plus représentatifs de chaque classe, qualifiés de "parangons" dans SPAD, sont utilisés prioritairement pour initialiser les classifications dans IDRISI. Deux des trois partitions les plus stables proposées par SPAD ont été retenues. L'une comporte quatre classes, l'autre sept. Celle-ci, contenant une classe avec un seul individu, a été rejetée après quelques essais de visualisation. En effet, 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 neuf pixels (3*3 pixels de 20 m de côté) ce thème ne permettait qu'un traitement monocanal ! Pour finir, c'est une partition en quatre classes qui aboutit. La plus petite classe comportant six parcelles d'entraînement de neuf pixels, il était donc possible de retenir cinq canaux pour les classifications sous IDRISI.

Ce sont les cinq canaux ou néocanaux ayant la plus forte dynamique qui ont été retenus pour réaliser les classifications sous IDRISI, à savoir les bandes du PIR (B3), du MIR (B4), l'indice de végétation (IVN) et les première (CP1) et deuxième (CP2) composante de l'ACP sur les fichiers images. Ceci n'exclut pas une certaine redondance de l'information (*cf.* Tableau 3) car les néocanaux sont souvent une recombinaison des canaux bruts.

Tableau 3 – Matrice de corrélations des valeurs radiométriques sur les parcelles d’entraînement

	B1	B2	B3	B4	IVN	CP1	CP2
B1	1.00						
B2	0.98	1.00					
B3	0.68	0.62	1.00				
B4	0.81	0.78	0.93	1.00			
IVN	0.34	0.27	0.91	0.75	1.00		
CP1	0.79	0.74	0.98	0.98	0.83	1.00	
CP2	-0.43	-0.37	-0.95	-0.81	-0.98	-0.89	1.00

Deux méthodes de classification ont été utilisées. Celle du minimum de distance pour tester la validité de l’échantillon de parcelles d’entraînement, puis, au vu des résultats satisfaisants obtenus, celle du maximum de vraisemblance (cf. III.2.3.). Cette dernière, plus efficace, est aussi plus gourmande en temps de calcul et nécessite des parcelles d’entraînement plus fiables. La méthode du minimum de distance permet de tester la validité de l’échantillon ou, lorsque celui-ci n’est pas de très bonne qualité radiométrique (mauvais repérage, bruit dans le signal, ...), de réaliser quand même une classification exploitable. La qualité des résultats est appréciée en comparant les affectations des parcelles d’entraînement puis leur résultat après classification au sein d’une matrice d’erreur, ou de confusions.

Après recherche de la classification la plus pertinente (par sélection des parcelles d’entraînement) au regard d’une qualité radiométrique perfectible des données, les résultats obtenus sont (très) satisfaisants. La qualité globale de la classification est de 78 p. cent, évaluée par l’indice globale de Kappa qui, bien qu’un des plus sélectifs, est le plus utilisé (HUDSON, 1987 ; ROSENFELD, 1986). Un indice de qualité par catégorie, le Kappa Index of Agreement (KIA), donne les résultats suivants :

Classe n°1 = 0.8232

Classe n°2 = 0.4569

Classe n°3 = 0.8885

Classe n°4 = 0.8674

On y voit instantanément qu’un seul thème souffre de "confusion", mais elles sont assez nettes ! La lecture de la matrice de confusions renseigne sur les gains ou pertes de ce thème vis-à-vis des autres (cf. Tableau 4).

Tableau 4 – Matrice de confusions

	Classes	Vérités terrain				Total	ErrorC
		1	2	3	4		
Carto graphie	1	100	11	1	0	112	11%
	2	16	23	5	0	44	48%
	3	1	2	68	3	74	8%
	4	0	0	7	60	67	10%
	Total	117	36	81	63	297	
	ErrorO	15%	36%	16%	5%		15%

Verticalement, ce sont les pertes par érosion (ErrorO, erreur d’omission) qui sont signifiées. Pour la classe 2, sur les 36 pixels reconnus sur le terrain comme relevant de ce thème, 23 ont été correctement cartographiés, mais 11 ont été cartographiés en classe 1 et 2 en classe 3. Cela signifie que l’érosion de ce thème entre le terrain et la cartographie est de 36 p. cent. En ligne sont portés les gains par accumulation (ErrorC, erreur de commission). Sur les 44 pixels cartographiés en classe 2, 23 ont bien été vus comme tel sur le terrain, toujours sur la diagonale, mais 16 avaient été identifiés

comme vérité terrain de la classe 1 et 5 de la classe 3. La classe 2 a donc "capturé" 21 pixels "étrangers", d'où une accumulation qui se traduit par une erreur de commission de 48 p. cent. C'est le thème 4 qui souffre le moins de confusion. L'erreur globale est de l'ordre de 15 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 (cf. III.2.3.) et leur répartition spatiale.

2.4. Quelques traitements spécifiques par analyse spatiales

Dans ce chapitre de présentation méthodologique, cette section est isolée afin de détailler une approche par analyse spatiale de l'influence des trouées sur l'intensité des dégâts. Comme l'indique Léna SANDERS (SANDERS, 2001, p.13), l'analyse spatiale est une méthode où « *l'espace est présent à la fois comme un objet – il s'agit de décrire, de comprendre, de prévoir des localisations, des configurations spatiales et leur évolution – et comme élément d'explication – il s'agit d'évaluer des effets de position et de voisinage, sur ces localisations, ces configurations, ces changements* ». Bien que tous les espaces forestiers présentés dans ce rapport utilisent peu ou prou ces techniques, seule l'étude consacrée au secteur du Huttier (massif de Conches-Breteuil) met en avant les apports de cette démarche.

Deux étapes ont marqué cette étude sur les effets de la tempête sur le secteur du Huttier (LALLEMENT, 2002). D'abord, est analysée la distribution spatiale des dégâts (régularité de la répartition), ensuite c'est la relation spatiale entre les dégâts et leur environnement proche et lointain qui est prise en considération (impact des trouées en amont des dégâts).

2.4.1. La distribution des dégâts

La distribution des dégâts est étudiée à l'aide d'un indice de concentration, calculé par la méthode des quadrats. Pour cela, chaque entité surfacique contenant une information relative à la tempête (cf. II.1.2.1. Cartographie exhaustive sans photo-interprétation) est ramenée à son centroïde. Ensuite, un carroyage régulier de 500 m de côté est appliqué sur le Huttier pour calculer la variabilité des centroïdes par maille (LALLEMENT, 2002, p.63). On en déduit un indice de concentration IC. Lorsque l'indice IC est :

- inférieur à 1 => la distribution est régulière ;
- égale à 1 => la distribution est aléatoire ;
- supérieur à 1 => la distribution est concentrée.

Comme cela est exposé au chapitre des résultats (cf. III.1.2. Le secteur du Huttier), la distribution des dégâts sur le secteur du Huttier est plutôt concentrée (LALLEMENT, 2002, p.64). Cette concentration des dégâts résulte de facteurs spatiaux comme l'essence ou l'âge des peuplements, mais également de phénomènes de colocalisation ou de covariation spatiale. Cela signifie que les dégâts peuvent aussi résulter d'objets se situant dans un voisinage plus ou moins immédiat. C'est cette relation entre les dégâts et leur environnement qui constitue la deuxième phase de l'analyse.

2.4.2. Influence de l'environnement sur les dégâts

L'objet central de ce paragraphe est l'analyse d'une rugosité (un paramètre du milieu forestier) sur les dégâts et leur intensité. L'aléa vent subit, avant de provoquer un dégât, l'effet de rugosités, variables selon les objets qu'il a rencontrés. Les objets privilégiés ici sont les trouées forestières et les routes et chemins.

Tout changement de configuration peut être perçu comme un facteur d'instabilité de l'écoulement, donc de variabilité de l'impact du vent. Sur quelle distance une modification importante de la rugosité de l'espace forestier se fait-elle sentir ? Pour tenter de répondre à cette question, toutes les trouées liées à la gestion forestière (jeunes plantations de moins de 15 ans), ainsi que les enclaves forestières (lieux d'habitation pour l'essentiel) ont été rentrées dans la base de données spatialisées. Cela représente 13 p. cent (175 ha) de la zone d'étude. Une autre couche d'information a été constituée avec tous les linéaires, routes et chemins forestiers, présents sur le Huttier. Ces linéaires sont susceptibles, en fonction de leur orientation, de créer des couloirs, donc d'engendrer un effet venturi ou simplement des turbulences.

Dans la mesure où l'aléa tempête est orienté, l'espace est anisotrope. Seuls les dégâts situés sous le vent d'une trouée ou d'une route sont à prendre en considération. Bien qu'il n'y ait pas de poste météorologique dans le secteur forestier du Huttier, l'analyse de la couverture aérienne post tempête (mission aérienne de février 2000) a permis de déterminer que les vents ont majoritairement frappé de l'ouest vers l'est (direction de la chute des arbres par rapport au nord). Les distances séparant les dégâts des trouées (ou routes) sont relevées lorsqu'une de leurs limites est dans l'ouest d'un dégât.

Sont calculées la distance moyenne entre dégâts et trouées (ou routes) et leur intensité (moyenne des pourcentages des dégâts par centroïde). Ces informations sont calculées tous dégâts confondus, mais aussi sur les dégâts aux Douglas et aux taillis sous futaie. La distance moyenne aux trouées (ou routes) est en générale supérieure à 200 m et l'intensité moyenne des dégâts proche de 50 p. cent à cette distance.

Dans la mesure où l'on cherche à tester l'hypothèse que les « *les caractéristiques des lieux proches sont plus interdépendantes que celles des lieux éloignés.* » (PUMAIN, 1997, p.11), on a cherché à voir si sur des distances plus courtes entre trouées (ou routes) et dégâts, l'intensité de ceux-ci était plus élevée. L'analyse a été réalisée avec un pas croissant de 100 m pour les trouées et 50 m pour les routes.

III - ANALYSE DES DÉGATS

C'est d'abord une présentation massif par massif qui est exposée. Elle permet une caractérisation de ces différentes entités et des variations internes qui peuvent se présenter. Ensuite une synthèse générale est proposée pour dégager les relations marquantes entre dégâts et paramètres sylvicoles sur l'ensemble des forêts traitées.

1. Les Forêts normandes : le massif de Conches-Breteuil

1.1. La forêt des Hospices civils de Lyon et le groupement forestier de Souvilly

Il n'était pas *a priori* évident de traiter ces deux entités du massif de Conches-Breteuil en un seul bloc. Bien qu'homogènes par de nombreux aspects (*cf.* I.A.1.2.), elles ont plusieurs propriétaires depuis plusieurs décennies et sont gérées dans des cadres très différents (*cf.* I.B.1.). Il est donc important de décrire au travers des variables enquêtées, et avant tout résultat, les paramètres communs aux deux forêts et ceux pour lesquels elles divergent. Seule cette analyse préalable permet d'affirmer une certaine unité statistique propice à l'analyse et aux comparaisons de ces deux entités.

1.1.1. Unicité des deux entités

Les dégâts sont-ils importants et de plus, sont-ils différents d'une entité à l'autre ? Avec une moyenne globale de 23,8 p. 100 ($\pm 0,9$ p.100, au risque $\alpha=5$ p.100) de dégâts [nombre d'arbres abattus (chablis et volis) enquêtés sur le total des arbres échantillonnés par placette], les dégâts sont globalement importants. Il n'y a pas une seule placette sans arbres touchés, contrairement au secteur étudié en Forêt de Fontainebleau ou d'Armainvilliers. Cependant, ces dégâts ne sont pas uniformément répartis. Le secteur des Hospices civils de Lyon a été beaucoup plus touché que celui du GF de Souvilly. Si les Hospices civils de Lyon enregistrent 33,5 p. 100 d'arbres enquêtés et touchés (± 1 p.100, au risque $\alpha=5$ p.100), pour le GF de Souvilly, ce ne sont que 12,2 p. 100 ($\pm 0,7$ p.100, au risque $\alpha=5$ p.100) qui le sont [différence hautement significative au seuil de 1/10 000 (test U de Mann et Whitney, SCHWARTZ, 1991, p.246)]. Cette différence étant importante, il convient de rechercher parmi les variables enquêtées, s'il existe d'autres paramètres différenciant ces deux entités et remettant, peut-être, en cause leur analyse commune. Bien que le nombre de placettes soit peu élevé, 91 au total, réparties en 44 sur les Hospices civils de Lyon et 47 pour le Groupement forestier de Souvilly, les intervalles de confiance associés aux dégâts moyens sont relativement serrés. S'il fallait cuber les bois cassés et faire une projection sur les 2 300 ha étudiés, la précision serait peut-être un peu juste, mais comme notre objectif est prioritairement de caractériser les lieux et les variables significatives par rapport à la tempête de 1999, cela ne pose pas de réels problèmes.

Ces deux secteurs ne sont pas différents en terme de structure forestière, comme le mélange d'essences (feuillus - résineux), de densité des tiges ou de répartition en futaies, taillis simples et taillis sous futaie, par exemple. En utilisant le test du khi deux (SCHWARTZ, 1991, p.75 et suivantes), avec 91 placettes enquêtées, les différences ne sont jamais significatives au seuil de 5 p. 100, seuil communément retenu pour le rejet de l'hypothèse nulle. Il est donc possible, au regard des informations collectées, d'étudier ces deux secteurs ensemble.

1.1.2. Caractéristiques générales des dégâts

Trois grands groupes de variables ont été étudiés sur cette partie du Massif de Conches-Breteil. Ils s'agissait d'évaluer l'impact des dégâts en fonction de la hauteur des peuplements, de leur diamètre et des essences présentes par placette d'inventaire. C'est cette première échelle d'analyse qui est présentée ici.

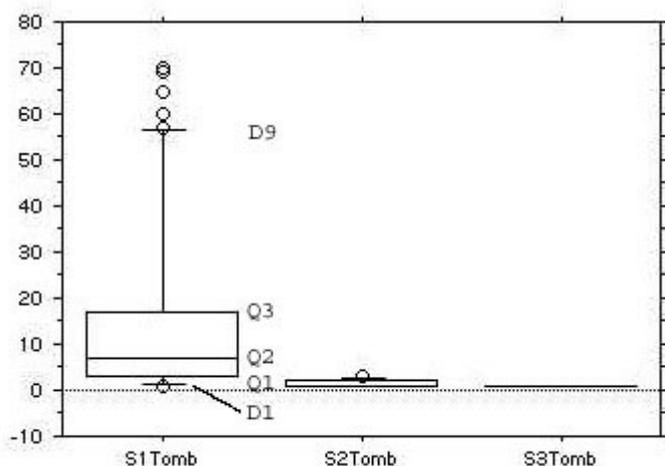
Avant de détailler les résultats significatifs de l'enquête, il faut présenter la description globale des paramètres collectés lors de l'enquête sur l'ensemble des placettes pour une meilleure mise en perspective. Comme on peut le voir sur le tableau n°5, sur 80 p.100 des placettes enquêtées (D9-D1), les moins extrêmes, il y a une trentaine d'arbres d'écart. Moins de 10 p.100 des placettes comportent moins de 39 tiges ou plus de 70. Cinquante pour cent des placettes ont moins de deux arbres volis ou six arbres chablis. Les dégâts sont peu importants et surtout très concentrés comme on va le voir plus loin, car 10 p.100 des placettes enquêtées portent plus de 24,8 arbres chablis (max. = 55) et surtout 50 arbres volis (max. = 57).

Tableau 5 – Détail des fractiles

Nb d'arbres :	Enquêtés	Debout	Chablis	Volis
min	25.0	0.0	0.0	0.0
D1	39.0	31.0	1.0	1.0
Q1	43.5	37.5	2.5	1.0
Q2	51.0	46.0	6.0	2.0
Q3	59.5	52.0	15.0	13.0
D9	70.0	59.6	24.8	50.0
max	115.0	75.0	55.0	57.0

D1 est le premier décile, Q1 le premier quartile, Q2 la médiane, Q3 le troisième quartile et D9 le neuvième décile. Min et Max, le minimum et le maximum.

Figure 9 – Intensité des dégâts en fonction de la structure verticale (nb. d'arbres par parcelle)



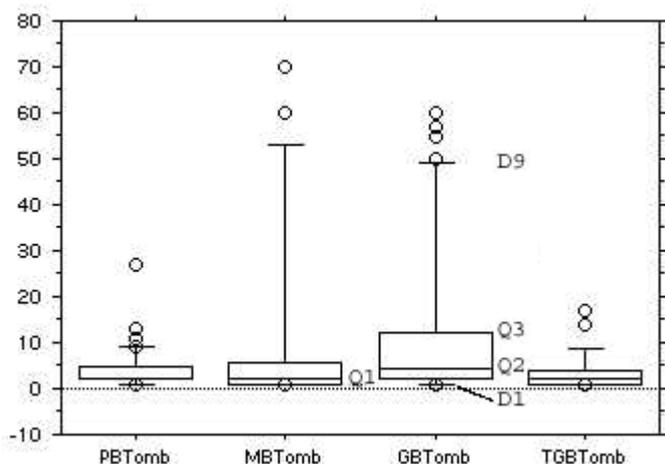
S1Tomb correspond aux dégâts sur la strate haute (arbres de plus de 15 m), S2Tomb à ceux de la strate intermédiaire (7 m < S2 < 15m), S3Tomb à ceux de la strate basse (2 m < S2 < 7m). D1 est le premier décile, Q1 le premier quartile, Q2 la médiane, Q3 le troisième quartile et D9 le neuvième décile.

C'est indéniablement la strate des plus de 15 m (S1Tomb) qui, comme on pouvait s'y attendre, a enregistré l'essentiel des dégâts. La figure n°9 donne un aperçu de la prépondérance des dégâts sur la strate 1 et leur insignifiance sur les autres strates. Ses boîtes de dispersion indiquent le nombre maximal d'arbres touchés par placette (ici 70 pour la strate 1). Puis quelques cercles indiquent les 10 p.100 des placettes ayant les valeurs les plus élevées. D9 indique la valeur du neuvième décile (90 p.100 des valeurs lui sont inférieures). Q3 est le troisième quartile (75 p.100 des valeurs lui sont inférieures). Q2 est le deuxième quartile (50 p.100 des valeurs lui sont inférieures, c'est la médiane). Q1 est le premier quartile (25 p.100 des valeurs lui sont inférieures).

D1 est le premier décile (10 p.100 des valeurs lui sont inférieures et donc 90 p.100 des valeurs lui sont supérieures). On voit clairement que S2Tomb et S1Tomb, les deux strates inférieures (moins de 15 m) n'ont pour ainsi dire pas d'arbres touchés. Cette différence entre S1Tomb et les deux autres n'est pas due au hasard. Elle est hautement significative pour un test comme le H de Kruskal et Wallis (Collectif, 2000, p.130). Sa valeur est de 21,2, soit un risque inférieur à 1/1 000 (table du khi2 avec 2 ddl).

Pour ce qui est des classes de diamètres, les différences ne sont pas assez marquées (cf. Figure 10) pour qu'un test comme celui du H de Kruskal et Wallis permette de rejeter l'hypothèse nulle pour $\alpha < 0,5$, même si l'on procède à des regroupements. Cela peut signifier, en dehors d'un échantillon trop petit, que les classes de diamètres retenues par le CRPF ne sont pas pertinentes pour étudier les dégâts de cette tempête sur ce secteur, ou qu'elle a bouleversé les peuplements, quelle que soit la grosseur des arbres.

Figure 10 – Intensité des dégâts en fonction des classes de diamètres (nb. d'arbres par parcelle)



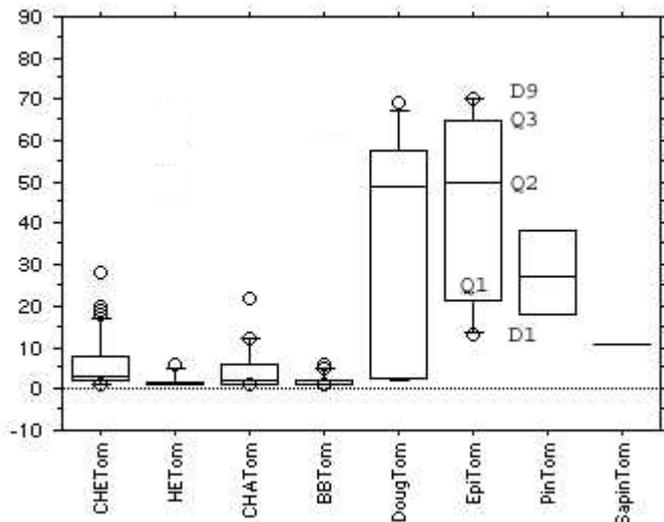
PBTomb correspond aux dégâts sur les petits diamètres (tiges comprises entre 17,5 et 27,5 cm de diamètre), MBTomb à ceux sur les diamètres moyens (tiges comprises entre 27,5 et 37,5 cm de diamètre), GBTomb à ceux sur les gros diamètres (tiges comprises entre 37,5 et 47,5 cm de diamètre) et TGBTomb aux dégâts sur les très gros diamètres (tiges supérieures à 47,5 cm de diamètre). D1 est le premier décile, Q1 le premier quartile, Q2 la médiane, Q3 le troisième quartile et D9 le neuvième décile.

En revanche, toutes les essences n'ont pas été frappées de la même manière. Comme dans de nombreuses autres régions, ce sont les résineux qui ont payés le plus lourd tribut à la tempête. Ainsi qu'on peut le constater sur la figure n°11, les feuillus sont diversement touchés, le chêne (CHETom) et le charme (CHATom) l'étant peut-être un peu plus que le hêtre (HETom) et les « bois blancs » (BBTom), cette différence est significative pour un risque α inférieur à 1/1 000 [$H = 16,6$, pour 3 degrés de liberté (ddl)], mais nettement moins que le douglas (DougTom) et l'épicéa (EpiTom). Pour l'ensemble des essences, cette différence est hautement significative [$H = 45,1$, pour 5 ddl (le pin et le sapin n'ont pas été pris en compte, bien que sur la figure, en raison de la faible représentativité des parcelles où ils ont été enquêtés), soit un risque α inférieur à 1/1 000]. On constate également l'extrême variabilité des dégâts entre les résineux et les feuillus. Quatre-vingts pour cent des dégâts (D9-D1) concernent un écart de moins de 20 arbres pour les placettes ayant du chêne, contre 70 douglas pour le même intervalle interdecile.

Bien que tous les résineux ne soient pas à terre à l'issue de la tempête, il y a une très forte corrélation entre présence des résineux sur la placette et résineux tombés. Ils ont pratiquement tout le temps été inventoriés au sol contrairement aux feuillus. Pour les douglas, le coefficient de corrélation linéaire « r » de Bravais-Pearson est de 0,91 (pour 8 ddl) lorsqu'on étudie la relation entre le nombre de douglas par placette et le nombre de douglas tombés sur ces mêmes placettes. La liaison est donc très intense et hautement significative ($\alpha < 0,01$). Pour l'épicéa, autre essence suffisamment représentée, le « r » est de 0,94 (pour 9 ddl). La liaison est, là aussi, très intense et

hautement significative ($\alpha < 0,01$). A titre de comparaison, si l'on prend les coefficients lus dans la matrice des corrélations (cf. Tableau 43 de l'Annexe n°4, pour 89 ddl), le « r » entre les chênes (CHE) et les chênes tombés (CHETom) n'est que de 0,46. Pour les hêtres, il n'est que de 0,47. Les charmes atteignent 0,65, mais les « bois blancs » seulement 0,22. Donc, quelle que soit leur position sur la zone d'étude, les résineux sont tombés, ce qui n'est pas le cas des feuillus.

Figure 11 – Intensité des dégâts en fonction des essences (nb. d'arbres par parcelle)



D1 est le premier décile, Q1 le premier quartile, Q2 la médiane, Q3 le troisième quartile et D9 le neuvième décile. Les cercles représentent des valeurs en deçà ou au delà des déciles.

En revanche, pour les douglas comme pour les épicéas, les Hospices civils de Lyon et le Groupement forestier de Souvilly n'ont pas été touchés de la même manière. Dans la forêt des Hospices civils de Lyon, il y avait, en moyenne, 52,8 douglas atteints par placette contre 13,8 pour celle du Groupement forestier de Souvilly [$H = 3,94$, avec $\alpha < 0,05$, pour 1 ddl (k-1)]. Pour les épicéas, ce sont également les HC de Lyon qui sont les plus touchés avec, en moyenne, 52,8 douglas atteints par placette contre 23,6 pour celle du GF de Souvilly [$H = 4,80$, avec $\alpha < 0,05$, pour 1 ddl (k-1)]. Rappelons, qu'en moyenne, 50 p.100 des placettes portent 51 arbres ou moins (cf. Tableau 5) !

Globalement, sur les Hospices civils de Lyon et le Groupement forestier de Souvilly, et en fonction de la taille de l'échantillon, ce sont les arbres de la strate haute (plus de 15 m) qui ont été touchés sans que l'on puisse mettre en avant une classe de diamètres particulière. Les essences résineuses sont là aussi majoritairement concernées et ce avec une forte variabilité. Il aurait été intéressant de travailler sur les coefficients d'élancement, mais pas plus la hauteur de chaque arbre que son diamètre n'ont été relevés individuellement lors de l'enquête.

1.1.3. Typologie multivariée

Plutôt que de passer en revue toutes les combinaisons possibles de variables, nous avons fait le choix de constituer une typologie des variables pertinentes sur les groupes de placettes qui s'agrégeaient par « affinités » statistiques. Cela permettait de dégager les combinaisons intéressantes à « creuser ». La présentation de la typologie est l'objet de ce paragraphe. Les relations bivariées du suivant.

Les données d'origine sont des nombres d'arbres (couchés, debout, grands, petits, ...) enquêtés par placette. Des ACP (analyses en composantes principales) puis des CAH

(classifications ascendantes hiérarchiques), comme indiqué au 2.1.3 du II, leur ont été appliquées. Sur les trois partitions demandées, SPAD V.5 en propose deux :

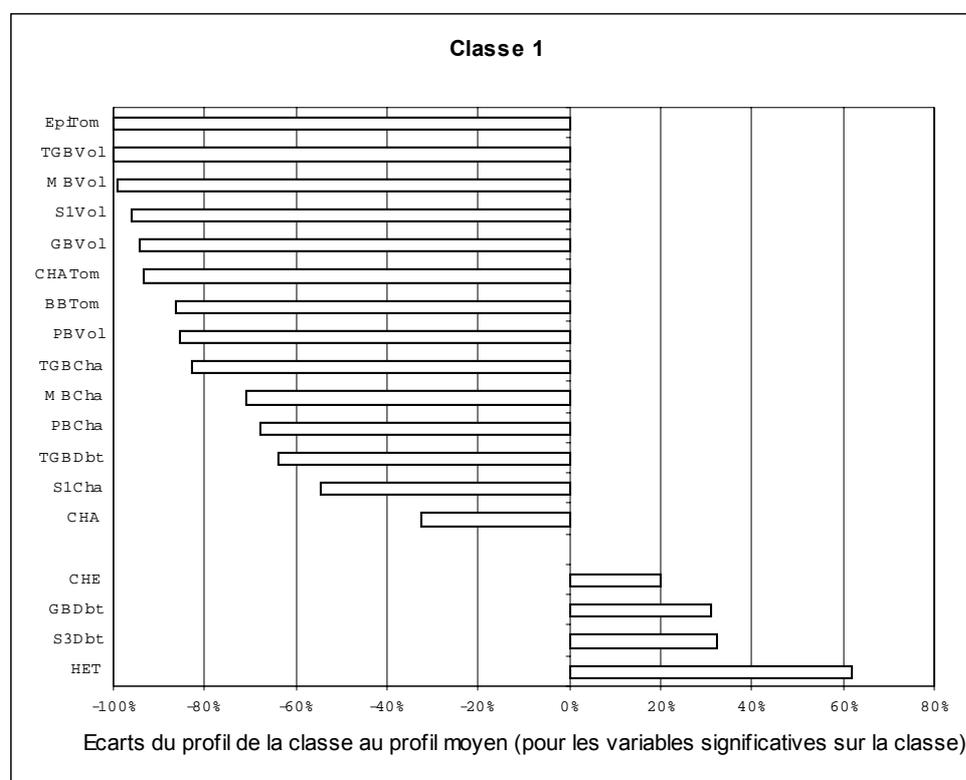
- une en trois classes, de 77, 3 et 11 placettes avec une inertie inter classes de 8,2 pour une inertie totale de 24,6 (quotient inertie inter / inertie totale = 0,33) ;
- l'autre en cinq classes, de 52, 25, 3, 6 et 5 placettes avec une inertie inter classes de 12,2 pour une inertie totale de 24,6 (quotient inertie inter / inertie totale = 0,49).

Tableau 6 – Distances des centres de classe au centre du nuage de points

n° des classes	Distances standardisées
1	2
2	5
3	91
4	43
5	68

C'est cette dernière qui est retenue. Ses cinq classes ont des profils, et des effectifs, nettement différents. Ce sont les trois dernières classes qui sont les plus singulières (*cf.* Tableau 6 des distances au centre du nuage et la Figure 31 de l'Annexe n°4). Les deux premières concernent un plus grand nombre de placettes mais sont relativement « moyennes » avec des distances standardisées de deux et de cinq. Elles sont très proches du profil moyen et se trouvent regroupées dans la partition en trois classes [(non décrite ici, *cf.* l'arbre de classification, Figure 31 de l'Annexe n°4)].

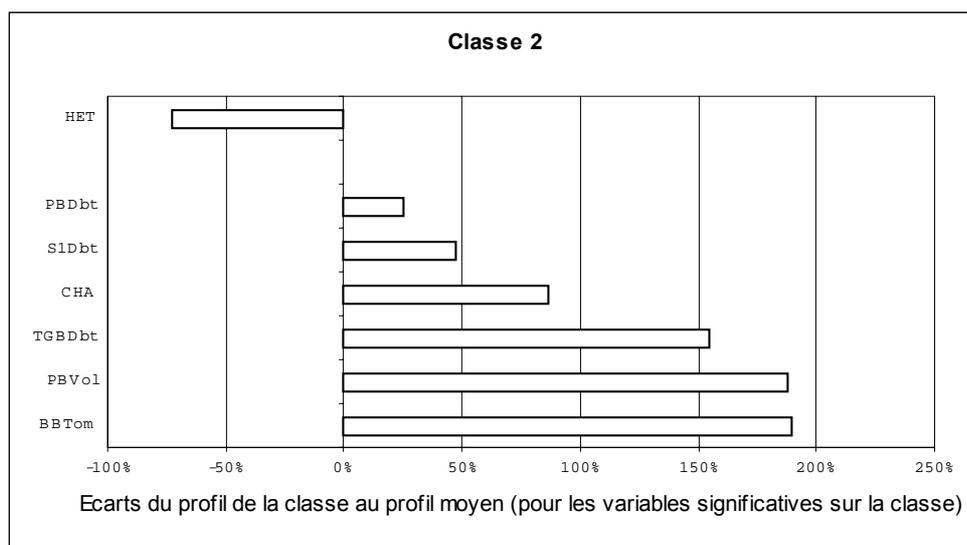
Figure 12 – Variables caractéristiques de la Classe n°1 (HC de Lyon et GF de Souvilly)



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 (exprimée en p. 100).

En terme de variables (*cf.* Figure 12), la première classe connaît toutefois une sur représentation qui concerne essentiellement les hêtres debout (HET), la strate basse debout (S3Dbt, arbres et arbustes de 2 à 7 m), le gros bois debout (GBDbt, tiges comprises entre 37,5 et 47,5 cm de diamètre) et les chênes debout (CHE). A l'inverse, sont sous représentés les dégâts (tout ce qui termine par Cha, Tom et Vol, *cf.* Annexe n°4 pour le récapitulatif des abréviations). C'est donc une forêt de feuillus peu touchée par la tempête, avec des gros diamètres, présentant un sous-bois ou un taillis, qui est décrite ici. Pour ce qui est des individus (les placettes), cette classe concerne pour une large part des points d'enquête situés dans le GF de Souvilly. Les individus de la classe n°1 (*cf.* la Figure 31 et le Tableau 40 de l'Annexe n°4) appartiennent pour seulement 17 p. 100 (9 sur 52) aux Hospices civils de Lyon.

Figure 13 - Variables caractéristiques de la Classe n°2 (HC de Lyon et GF de Souvilly)



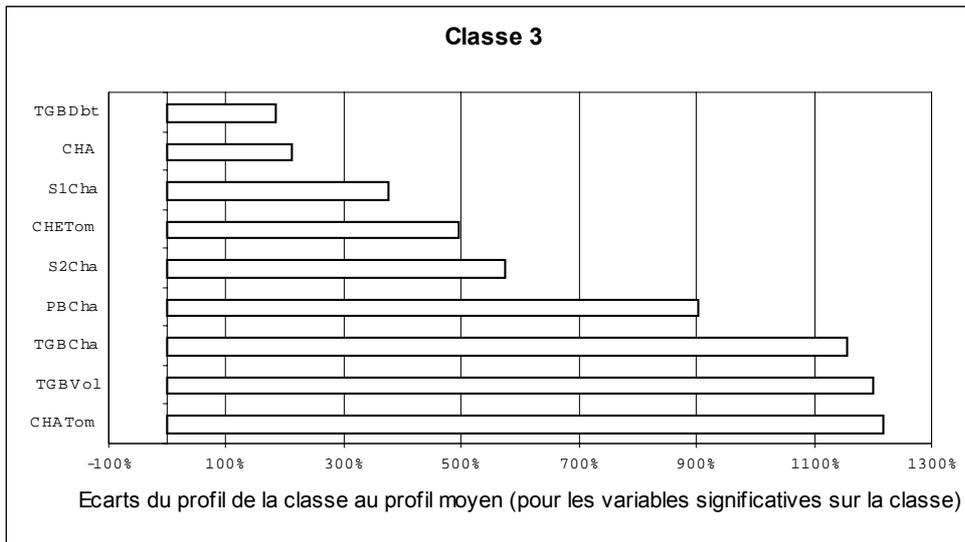
Ne sont décrites que les variables significatives (dont la valeur test est supérieure à 2)

La deuxième classe (*cf.* Figure 13) connaît une sur représentation un peu différente. Elle concerne essentiellement les dégâts sur les bois blancs (BBTom) et les volis sur les petits bois (PBVol, tiges comprises entre 17,5 et 27,5 cm de diamètre) dont la valeur du profil moyen sur la classe est presque trois fois supérieure à celle de la moyenne générale (respectivement 189 et 188 p. 100). Cependant, la sur représentation touche également la strate haute debout (S1Dbt, arbres de plus de 15 m) et le très gros bois debout (TGBDbt, tiges de plus de 47,5 cm de diamètre) et les charmes debout (CHA), mais aussi le petit bois debout (PBDbt, tiges comprises entre 17,5 et 27,5 cm de diamètre). A l'inverse, sont sous représentés les hêtres debout (HET). C'est donc une forêt de feuillus traitée en taillis-sous-futaie qui a été touchée par la tempête, mais dont c'est surtout le taillis qui a été atteint, qui est décrite ici. Pour ce qui est des individus (les placettes), cette classe concerne pour une très large part des points d'enquête situés dans les HC de Lyon. Les individus de la classe n°2 (*cf.* la Figure 31 et le Tableau 40 de l'Annexe n°4) appartiennent pour seulement 8 p. 100 (2 sur 25) au GF de Souvilly.

Contrairement aux deux précédentes, la troisième classe (ainsi que les deux suivantes) est beaucoup plus singulière [distance au barycentre de 91 (*cf.* tableau n°6 des distances au centre du nuage et le tableau n°34 de l'annexe n°4)], et ne comporte que peu de placettes (3 sur 91). De plus, elle ne connaît pas de sous représentations significatives (*cf.* Figure 14). Les sur représentations qui la caractérisent sont très fortes et très différentes. Elles pointent les dégâts de la futaie de feuillus et de son taillis. Elles concernent essentiellement les dégâts sur le charme (CHATom), les volis et chablis de très gros bois (TGBVol et TGBCha, tiges supérieures à 47,5 cm de diamètre), le chêne (CHETom) et les chablis de la strate haute (S1Cha, arbres de plus de 15m). Le petit bois (PBCha,

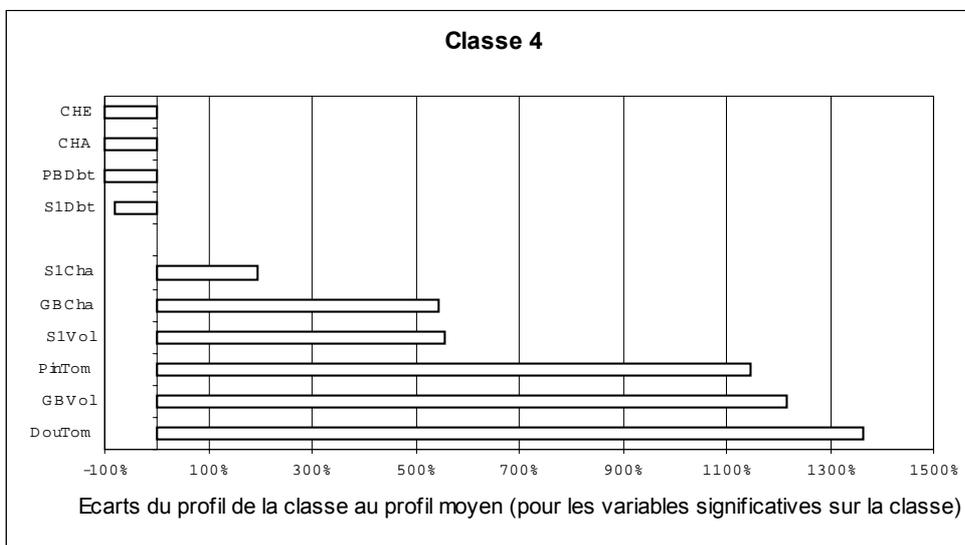
tiges comprises entre 17,5 et 27,5 cm de diamètre) de la strate intermédiaire (S2Cha, arbres de hauteurs comprises entre 7 et 15 m) en chablis est également sur représenté, marquant ici que le taillis est atteint. Ces parcelles comportent également, au-delà du profil moyen, une forte représentation de charme debout (CHA) et de très gros bois debout (TGBDbt, tiges de plus de 47,5 cm de diamètre). Pour ce qui est des individus (les placettes), cette classe ne concerne que des points d'enquête situés dans les HC de Lyon (cf. la Figure 31 et le Tableau 40 de l'Annexe n°4).

Figure 14 - Variables caractéristiques de la Classe n°3 (HC de Lyon et GF de Souvilly)



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

Figure 15 - Variables caractéristiques de la Classe n°4 (HC de Lyon et GF de Souvilly)

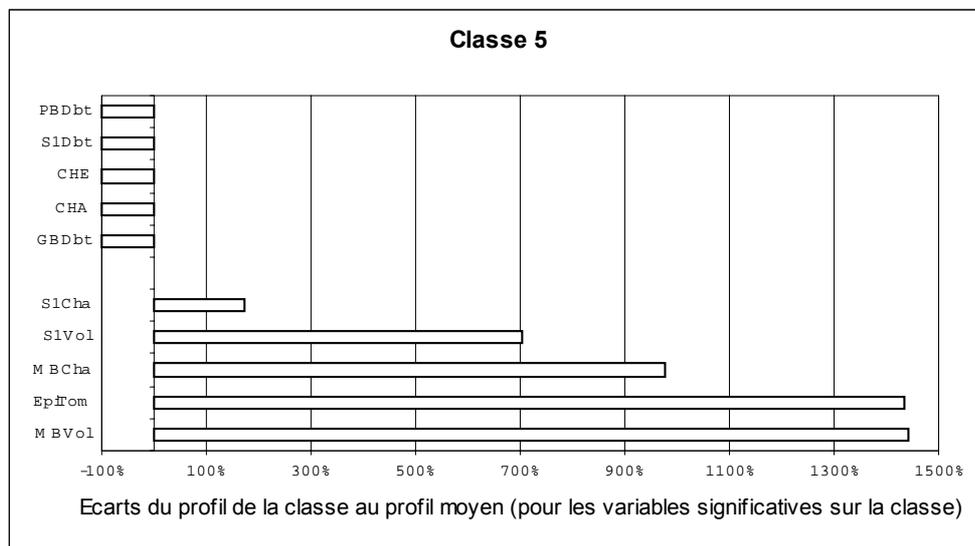


Ne sont décrites que les variables significatives (dont la valeur test est supérieure à 2)

La quatrième classe (cf. Figure 15) est également fortement typée [distance au barycentre de 43 (cf. le Tableau 6 des distances au centre du nuage et le Tableau 40 de l'Annexe n°4)], et ne comporte que peu de placettes (6 sur 91). Les sur représentations qui la caractérisent concernent les dégâts sur deux résineux, les douglas et les pins (DouTom et PinTom), mais également les chablis et volis de gros bois (GBCha et GBVol, tiges comprises entre 37,5 et 47,5 cm de diamètre) et de la strate haute (S1Cha et S1Vol, arbres de plus de 15 m de hauteur). Les sous représentations portent sur les feuillus debout (CHA et CHE) mais également sur le petit bois debout (PBDbt, tiges

comprises entre 17,5 et 27,5 cm de diamètre) et la strate haute debout (S1Dbt, arbres de plus de 15 m de hauteur). Ce qui laisse supposer qu'il n'y a plus beaucoup d'arbres debout sur ces placettes. Pour ce qui est des individus (les placettes), cette classe concerne pour une large part des points d'enquête situés dans les HC de Lyon. Les individus de la classe n°4 (cf. la Figure 31 et le Tableau 40 de l'Annexe n°4) appartiennent pour 33 p. 100 (2 sur 6) au GF de Souvilly.

Figure 16 - Variables caractéristiques de la Classe n°5 (HC de Lyon et GF de Souvilly)



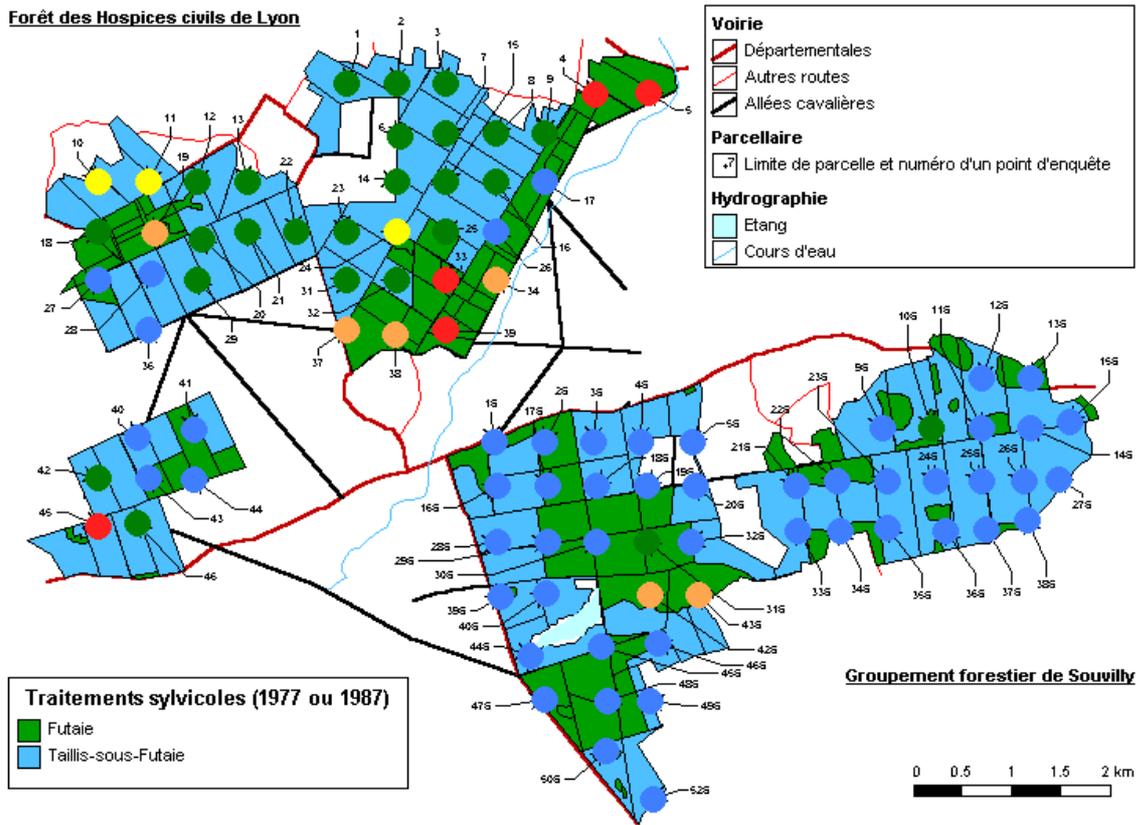
Ne sont décrites que les variables significatives (dont la valeur test est supérieure à 2)

La cinquième classe est encore plus typée [distance au barycentre de 65 (cf. le Tableau 6 et le Tableau 40 de l'Annexe n°4)], et ne comporte que peu de placettes (5 sur 91). Les sur représentations qui la caractérisent concentrent les dégâts sur un résineux, l'épicéa (EpiTom), mais également les chablis et volis de moyens bois (MBCha et MBVol, tiges comprises entre 27,5 et 37,5 cm de diamètre) et de la strate haute (S1Cha et S1Vol, arbres de plus de 15 m de hauteur). Les sous représentation sont à peu près les mêmes que pour la classe n°4 avec les gros bois debout en plus (GBDbt, tiges comprises entre 37,5 et 47,5 cm de diamètre). Là encore, les dégâts ont été sévères. Pour ce qui est des individus (les placettes), cette classe concerne pour une large part des points d'enquête situés dans les HC de Lyon. Les individus de la classe n°5 (cf. la Figure 31 et le Tableau 40 de l'Annexe n°4) appartiennent pour 40 p. 100 (2 sur 5) au GF de Souvilly.

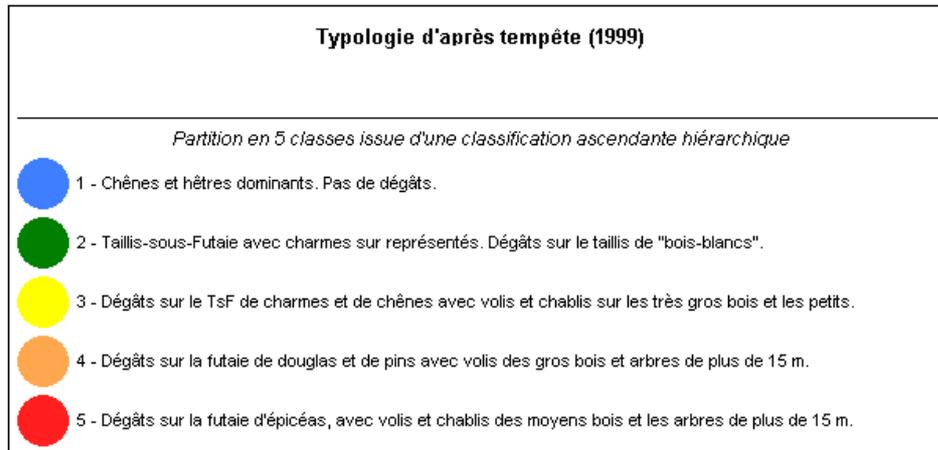
Un export de la typologie en cinq classes a été effectué vers la base de données constituée par Gwenaëlle GUIOT sous le SIG Geoconcept. Le résultat est présenté sur la Figure 17 où le support de la partition en cinq classes est la placette (implantation ponctuelle). Le fond de carte représente la révision du plan d'aménagement, pour la période 1987-2001, pour les Hospices civils de Lyon et le plan simple de gestion pour le Groupement forestier de Souvilly, pour la période 1977-2001. Ils sont illustratifs et peuvent ne plus être en parfaite adéquation avec la réalité lors de la tempête, si tant est qu'ils l'aient été en tout points.

Une répartition spatiale assez marquée caractérise cette typologie. Comme indiqué dans la description des classes, la classe n°1 est majoritaire sur le GF de Souvilly, alors que la classe n°2 l'est sur les Hospices. Les classes n°3, 4 et 5 sont globalement caractéristiques des Hospices. Une certaine contiguïté apparaît même, semblant souligner la nature du peuplement comme indiqué sur la Figure 18. Les regroupements thématiques de placettes échantillons forment une typologie. Il aurait été intéressant de la tester sur l'ensemble du secteur d'étude pour en apprécier l'extension et la pertinence spatiale. C'est un des rôles des données satellitaires. Cependant, la livraison des données télédéteectées n'a toujours pas eu lieu à l'heure où nous bouclons ce rapport. Cette analyse devrait faire l'objet d'un complément sous forme d'articles.

Figure 17 – Traitements sylvicoles et typologie en cinq classes des Forêts des Hospices civils de Lyon et celles du GF de Souvilly d’après l’enquête d’août 2000



Echelle d'édition : 1 / 60 000



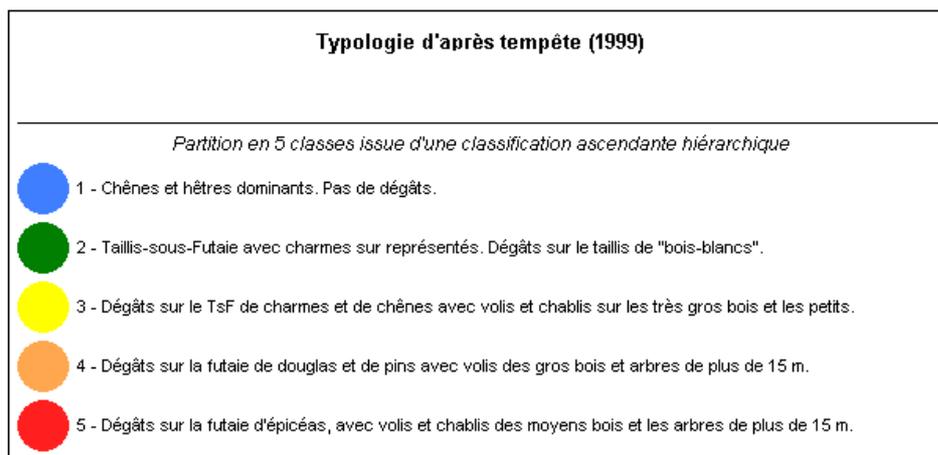
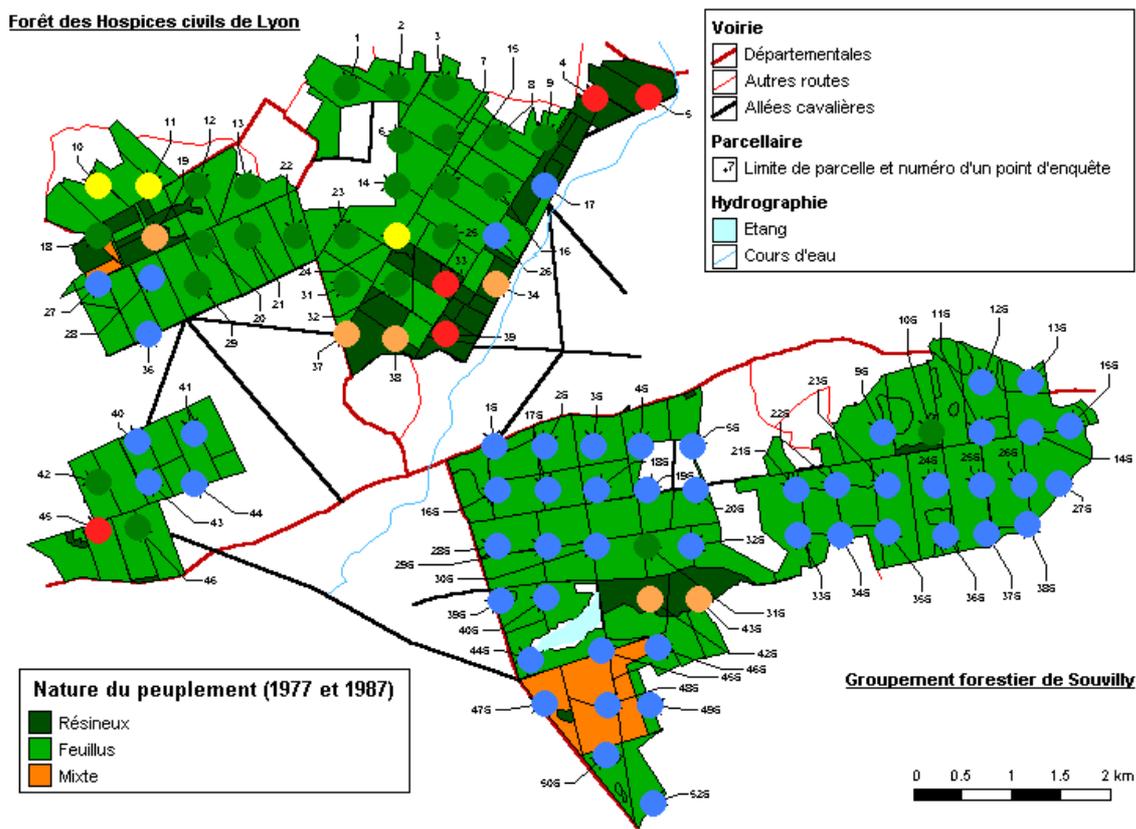
Projection : Lambert 1

Sources : enquête et conception du SIG G. GUIOT 2001, carte IGN 19140

Réalisation : vgodard@univ-paris8.fr (2003)

plan d'aménagement de 1987 pour les Hospices, PSG de 1977 pour le GF de Souvilly

Figure 18 – Nature du peuplement et typologie en cinq classes des Forêts des Hospices civils de Lyon et celles du GF de Souvilly d’après l’enquête d’août 2000



Sources : enquête et conception du SIG G. GUIOT 2001, carte IGN 19140

Réalisation : vgodard@univ-paris8.fr (2003)

plan d'aménagement de 1987 pour les Hospices, PSG de 1977 pour le GF de Souvilly

1.1.4. Typologie bivariée

Un certain nombre d'associations de variables sont apparues lors de la constitution de la typologie présentée au paragraphe précédent. L'ensemble des relations, qui caractérisent les variables de l'étude, est regroupé, pour les variables quantitatives, dans la matrice des corrélations obtenue en sortie d'analyse en composante principale (ACP, cf. Tableau 42 de l'Annexe n°4). L'analyse de cette matrice permet de dégager d'autres relations valables sur l'ensemble de la zone d'étude. Il faut pour cela retenir les corrélations significatives au seuil de 5 p.100 (seuil usuel) dans une autre matrice appelée matrice des valeurs-tests (non décrite ici). La valeur-test est égale à un nombre d'écarts-types. Ainsi lorsque la valeur-test est supérieure à 2 en valeur absolue, un écart est significatif au seuil usuel. On va donc retenir toutes les corrélations dont l'équivalent dans la matrice des valeurs-tests dépasse un certain seuil. En pratique, nous avons retenu les coefficients de corrélations supérieurs ou égaux à 60 p.100, soit une valeur-test de 6,6 ($\alpha < 1/1000$).

Deux groupes de corrélations ont été particulièrement analysés. Celui dont la relation entre variable dépasse en intensité 80 p.100 et celui où elle est comprise entre 60 et 80 p.100. Cependant, parmi celles-ci, un certain nombre sont triviales. Que les chablis de gros bois (GBCha, tiges comprises entre 37,5 et 47,5 cm de diamètre) soient fortement corrélés (79 p.100) avec les chablis d'arbres de la strate haute (S1Cha, arbres de plus de 15 m de hauteur) n'apporte pas une information totalement inédite. De même, certaine porte sur un trop petit nombre de placettes d'enquête et il est difficile d'en tirer une information ayant une portée plus générale. C'est le cas du sapin avec 11 arbres inventoriés, mais sur une seule placette.

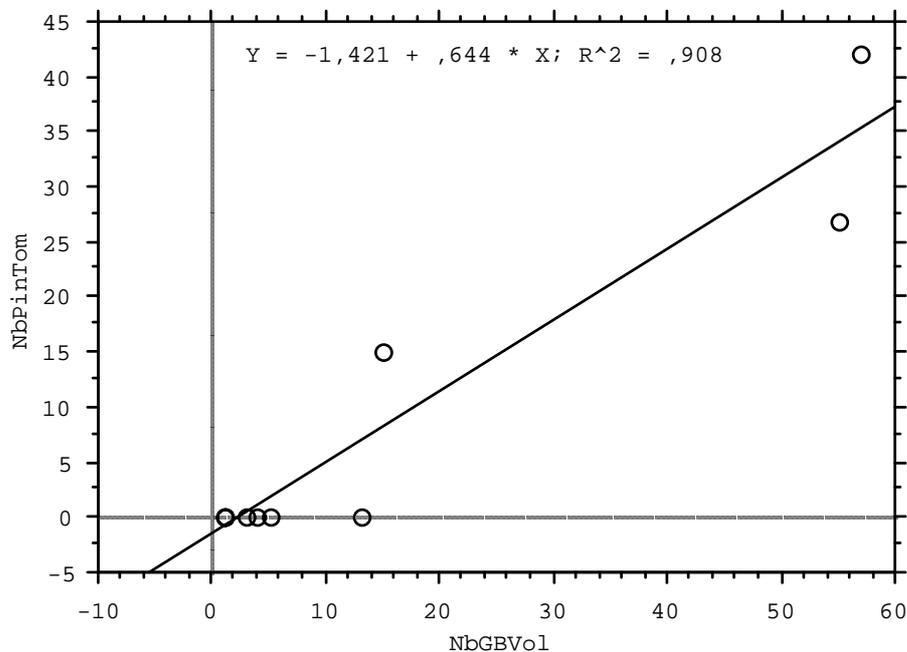
Le cas des pins est un peu différent. Quatre-vingt-quatre pins ont été inventoriés. Ils étaient tous par terre ! En soi, cette information est intéressante, mais risque de n'avoir qu'une portée locale (sur l'échantillon), car celle-ci n'a été collectée que sur seulement trois placettes et pourrait donc ne pas valoir pour l'ensemble du massif forestier. En effet, la table du coefficient de corrélation observé (cf. table d'après Fischer et Yates in SCHWARTZ, 1991, p.294) indique qu'avec trois individus dans l'échantillon, ce qui est le minimum car le nombre de degrés de liberté est alors de un ($ddl=n-2$), pour que la valeur du coefficient de corrélation calculé dépasse la valeur lue dans la table (pour la probabilité alpha égale 10 p.100), il faut que celui-ci dépasse 0,9877 (0,9969 pour $\alpha = 0,05$). Il n'est donc pas possible de statuer si l'on veut connaître l'influence des trois placettes de pins sur les volis de gros bois (GBVol, tiges comprises entre 37,5 et 47,5 cm de diamètre) qui les caractérisent. En effet, le coefficient de corrélation « r » n'est que de 0,85 sur ces trois placettes. Il est meilleur que celui lu dans la matrice des corrélations (0,82, cf. Tableau 42 de l'Annexe n°4), car celui-ci était calculé sur les 91 placettes de l'enquête, dont 88 qui ne portaient pas de pins mais accroissaient le nombre de degrés de libertés et donc la puissance du test !

En revanche, il est quand même possible de s'intéresser à la part prise dans les volis de gros bois par le pin. Treize placettes ont été enquêtées avec des volis de gros bois. Parmi celles-ci trois concernaient donc du pin (deux au GF de Souvilly et une aux HC de Lyon). Les autres concernent essentiellement les douglas et les épicéas (cf. les cercles matérialisant les placettes le long de l'axe des « X » sur la Figure 19).

Quelle est la part prise par les pins et est elle significative ? L'analyse de la liaison entre ces deux caractères quantitatifs donne un « r » de 0,77 pour 11 ddl, la liaison est significative au seuil de 1 p.100. Cependant, il est possible d'améliorer la prise en compte de la part du pin dans les volis de gros bois en éliminant de l'analyse le point d'enquête 34H qui ne concerne que le douglas (49 volis pour 49 douglas touchés), mais bien les volis de gros bois. La corrélation passe à 0,95 pour 10 ddl. Ce qui reste hautement significatif. La part de variance expliquée par le coefficient de détermination « r^2 » passe de 60 p.100 à 91 p.100. Cela signifie que le modèle, un ajustement linéaire du nuage de points (cf. Figure 19), prend en compte, maintenant, 91 p.100 de l'information contenue dans la relation exprimée par le nuage de point (contre 60 p.100 avec le 34H). Donc, il existe une très forte corrélation positive entre la « casse » du pin et les volis de gros bois sur ce

secteur de Conches-Breteuil. Quand le nombre de pins tombés augmente, le nombre de volis de gros bois augmente.

Figure 19 – Ajustement entre les volis de gros bois et les pins tombés



La différence des volis de gros bois sur le pin est-elle significative spatialement ? Avec seulement deux placettes portant des volis de gros bois de pin à Souvilly (respectivement 55 volis pour 27 pins tombés sur la 43S et 57 pour 42 sur la 42S), il n'est pas possible de conclure. Même pour des tests robustes comme le test H de Kruskal et Wallis pour deux séries (Collectif, 2000, p.130), il faut un minimum de cinq placettes par classe.

En ce qui concerne les dégâts sur l'épicéa (EpiTom) et les volis de moyens bois (MBVol, tiges comprises entre 27,5 et 37,5 cm de diamètre), la matrice des corrélations indique un « r » de 0,9, donc une liaison linéaire très forte (pour 91 placettes). Cependant, l'analyse des résidus issus de la régression entre ces deux variables montre que leur variance n'est pas constante. Or l'utilisation du test d'indépendance, basé sur le coefficient « r » suppose qu'une des régression de x en y ou d'y en x vérifie les conditions suivantes : distribution liée normale et variance constante (SCHWARTZ, 1991, p.237). De plus, le nombre de couples de valeurs est faible (n=11), il est donc préférable de recourir à des tests non paramétriques comme le rho de Spearman (SCHWARTZ, 1991, p.256). Celui-ci est de 0,661. Il est donc significatif au seuil de 5 p.100. La casse sur les épicéas est bien caractéristique des volis de bois moyens sur ce secteur de Conches-Breteuil. Cette casse par volis des moyens bois d'épicéas apporte une confirmation supplémentaire aux informations déjà collectées quant à la « ...très faible résistance au volis de l'épicéa [...] fonction du diamètre : très grande fragilité des petits bois et moyens bois, meilleure résistance des gros bois. » (RAMEAU, 2000, p.122).

Là non plus, comme pour les pin et les volis de gros bois (*cf. supra*) [en raison de la faiblesse de l'échantillon (seulement quatre placette concernées sur les onze à Souvilly)], il n'est pas possible de tester la différence entre les HC de Lyon et le GF de Souvilly pour les dégâts sur les épicéas et les volis de moyens bois.

La modélisation des autres résineux avec certains paramètres dendrométriques n'est pas satisfaisante, car bien que dotés de forts coefficients de corrélation, ces relations ne semblent pas

linéaires ou sont tributaires de quelques placettes exceptionnelles (en fonction des échantillons disponibles). C'est le cas du douglas et des chablis de gros bois, par exemple.

Le charme est un des rares feuillus à avoir un coefficient de corrélation significatif en relation avec des dégâts sur paramètres dendrométriques. En effet, avec une relation qui atteint 0,92 (pour $n = 91$) dans la matrice des corrélations (CHATom / PBCha, cf. Tableau 42 de l'Annexe n°4), cette essence se singularise nettement des autres feuillus. Avec un coefficient de corrélation sur les rangs « rho » de Spearman (SCHWARTZ, 1991, p.256) de 0,665 (pour $n = 41$), la relation entre les charmes tombés (CHATom) et les chablis de petits bois (PBCha, tiges comprises entre 17,5 et 27,5 cm de diamètre) est hautement significative avec un risque $\alpha < 0,01$. Les chablis de charmes sont prioritairement des petits diamètres.

Sont-ils pour autant exclusivement des chablis de taillis ? La relation entre les dégâts sur le charme et une affectation préférentielle en taillis, taillis sous futaie ou futaie n'est pas significative (test du H de Kruskal et Wallis où $H = 0,64$ soit un $\alpha > 0,5$!). La relation entre les chablis de petits bois et un traitement préférentiel n'est pas plus significative. En revanche, ils participent à différencier les HC de Lyon et le GF de Souvilly. La moyenne des chablis de petits bois est de 4,2 arbres dans les Hospices civils de Lyon alors qu'elle n'est que de 1,4 pour le Groupement forestier de Souvilly (différence significative au seuil $\alpha < 0,05$). Ceci est à mettre en perspective quant au nombre d'arbres vu par placette. Cinquante pour cent des placettes ont entre 25 et 51 arbres mais entre 0 et 6 chablis (cf. Tableau 5).

En conclusion des ces recherches de relations significatives, eu égard à la taille de notre échantillon de placettes (91), seules les trois relations bivariées suivantes sont significatives sur l'ensemble du secteur étudié de la Forêt de Conches-Breteuil :

- dégâts sur les pins et volis de gros bois (tiges comprises entre 37,5 et 47,5 cm de diamètre) ;
- dégâts sur les épicéas et volis sur les moyens bois (tiges comprises entre 27,5 et 37,5 cm de diamètre) ;
- dégâts sur les charmes et chablis de petits bois (tiges comprises entre 17,5 et 27,5 cm de diamètre).

Ces deux dernières relations différenciant spatialement les Hospices civils de Lyon et le Groupement forestier de Souvilly. Ce dernier étant toujours le moins touché.

D'une manière générale, pour les secteurs des Hospices civils de Lyon et du Groupement forestier de Souvilly, l'enquête de terrain permet de confirmer certains faits ou affirmations constatés en d'autres lieux, à savoir : c'est ici encore les arbres de plus de 15 m qui sont l'objet de la part significative des dégâts, qu'il n'a pas été possible de déterminer si, globalement, une classe de diamètres a été plus atteinte qu'une autre et que là également ce sont les épicéas et les douglas qui payent le plus lourd tribut à la tempête. Globalement, les Hospices civils de Lyon et du Groupement forestier de Souvilly ne sont pas touchés avec la même intensité. Ce dernier semble avoir été moins vulnérable, sans que les variables collectées ne permettent d'expliquer pourquoi.

Une typologie en cinq classes fait ressortir une première classe de feuillus « nobles » et adulte peu ou pas touchés ; une deuxième classe où la futaie de feuillus est traitée en taillis sous futaie et où c'est le taillis qui est atteint et particulièrement les « bois blancs » ; une troisième regroupant des placettes caractéristiques d'une futaie de feuillus traitée en taillis sous futaie où les chênes et les charmes sont cette fois-ci atteints sur les petits mais également sur les très gros diamètres. La quatrième et la cinquième classe concernent les résineux. La quatrième regroupe les volis et chablis des arbres de plus de 15 m et les gros diamètres essentiellement du pin et du douglas. La cinquième concerne les épicéas et la casse sur les moyennes sections.

Enfin, si l'on analyse les relations bivariées de l'ensemble des informations collectées (et pas uniquement sur les classes de la typologie), il ressort trois combinaisons significatives, à

savoir : une relation forte entre les dégâts sur les pins et volis de gros bois, les dégâts sur les épicéas et volis de moyens bois et les dégâts sur les charmes et chablis de petits bois.

1.2. Le secteur du Huttier

Les résultats présentés dans cette section sont le fruit d'une campagne de terrain, d'analyse de photographies aériennes et d'une cartographie. Ils sont repris du travail de maîtrise de Benjamin LALLEMENT (LALLEMENT, 2002). En l'absence de données numériques, ils n'ont pas été retravaillés. Ils ne sont pas issus d'un échantillon, leur significativité n'a pas été testée.

1.2.1. Les dégâts sur l'ensemble du secteur du Huttier

Sur les 1 300 ha que gère le GF de Conches-Breteil, 480 ont été atteints à des degrés divers par la tempête (*cf.* Figure 20). Ce sont les futaies résineuses et le taillis sous futaie (TSF) qui ont été les plus touchés. La futaie de feuillus n'a été que marginalement affectée. Environ 46 p.100 de la futaie résineuse, soit presque 240 ha, et 32 p.100 du TSF, soit 190 ha, sont touchés à des degrés divers. La futaie résineuse est le mode traitement le plus affecté en surface mais aussi en intensité. Si la surface des dégâts a tendance à décroître lorsque le degré d'intensité augmente pour le TSF, elle augmente progressivement pour la futaie résineuse.

Une échelle d'intensité des dégâts a été élaborée en fonction du pourcentage de dégâts constatés.

Tableau 7 – Pourcentage de dégâts et degré d'intensité

Pourcentage de dégâts	Degré d'intensité
[15 ; 21[	Très faible
[21 ; 36[	Faible
[36 ; 51[	Moyen
[51 ; 76[	Assez fort
[76 ; 91[	Fort
[91 ; 100]	Très fort

Source : LALLEMENT, 2002, p.33

Le douglas, qui occupait environ 70 p.100 (335 ha) de la futaie résineuse en 1991 (LALLEMENT, 2002, p. 19), date du dernier plan simple de gestion (PSG) a été le plus touché en surface mais pas toujours en intensité (*cf.* Figure 21). Des essences moins présentes comme l'épicéa ou le pin laricio n'apparaissent que dans les dégâts les plus forts. Cependant, en raison de la faiblesse de leur implantation, il est difficile d'en tirer des conclusions de portée plus générale.

Figure 20 – Carte d'intensité des dégâts sur le secteur du Huttier

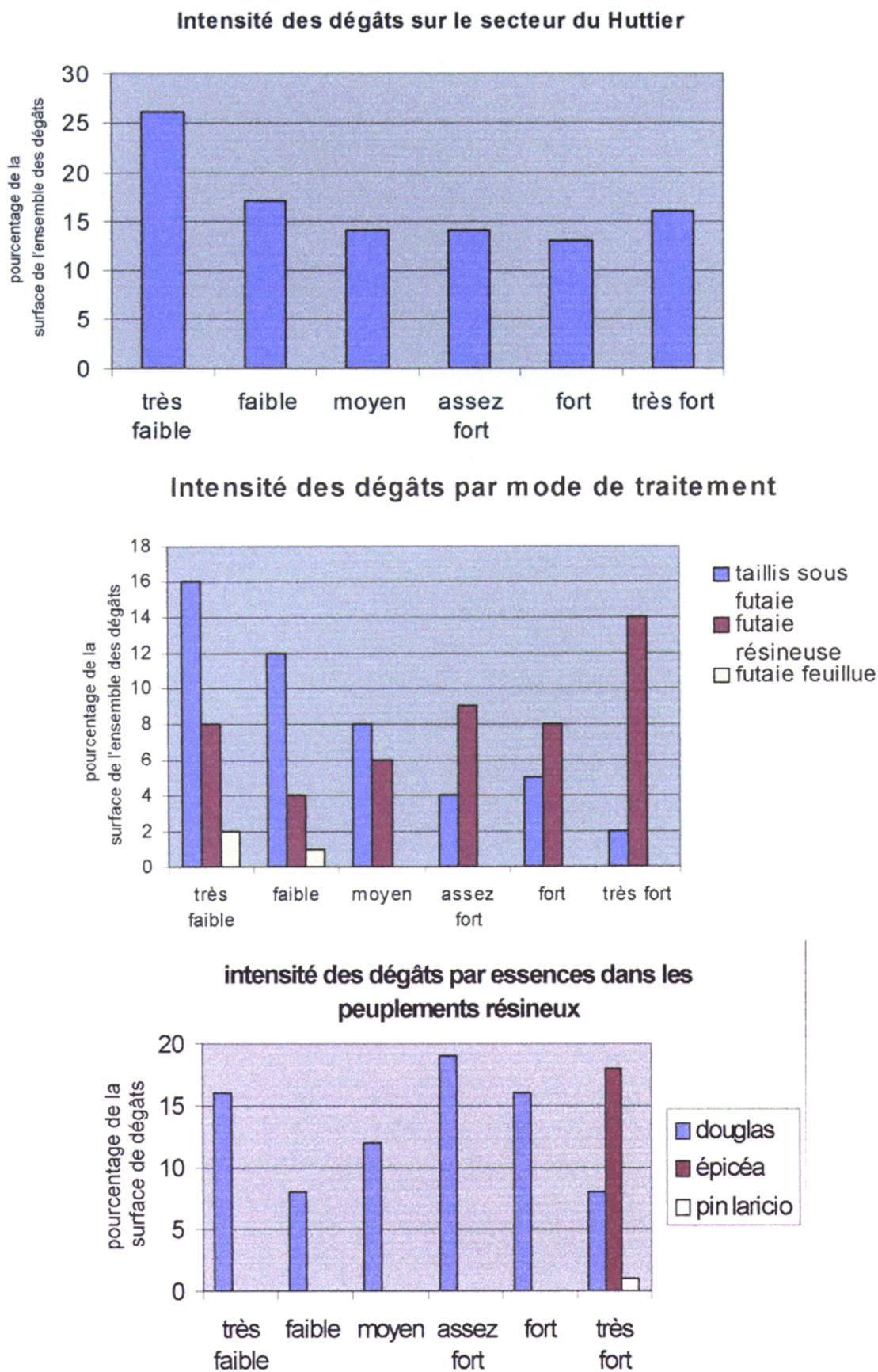
Intensité des dégâts causés par la tempête de 1999

Groupement Forestier de Conches-Breteuil : secteur du Huttier (1 300 hectares)



Sources : LALLEMENT, 2002, p.34

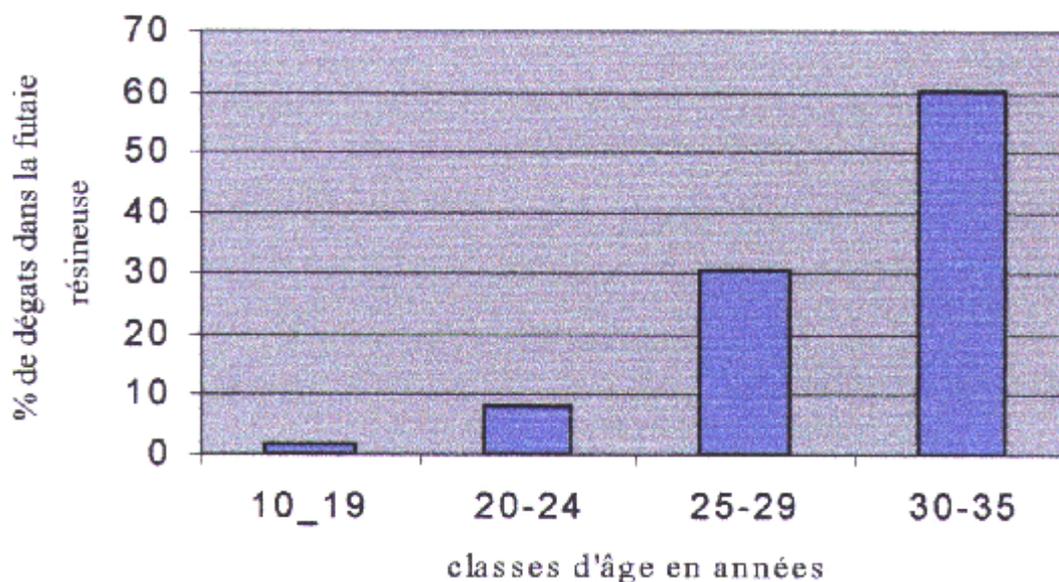
Figure 21 – Intensité des dégâts sur le secteur du Huttier



Sources : LALLEMENT, 2002, pp.35-37

Figure 22 – Dégâts dans les classes d'âge de la futaie résineuse du Huttier

**La surface de dégâts par classes d'âge dans la futaie résineuse :
antériorité = vulnérabilité**



Sources : LALLEMENT, 2002, p.53

1.2.2. Les dégâts « aspatiaux »

Parmi les 480 ha touchés par la tempête, certains dégâts sont expliqués par des phénomènes qualifiés de spatiaux (position par rapport à une coupe d'éclaircie, par exemple) ou par des phénomènes qualifiés d'aspatiaux (hauteur du peuplement, par exemple).

Pour les résineux, toutes essences confondues, c'est l'âge donc la hauteur, qui semble être un facteur déterminant (cf. Figure 21). Soixante pour cent des résineux de plus de trente ans ont été affectés par la tempête.

Le rôle des éclaircies est lui aussi mis en évidence dans la variation de l'intensité des dégâts sur les résineux. L'intensité des dégâts est inversement proportionnelle à l'ancienneté des travaux d'éclaircie (cf. Tableau 8).

Tableau 8 – Ancienneté des éclaircies et intensité des dégâts sur le secteur du Huttier

Date de la dernière coupe d'éclaircie	1995	1996	1997	1998
Intensité moyenne des dégâts dans la futaie résineuse (%)	57	58	60	64

Source : LALLEMENT, 2002, p.54

Cependant, il apparaît que la prise en compte de « l'espace » (à deux dimensions) doit permettre de mettre en avant d'autres variables explicatives des dégâts constatés sur le terrain.

1.2.3. Les dégâts « spatiaux »

Comme cela a été exposé au paragraphe 2.4.1. de la partie II, la distribution des dégâts sur le Huttier est plutôt concentrée. Il a donc été recherché autour des secteurs touchés par la tempête des variables « spatiales » explicatives. En fait, il s'agit de déterminer des effets de voisinage ou de proximité entre différents objets géographiques. C'est donc un travail sur les distances qui a été entrepris. Distances entre le centre de chaque zone de dégâts et la limite de la trouée (espace dégagé au sens large, coupe rase, emprise, très jeune plantation, ...) qui lui était le plus proche en amont de la direction du vent. Cette analyse a porté sur l'ensemble des paramètres, puis, sur une essence, le douglas, et un mode de traitement, le TSF (taillis-sous-futaie), particulièrement touchés.

D'une manière générale, les dégâts situés à proximité et à l'est d'une trouée apparaissent comme plus forts que la moyenne des dégâts (*cf.* Tableau 9). L'intensité moyenne des dégâts (moyenne des pourcentages de la surface forestière touchée) sur le Huttier est de 53 p.100. A une distance inférieure à la moyenne des distances des dégâts aux trouées (272 m), l'intensité semble plus forte (56 p.100). En fait, c'est entre 100 et 200 m que cette intensité est la plus forte, de dix points supérieurs à la moyenne (63 contre 53), toutes distances confondues. Les dégâts les plus forts ne semblent pas contigus aux trouées, mais au-delà d'un peuplement qui a fait bloc et peut-être occasionné un rebond plus lointain.

Il est possible d'essayer de préciser cette relation sur le peuplement de douglas et sur le traitement en TSF. La distance moyenne entre les troués et les peuplements de douglas est de 312 m (*cf.* Tableau 10). L'intensité moyenne des dégâts dans le douglas est de 56 p.100. Le résultat le plus significatif (en l'absence de test) est peut-être, là encore, une plus forte intensité entre 100 et 200 m et une décroissance au-delà pour le douglas.

Tableau 9 – Intensité moyenne des dégâts selon la distance aux trouées

Distance des dégâts aux trouées (m)	Intensité moyenne des dégâts à l'Est des trouées (%)
D < 272	56
272 < D	50
-	-
D < 100	54
100 < D < 200	63
200 < D < 300	48
300 < D	51

Source : LALLEMENT, 2002, p.70

Tableau 10 - Intensité moyenne des dégâts dans le douglas selon la distance aux trouées

Distance des dégâts aux trouées (m)	Intensité moyenne des dégâts à l'Est des trouées (%)
D < 312	57
312 < D	55
-	-
D < 100	65
100 < D < 200	71
200 < D < 300	40

Source : LALLEMENT, 2002, p.71

La distance moyenne entre les trouées et les TSF est de 242 m (*cf.* Tableau 11). L'intensité moyenne des dégâts dans le TSF est de 49 p.100. Le résultat le plus significatif (en l'absence de test) est, peut-être, une plus forte intensité au-delà de 200 m. Cependant, là encore, il faudrait pouvoir tester la significativité des résultats pour en proposer une meilleure analyse (plus

exploitable surtout). A l'heure où nous rédigeons ces lignes, les données chiffrées ne nous sont pas encore parvenues !

Tableau 11 - Intensité moyenne des dégâts dans le TSF selon la distance aux trouées

Distance des dégâts aux trouées (m)	Intensité moyenne des dégâts à l'Est des trouées (%)
D < 242	50
242 < D	47
-	-
D < 100	51
100 < D < 200	51
200 < D < 300	48

Source : LALLEMENT, 2002, p.72

Une des conclusions qu'il est possible de tirer de cette approche par analyse spatiale est qu'il semble que la distance aux trouées soit un facteur explicatif de l'intensité des dégâts, que, par effet de rebond sur un peuplement (bloc faisant office de tremplin), les dégâts soient repoussés à une certaine distance des trouées. Ceci reste à confirmer de manière plus probabiliste.

2. Les Forêts franciliennes

On rappelle que le bulletin départemental *Climatologie de Seine-et-Marne* (Météo France) notait que « ... l'extrême nord du département est en tempête avec un vent moyen de 90 km/h sur la région de Torcy. Une bonne partie du département est en violente tempête avec des vents de 100 à 115 km/h. Toute la partie centrale de la Seine et Marne, de la Brie melunaise à la Brie champenoise, en y incluant Meaux, a bien été affectée par un ouragan. » (Anonyme, 2000). La forêt domaniale d'Armainvilliers est située dans le secteur nord du département, alors que la forêt domaniale de Fontainebleau, dans le triangle Melun - Nemours – Montereau, était soumise à une violente tempête avec des rafales atteignant des vitesses de 122 km/h (vitesse maximale enregistrée le 26 décembre à Nemours) à 166 km/h à Melun (GRANDMOUGIN, 2002, cf. fig.2 p.12). La station de Météo France de Melun a estimé la relation entre les dégâts dus au vent et la vitesse de ce vent (GRANDMOUGIN, 2002, cf. fig. 3 p.13). On remarque qu'au-dessus de 140 km/h, les dégâts sont très importants et se généralisent même en dessous de 160 km/h.

2.1. Forêt domaniale d'Armainvilliers

Les données collectées sur la forêt domaniale d'Armainvilliers sont de type disjonctif complet. Cela signifie qu'elles ont été transformées en variables qualitatives où, pour chacune des modalités (valeurs pouvant être prises par la variable) il est répondu par oui ou par non (codage en 1 ou 0). Ceci influe sur la présentation des résultats. Une panne de disque dur et une erreur de manipulation nous ont fait perdre le fichier numérique des forêts d'Armainvilliers et d'Ozouer-le-Voulgis. Il n'a matériellement pas été possible de recréer ces données

2.1.1. Typologie bivariée

Un certain nombre d'associations de variables ont été testées pour déterminer quelles étaient celles qui semblaient, au regard de l'échantillon, être le plus en phase avec les dégâts occasionnés

par la tempête. L'ensemble des relations, qui caractérisent les variables de l'étude, est décrit par la typologie du paragraphe 2.1.2.

2.1.1.1. Part des traitements sylvicoles dans les chablis

Quelle est la part des traitements sylvicoles dans la répartition des dégâts ? Les résultats, bien que tributaires d'un découpage en quatre classes (0 à 10 % ; 11 à 40 % ; 41 à 70 % ; 71 à 100 % du bois sur pied) réalisé par le Groupe technique ONF de Gretz-Armainvilliers (JAUBERT, 2001, p.27) et d'un regroupement des deux dernières classes (41 – 100 p.100) pour des questions d'effectif lors des traitements, sont assez instructifs.

La liaison entre chablis et traitements sylvicoles est-elle significative ? Avec 113 parcelles d'enquête, il a malgré tout fallu faire un autre regroupement de modalités pour qu'il soit possible de tester la significativité de la liaison à l'aide du test du khi deux (SCHWARTZ, 1991, p.75 et suivantes). Avec un khi2 de 14,91 (pour 2 ddl), la liaison est hautement significative au risque $\alpha = 0,01$. L'intensité de la liaison, mesurée par le coefficient " T " de Tschuprow (CHADULE, 1997, p.90), n'est que moyenne (T = 0,31). Un " T " valant zéro marque l'indépendance mathématique, un " T " valant un indique une liaison mathématique. Le traitement en futaie (F), taillis sous futaie (TSF) ou taillis simple (TS) n'explique donc pas à lui seul l'importance et la répartition des chablis qui caractérisent la forêt domaniale d'Armainvilliers. Nous verrons plus loin que d'autres variables ont des parts explicatives plus importantes. Cependant, bien que non exhaustive, cette relation comporte des informations intéressantes à détailler. Notons, que toutes les associations de modalités ne contribuent pas de la même manière au khi2 calculé (cf. Tableau 12).

L'analyse de la distribution marginale de ce tableau informe du poids de certaines modalités. La futaie est sur représentée dans le calcul du khi2 (58 %) par rapport à l'association taillis simple plus taillis sous futaie qui ne représente que 42 p.100 du khi2. De même, les forts dégâts (41 - 100 %) ne représentent qu'un cinquième de la liaison, alors que les dégâts moyens (11 - 40 %) sont à un peu plus du tiers (34 %) et les faibles dégâts (0 - 10 %) presque la moitié (46 %).

Tableau 12 – Contribution relative de chaque couple de modalités des chablis et traitements au Khi2

Chablis\Traitements	Futaie	TSF+TS	Total lig.
0 - 10 %	26%	19%	46%
11 - 40 %	20%	14%	34%
41 - 100 %	12%	9%	20%
Total col.	58%	42%	100%

Dans l'analyse de la partie centrale de ce tableau, il faut distinguer deux groupes. Celui qui est dans les tons chauds, dont l'écart à l'indépendance est positif et indique une surreprésentation de l'association des modalités au calcul du khi2, et celui qui est dans les tons froids, dont l'écart à l'indépendance est négatif et indique une sous représentation de l'association.

Plus du quart (26 p.100) de la contribution au khi2 calculé est le fait de la seule association " futaie – 0 à 10 % d'arbres touchés ". La futaie a donc été peu touchée. Ceci est confirmé par les deux autres associations qui la concernent. Un cinquième (20 p.100) de la contribution au khi2 calculé est le fait de l'association " futaie – 11 à 40 % d'arbres touchés ". De plus celle-ci est bleu, donc négative, donc indique une sous représentation de cette liaison dans le khi2 [idem, en moins marqué, pour la classe des plus forts chablis (41 - 100 %)].

En revanche, le regroupement des modalités " taillis sous futaie (TSF) et taillis simple (TS) " est marqué par une sur représentation dans le calcul du khi2, surtout pour la classe des 11 à 40 p.100 (14 %) et dans une moindre mesure celle des forts dégâts [(41 - 100 %), avec 9 %]. C'est donc le taillis et dans une moindre mesure le taillis sous futaie qui a été le plus touché.

La liaison entre les chablis et le traitement est essentiellement liée à trois associations de modalités (sur 6 pour l'ensemble de la distribution). Elles contribuent pour 65 p.100 à la valeur du khi2 calculé. Les dégâts sont faibles à moyens (80 p.100 des contributions) et les futaies y sont sous représentées. L'analyse spécifique du traitement en futaie face aux chablis le confirme.

2.1.1.2. Part du traitement en futaie dans les chablis

Quelle est la part des différents stades du traitement en futaie dans la répartition des dégâts ?

Avec un khi2 de 18,76 (pour 2 ddl), la liaison est hautement significative au risque $\alpha = 0,01$. L'intensité de la liaison, mesurée par le coefficient " T " de Tschuprow, est peu différente de celle vue au point précédent (T = 0,29). Là encore, les différents stades du traitement en futaie n'expliquent pas à eux seuls l'importance et la répartition des chablis qui caractérisent la forêt domaniale d'Armainvilliers, mais ils apportent un éclairage intéressant. Notons, que la présence d'un étage de taillis transparait dans la modalité " Absence et jeunes plantations ".

L'analyse de la distribution marginale de ce tableau informe du poids de certaines modalités. La futaie jeune (Perchis et jeunes futaies) est sur représentée dans le calcul du khi2 (64 %) par rapport deux autres modalités qui ne représente que 37 p.100 du khi2. Les forts dégâts (41 - 100 %) représentent, cette fois-ci, un tiers de la liaison, alors que les dégâts moyens (11 - 40 %) sont à un peu plus du quart (26 %) et les faibles dégâts (0 - 10 %) en représentent deux cinquièmes (41 %). La modalité " Absence " renvoie aux taillis que l'on analysera en détails au prochain point.

Tableau 13 - Contribution relative de chaque couple de modalités des chablis et des différents stades de la futaie au Khi2

Chablis\Futaies	Absence et jeunes plantations	Perchis et jeunes futaies	Futaies adultes et âgées	Total lig.
0 - 10 %	6%	29%	6%	41%
11 - 40 %	0%	16%	10%	26%
41 - 100 %	15%	18%	0%	33%
Total col.	21%	64%	16%	100%

Dans l'analyse de la partie centrale de ce tableau, il faut distinguer deux groupes. Celui qui est dans les tons chauds, dont l'écart à l'indépendance est positif et indique une surreprésentation de l'association des modalités au calcul du khi2, et celui qui est dans les tons froids, dont l'écart à l'indépendance est négatif et indique une sous représentation de l'association.

Plus du quart (29 p.100) de la contribution au khi2 calculé est le fait de la seule association " Perchis et jeunes futaie – 0 à 10 % d'arbres touchés ". Les jeunes futaies ont donc logiquement été peu touchées. Ceci est confirmé par les deux autres associations qui la concernent. Environ un tiers (16 + 18 = 34 p.100) de la contribution au khi2 calculé est le fait des combinaisons " Perchis et jeunes futaie – 11 à 100 % d'arbres touchés ". De plus celles-ci sont " bleu ", donc négatives, donc indiquent une sous représentation de cette liaison dans le khi2.

En revanche, l'association " Futaies adultes et âgées " est marquée par une légère sur représentation dans le calcul du khi2, pour la classe des 11 à 40 p.100 (10 %). Les futaies adultes n'ont donc été que " légèrement " touchées. Il n'en va pas de même avec " Absence de futaie et jeunes plantations " nettement sur représentée pour les forts dégâts. Ceci est à assimiler à un artefact de calcul lié au traitement différé des TSF et taillis simples (cf. III. 1.1.4.3.).

La liaison entre les chablis et les différents stades du traitement en futaie est essentiellement liée à trois associations de modalités (sur 9 pour l'ensemble de la distribution). Elles contribuent pour 63 p.100 à la valeur du khi2 calculé. Les dégâts sont un peu plus élevé que précédemment, ils sont faibles à moyens pour 67 p.100 des contributions et les futaies y sont sous représentées. L'analyse spécifique du traitement en taillis face aux chablis le confirme.

2.1.1.3. Part du traitement en taillis dans les chablis

Quelle est la part des différents stades du traitement en taillis dans la répartition des dégâts ?

Avec un khi2 de 16,2 (pour 2 ddl), la liaison est hautement significative au risque $\alpha = 0,01$. L'intensité de la liaison, mesurée par le coefficient " T " de Tschuprow, est légèrement supérieure à celle vue aux points précédents ($T = 0,32$). Il a toutefois fallu regrouper certaines des modalités de la variable taillis. Un trop grand nombre d'associations de modalités (12,) au regard du nombre de placettes (113), rendait le calcul du khi2 impossible. Le calcul de significativité n'a été possible qu'en mettant ensemble " Absence et jeunes taillis " d'une part et d'autre part les " Taillis balivables, recépables, vieux et épuisés ". Ces regroupements, un peu brutaux, apportent, quand même, un éclairage intéressant (cf. Tableau 14). La présence d'un étage de futaie transparaît dans la modalité " Absence et jeunes taillis ".

L'analyse de la distribution marginale de ce tableau informe du poids de certaines modalités. Le vieux taillis " T. balivables, recépables, vieux et épuisés " est sur représenté dans le calcul du khi2 (62 %) par rapport aux jeunes taillis (ou à son absence) qui ne représente que 38 p.100 du khi2. Les forts dégâts (41 - 100 %) représentent, cette fois-ci, deux cinquièmes de la liaison, alors que les dégâts moyens (11 - 40 %) n'atteignent pas le cinquième (18 %) et les faibles dégâts (0 - 10 %) en représentent presque la moitié (45 %). La modalité " Absence " renvoie, en partie, aux futaies vues précédemment.

Tableau 14 - Contribution relative de chaque couple de modalités des chablis et des différents stades du taillis au Khi2

Chablis\Taillis	Absence et jeunes taillis	T. balivables, recépables, vieux et épuisés	Total lig.
0 - 10 %	17%	28%	45%
11 - 40 %	7%	11%	18%
41 - 100 %	14%	23%	38%
Total col.	38%	62%	100%

Dans l'analyse de la partie centrale de ce tableau, il faut distinguer deux groupes. Celui qui est dans les tons chauds, dont l'écart à l'indépendance est positif et indique une surreprésentation de l'association des modalités au calcul du khi2, et celui qui est dans les tons froids, dont l'écart à l'indépendance est négatif et indique une sous représentation de l'association.

Plus du tiers (11 + 23 = 34 p.100) de la contribution au khi2 calculé est le fait du regroupement de deux associations de modalités " T. balivables, recépables, vieux et épuisés – 11 à 40 % et 41 à 100 % d'arbres touchés ". C'est donc bien les " vieux " et surtout les " très vieux taillis " qui ont été touchés. La plus forte association de modalités est " bleu ", donc négative, elle indique une sous représentation de ces mêmes taillis avec les plus faibles dégâts dans le calcul du khi2.

En revanche, l'association " Absence et jeunes taillis " est marquée par une surreprésentation dans le calcul du khi2, pour la classe des 0 à 10 p.100 (17 %). Les futaies n'ont donc été que " légèrement " touchées par rapport au taillis.

La liaison entre les chablis et les différents stades du traitement en taillis est, là encore, essentiellement liée à trois associations de modalités (sur 6 pour l'ensemble de cette distribution). Elles contribuent pour 68 p.100 à la valeur du khi2 calculé. Les dégâts sont nettement plus élevés que précédemment, ils sont moyens à forts pour 56 p.100 des contributions et les vieux taillis y sont sur représentés.

2.1.1.4. Part des différentes essences dans les chablis

Quelle est la part des différentes essences dans la répartition des dégâts ?

Avec un khi2 de 30,81 (pour 2 ddl), la liaison est hautement significative au risque $\alpha = 0,01$. L'intensité de la liaison, mesurée par le coefficient " T " de Tschuprow, est la plus élevée de cette étude (T = 0,37). Là encore, nous avons dû regrouper certaines des modalités de la variable essence, en particulier les résineux et les " Autres feuillus " (cf. le détails des essences en Annexe n°35). Un trop grand nombre d'associations de modalités (12,) au regard du nombre de placettes (113), rendait le calcul du khi2 impossible. Ces associations, bien que regroupées, ne sont pas dénuées de pertinence dans la compréhension des effets de la tempête (cf. Tableau 15).

L'analyse de la distribution marginale de ce tableau informe du poids de certaines modalités. Les chênes sont sur représentés dans le calcul du khi2 (50 %, voire 57 %) par rapport aux " Autres feuillus et résineux " qui ne représente que 43 p.100 du khi2. Les forts dégâts (41 - 100 %) représentent, cette fois-ci, un bon tiers de la liaison, alors que les dégâts moyens (11 - 40 %) n'atteignent pas le quart (22 %) et les faibles dégâts (0 - 10 %) en représentent un peu plus des deux cinquièmes (42 %).

Tableau 15 - Contribution relative de chaque couple de modalités des chablis et des différentes essences au Khi2

Chablis\Essences	Chênes	Chênes et autres feuillus	Autres feuillus et résineux	Total lig.
0 - 10 %	23%	1%	18%	42%
11 - 40 %	13%	5%	3%	22%
41 - 100 %	13%	0%	23%	36%
Total col.	50%	7%	43%	100%

Dans l'analyse de la partie centrale de ce tableau, il faut distinguer deux groupes. Celui qui est dans les tons chauds, dont l'écart à l'indépendance est positif et indique une surreprésentation de l'association des modalités au calcul du khi2, et celui qui est dans les tons froids, dont l'écart à l'indépendance est négatif et indique une sous représentation de l'association.

Deux associations de modalités sont sur représentées. Il s'agit des " Chênes – 0 à 10 % d'arbres touchés " et des " Autres feuillus et résineux – 41 à 100 % d'arbres touchés ". Ce sont bien, là encore, les essences d'accompagnement qui caractérisent le taillis vieillissant qui sont touchées et l'essence objectif, le chêne qui est resté en place. Cependant, comme il n'a pas été possible d'isoler les résineux (seulement 7 parcelles enquêtées sur 113), il est difficile d'évaluer leur part dans cette surreprésentation. Il n'y a qu'une faible contribution positive (5 p.100) pour l'association de modalités " Chênes et autres feuillus – 41 à 100 % d'arbres touchés ". Elle reste donc en retrait par rapport aux deux autres modalités.

La liaison entre les chablis et les différentes essences est, là encore, essentiellement liée à trois associations de modalités (sur 9 pour l'ensemble de cette distribution). Elles contribuent pour 64 p.100 à la valeur du khi2 calculé. Les dégâts sont assez élevés. Ils sont moyens à forts pour 58 p.100 des contributions et les " Autres feuillus et résineux " y sont sur représentés, sans que l'on puisse faire la part de l'un et de l'autre.

2.1.1.5. Part de la hauteur des peuplements dans les chablis

Quelle est la part de la hauteur des peuplements dans la répartition des dégâts ?

Avec un khi2 de 17,32 (pour 2 ddl), la liaison est hautement significative au risque $\alpha = 0,01$. L'intensité de la liaison, mesurée par le coefficient " T " de Tschuprow, est une des plus élevées de cette étude (T = 0,28). Là encore, nous avons dû regrouper certaines des modalités de la variable " Hauteur du peuplement ", en particulier les faibles hauteurs. Toutes les classes à moins de 15

mètres ont été regroupées. La classe des “ 26 – 30m ” à d’ailleurs été supprimée faute de peuplement enquêté de cette hauteur (cf. le détail des hauteurs en Annexe n°3). Ces associations, bien que regroupées, apportent, là aussi, un éclairage intéressant (cf. Tableau 16).

L’analyse de la distribution marginale de ce tableau informe du poids de certaines modalités. Les “ 26 – 30m ” sont sur représentés dans le calcul du khi2 (61 %) par rapport aux “ 0 – 15m ”, qui ne représente que 22 p.100 du khi2, ou les “ 21 – 25m ” qui ne représente que 17 p.100 du khi2. Les forts dégâts (41 - 100 %) représentent, cette fois-ci, un bon quart de la liaison, alors que les dégâts moyens (11 - 40 %) dépassent le quart (35 %) et les faibles dégâts (0 - 10 %) en représentent un peu moins des deux cinquièmes (38 %).

Tableau 16 - Contribution relative de chaque couple de modalités des chablis et des différentes hauteurs de peuplements au Khi2

Chablis\Hauteur	0-15m	16-20m	21-25m	Total lig.
0 - 10 %	6%	28%	4%	38%
11 - 40 %	0%	23%	12%	35%
41 - 100 %	16%	10%	0%	26%
Total col.	22%	61%	17%	100%

Dans l’analyse de la partie centrale de ce tableau, il faut distinguer deux groupes. Celui qui est dans les tons chauds, dont l’écart à l’indépendance est positif et indique une surreprésentation de l’association des modalités au calcul du khi2, et celui qui est dans les tons froids, dont l’écart à l’indépendance est négatif et indique une sous représentation de l’association.

Trois associations de modalités sont plus particulièrement sur représentées. Il s’agit des “ 16-20m – 0 à 10 % d’arbres touchés ”, des “ 0-15 m – 41 à 100 % d’arbres touchés ” et des “ 21-25 m - 41 à 100 % d’arbres touchés ”. En revanche, est particulièrement sous représentée, l’association “ 16-20m – 11 à 40 % d’arbres touchés ”. Cela signifie que la tranche de hauteurs “ 16-20m ” a été peu affectée à Armainvilliers, alors que la tranche la plus faible (le taillis ?) a subi les dégâts les plus forts, suivit, dans une moindre mesure par les grands arbres. L’analyse de la répartition des traitements par strate de structures verticales confirme cette répartition.

Tableau 17 – Relation entre hauteur des peuplements et traitements sylvicoles en FD d’Armainvilliers

Hauteur\Traitement	Futaie	Taillis ss Futaie	Taillis Simple	Total lig.
0-15m	10%	0%	100%	25%
16-20m	63%	0%	0%	27%
21-25m	27%	100%	0%	49%
Total col.	100%	100%	100%	100%

On constate (total marginal) la FD d’Armainvilliers est pour un quart composée d’arbres de moins de 15 m, pour un peu plus du quart, d’arbres de 16 à 20 m et pour presque la moitié, d’arbres de plus de 20 m. A l’intérieur du tableau, si 10 p.100 des futaie font moins de 15 m, c’est la totalité du taillis. D’où cette sur représentation dans le tableau précédent des dégâts dans la strate des moins de 15 m.

La relation entre les chablis et les différentes hauteurs de peuplement est, là encore, essentiellement liée à trois associations de modalités (sur 9 pour l’ensemble de cette distribution, cf. Tableau 17). Elles contribuent pour 67 p.100 à la valeur du khi2 calculé. Les dégâts sont assez élevés. Ils sont moyens à forts pour 61 p.100 des contributions et les peuplements de petites tailles y sont les plus sur représentés

La présence des mares, assez nombreuses (39 parcelles sur 113 en ont une), des coupes faibles ou fortes dans les cinq ans qui ont précédé la tempête, ou bien encore, les différences de hauteur intra parcellaire de la canopée n’ont pas pu être mise en évidence de manière significative

par rapport aux classes de dégâts dont on disposait. Cela n'exclue pas leur influence, mais elle n'est pas démontrée ici.

De cette analyse, il ressort qu'en terme de traitements sylvicoles, les futaies ont été peu touchées contrairement aux taillis sous futaie mais surtout aux taillis. Ceux-ci ont été particulièrement affectés par la tempête de 1999 car ils avaient souvent plus d'une rotation (stades balivables ou recépables, voire, vieux ou épuisés). Ce sont eux qui ont été significativement touchés. Logiquement, le chêne a peu souffert de cet épisode tempétueux, alors que les autres feuillus (probablement des essences d'accompagnement) et les résineux ont été très touchés. Enfin, ce sont les peuplements bas (- de 15 m) qui ont le plus souffert, nettement avant les plus de 20 m. Ceci est un corollaire des dégâts sur le taillis.

2.1.2. Typologie multivariée

Là encore, la constitution d'une typologie permet de dégager les variables les plus significatives, en terme de description, de la forêt étudiée. Les variables liées aux dégâts sont-elles les plus caractéristiques et quelles sont les variables sylvicoles qui leurs sont associées ? C'est à ces questions que ce paragraphe doit répondre.

Tableau 18 – Distances des centres de classe au centre du nuage de points

Libellé	Effectif	Distance à l'origine
CLASSE 1 / 10	5	1.15
CLASSE 2 / 10	18	0.61
CLASSE 3 / 10	7	0.77
CLASSE 4 / 10	9	0.27
CLASSE 5 / 10	17	0.39
CLASSE 6 / 10	13	0.51
CLASSE 7 / 10	5	1.97
CLASSE 8 / 10	6	1.30
CLASSE 9 / 10	5	1.15
CLASSE 10 / 10	28	0.52

Les données d'origine (variables actives) sont moins nombreuses que pour Conches-Breteuil ou pour Fontainebleau (respectivement 14, 40 et 19 variables). Cependant, dans la mesure où, le tableau d'information a été traité en tableau disjonctif complet (*cf.* II.2.1.3), l'éclatement de ce tableau produit 24 modalités (questions actives de SPAD, *cf.* Tableau 40 de l'Annexe n°3) soit 54 modalités associées (traitées en 0 et 1). Des ACM (analyses des correspondances multiples) puis des CAH (classifications ascendantes hiérarchiques), comme indiqué au 2.1.3 du II, leur ont été appliquées. Sur les trois partitions demandées, SPAD V.5 en propose effectivement trois :

- une en trois classes, de 23, 46 et 44 sous parcelles avec une inertie inter classes de 0,35 pour une inertie totale de 0,87 (quotient inertie inter / inertie totale = 0,40) ;
- une en six classes, de 23, 46, 5, 6, 5 et 28 sous parcelles avec une inertie inter classes de 0,56 pour une inertie totale de 0, 87 (quotient inertie inter / inertie totale = 0,64) ;
- et enfin une en dix classes, de 5, 18, 7, 9, 17, 13, 5, 6, 5 et 28 sous parcelles avec une inertie inter classes de 0,67 pour une inertie totale de 0, 87 (quotient inertie inter / inertie totale = 0,77).

C'est la dernière qui est retenue car elle ne comporte pas d'individus isolés constituant une classe à lui tout seul, et offre un contenu informationnel qui permet de faire apparaître les dégâts parmi les descripteurs de classes. Ce n'est pas le cas avec les autres partitions. De plus, les

indicateurs empiriques du nombre de classes pour 113 parcelles et sous parcelles, tels ceux de Huntsberger ou Brooks-Carruthers (CHADULE, 1997, p.36), indique respectivement que le nombre de classes peut être compris entre sept et dix. Ces dix classes ont des profils, et des effectifs, nettement différents. Ce sont les première, septième, huitième et neuvième classes qui sont les plus singulières (cf. Tableau 18 des distances au centre du nuage et le tableau).

La classe n°1 représente 4,4 p.100 des parcelles et sous parcelles décrites. Les cinq modalités actives de celle-ci sont par ordres décroissants de sur représentation par rapport au profil moyen de la population enquêtée : les chablis touchant plus de 75 p.100 des arbres de la parcelle (ch100=1), le taillis simple ou sous futaie (TS=1), les arbres de la strate 11 à 15 m (11-15m=1), l'absence de chêne (CHE=0) et enfin, le taillis en âge d'être exploité qu'il soit balivable ou recépageable (TBaRe=1). Ainsi :

- 100 p.100 des parcelles de cette classe ont un pourcentage de dégâts supérieur à 75 p.100 [alors qu'en moyenne il est de 10 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon (cf. Tableau 19)] ;
- 100 p.100 des parcelles de cette classe sont en taillis (alors qu'elles ne sont que 20 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- 100 p.100 des parcelles de cette classe ont des peuplements entre 11 et 15 m (alors qu'elles ne sont que 20 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune des parcelles ne possède de chêne (alors qu'elles ne sont que 29 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- 100 p.100 des parcelles de cette classe ont un taillis balivable ou recépageable (alors qu'elles ne sont que 31 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon).

C'est donc une classe de forts chablis ayant touché un taillis simple de moins de 15 m balivable ou recépageable ou le chêne est absent.

Tableau 19 - Variables caractéristiques de la Classe n°1 (FD d'Armainvilliers)

Modalités caractéristiques	% de la modalité dans la classe	% de la modalité dans la population
ch100=1	100	10
TS=1	100	20
11-15m=1	100	20
CHE=0	100	29
TBaRe=1	100	31

La classe n°2 représente 15,9 p.100 des parcelles et sous parcelles décrites. Les onze modalités actives de celle-ci sont par ordres décroissants de sur représentation par rapport au profil moyen de la population enquêtée : le taillis simple (TS=1), les arbres de la strate 11 à 15 m (11-15m=1), l'absence de chêne (CHE=0), l'absence de strate 21 à 25 m (21 – 25=0), la présence de la catégorie d'essence autres feuillus (AutrF=1), l'absence de futaie (F=0), des taillis sous futaie (TSF=0), de futaie âgée (Fagé=0), de la strate des 16 à 20 m(16-20m=0), de la futaie au stade du perchis (perchi=0) mais là aussi un taillis en âge d'être exploité qu'il soit balivable ou recépageable (TBaRe=1). Ainsi :

- 100 p.100 des parcelles de cette classe sont en taillis simple [alors qu'elles ne sont que 20 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon (cf. Tableau 20)] ;
- 100 p.100 des parcelles de cette classe ont des peuplements entre 11 et 15 m (alors qu'elles ne sont que 20 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune des parcelles ne possède de chêne (alors qu'elles ne sont que 29 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;

- aucune des parcelles n'a des peuplements entre 21 et 25 m (alors qu'elles ne sont que 51 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- 100 p.100 des parcelles de cette classe ont des essences regroupées dans la catégorie autres feuillus (alors qu'elles ne sont que 56 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune des parcelles n'a de futaie pure (alors qu'elles ne sont que 58 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune des parcelles n'a de taillis sous futaie (alors qu'elles ne sont que 63 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune des parcelles n'a de futaie âgée (alors qu'elles ne sont que 71 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune des parcelles n'a des peuplements entre 16 et 20 m (alors qu'elles ne sont que 73 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- 61 p.100 des parcelles de cette classe ont un taillis balivable ou recépage (alors qu'elles ne sont que 31 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune des parcelles n'a de perchis (alors qu'elles ne sont que 76 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon).

C'est donc une classe sans dégâts notoires caractérisée par un taillis simple de moins de 15 m balivable ou recépage ou le chêne est absent, mais pas les autres essences et qui ne possède pas de futaie.

Tableau 20 - Variables caractéristiques de la Classe n°2 (FD d'Armainvilliers)

Modalités caractéristiques	% de la modalité dans la classe	% de la modalité dans la population
TS=1	100	20
11-15m=1	100	20
CHE=0	100	29
21-25m=0	100	51
AutrF=1	100	56
F=0	100	58
TSF=0	100	63
Fagé=0	100	71
16-20m=0	100	73
TBaRe=1	61	31
perchi=0	100	76

La classe n°3 représente 6,2 p.100 des parcelles et sous parcelles décrites. Les trois modalités actives de celle-ci sont par ordre décroissants de sur représentation par rapport au profil moyen de la population enquêtée : le taillis vieux ou épuisé (TviEp=1), les taillis sous futaie (TSF=1) et les arbres de la strate 21 à 25 m (21 – 25=1). Ainsi :

- 100 p.100 des parcelles de cette classe ont un taillis vieux ou épuisé [alors qu'elles ne sont que 7 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon (*cf.* Tableau 21)] ;
- 100 p.100 des parcelles de cette classe sont en taillis sous futaie [alors qu'elles ne sont que 37 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon] ;
- 100 p.100 des parcelles de cette classe ont des peuplements entre 21 et 25 m (alors qu'elles ne sont que 49 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon).

C'est donc une classe sans dégâts notoires caractérisée par un taillis sous futaie où le taillis est vieux ou épuisé et où la canopée est à plus de 21 m.

Tableau 21 - Variables caractéristiques de la Classe n°3 (FD d'Armainvilliers)

Modalités caractéristiques	% de la modalité dans la classe	% de la modalité dans la population
TviEp=1	100	7
TSF=1	100	37
21-25m=1	100	49

La classe n°4 représente 8 p.100 des parcelles et sous parcelles décrites. Les deux modalités actives de celle-ci sont par ordres décroissants de sur représentation par rapport au profil moyen de la population enquêtée : la futaie adulte (Fadul=1), les arbres de la strate 21 à 25 m (21-25m=1). Ainsi :

- 100 p.100 des parcelles de cette classe sont des futaies adultes [alors qu'elles ne sont que 18 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon (cf. Tableau 22)] ;
- 100 p.100 des parcelles de cette classe ont des peuplements entre 21 et 25 m (alors qu'elles ne sont que 49 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon).

C'est donc, là encore, une classe sans dégât notoire caractérisée par une futaie adulte où la canopée est à plus de 21 m.

Tableau 22 - Variables caractéristiques de la Classe n°4 (FD d'Armainvilliers)

Modalités caractéristiques	% de la modalité dans la classe	% de la modalité dans la population
Fadul=1	100	18
21-25m=1	100	49

La classe n°5 représente 15 p.100 des parcelles et sous parcelles décrites. Les dix modalités actives de celle-ci sont par ordres décroissants de sur représentation par rapport au profil moyen de la population enquêtée : les futaies âgées (Fagé=1), les taillis sous futaie (TSF=1), le taillis en âge d'être exploité qu'il soit balivable ou recéparable (TBaRe=1), les arbres de la strate 21 à 25 m (21-25m=1), l'absence de futaie (F=0), la présence de la catégorie d'essence autres feuillus (AutrF=1), la faible présence de faibles dégâts (ch10=0), l'absence de la strate des 16 à 20 m (16-20m=0), la présence des forts dégâts compris entre 40 et 70 p.100 d'arbres touchés à la parcelle (ch70=1) et, enfin, l'absence de la futaie au stade du perchis (perchi=0). Ainsi :

- 94 p.100 des parcelles de cette classe sont en futaie âgée [alors qu'elles ne sont que 29 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon (cf. Tableau 23)] ;
- 100 p.100 des parcelles de cette classe sont en taillis sous futaie (alors qu'elles ne sont que 37 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- 88 p.100 des parcelles de cette classe ont un taillis balivable ou recéparable (alors qu'elles ne sont que 31 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- 100 p.100 des parcelles de cette classe ont des peuplements entre 21 et 25 m (alors qu'elles ne sont que 49 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune des parcelles n'a de futaie pure (alors qu'elles ne sont que 58 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- 94 p.100 des parcelles de cette classe ont des essences regroupées dans la catégorie autres feuillus (alors qu'elles ne sont que 56 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- 82 p.100 des parcelles de cette classe n'ont pas subi de faibles dégâts (alors qu'elles ne sont que 46 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune des parcelles n'a des peuplements entre 16 et 20 m (alors qu'elles ne sont que 73 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;

- 35 p.100 des parcelles ont subi des forts dégâts compris entre 40 et 70 p.100 d'arbres touchés à la parcelle (alors qu'elles ne sont que 12 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune des parcelles n'a de perchis (alors qu'elles ne sont que 76 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon).

C'est donc une classe avec des dégâts forts qui touchent une futaie âgée traitée en taillis sous futaie ainsi que son taillis qui est balivable ou recépable. Les peuplements y sont élevés de plus de 21 m et composés d'un mélange de feuillus.

Tableau 23 - Variables caractéristiques de la Classe n°5 (FD d'Armainvilliers)

Modalités caractéristiques	% de la modalité dans la classe	% de la modalité dans la population
Fagé=1	94	29
TSF=1	100	37
TBaRe=1	88	31
21-25m=1	100	49
F=0	100	58
AutrF=1	94	56
ch10=0	82	46
16-20m=0	100	73
ch70=1	35	12
perchi=0	100	76

La classe n°6 représente 12 p.100 des parcelles et sous parcelles décrites. Les huit modalités actives de celle-ci sont par ordres décroissants de sur représentation par rapport au profil moyen de la population enquêtée : le taillis jeune, moins d'une rotation, (Tjeu=1), les futaies âgées (Fagé=1), les taillis sous futaie (TSF=1), les arbres de la strate 21 à 25 m (21-25m=1), l'absence de futaie (F=0), la présence de la catégorie d'essence autres feuillus (AutrF=1), l'absence de taillis en âge d'être exploité qu'il soit balivable ou recépable (TBaRe=0) et la présence du chêne (CHE=1). Ainsi :

- 100 p.100 des parcelles de cette classe ont un taillis jeune [alors qu'elles ne sont que 19 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon] (*cf.* Tableau 24) ;
- 100 p.100 des parcelles de cette classe sont en futaie âgée (alors qu'elles ne sont que 29 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- 100 p.100 des parcelles de cette classe sont en taillis sous futaie (alors qu'elles ne sont que 37 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- 100 p.100 des parcelles de cette classe ont des peuplements entre 21 et 25 m (alors qu'elles ne sont que 49 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune des parcelles n'a de futaie pure (alors qu'elles ne sont que 58 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- 92 p.100 des parcelles de cette classe ont des essences regroupées dans la catégorie autres feuillus (alors qu'elles ne sont que 56 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune des parcelles de cette classe n'a de taillis balivable ou recépable (alors qu'elles ne sont que 31 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- 100 p.100 des parcelles de cette classe possèdent du chêne (alors qu'elles ne sont que 71 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon).

C'est donc, là encore, une classe sans dégât notoire caractérisée par un taillis sous futaie où le taillis est jeune et la futaie âgée. La canopée y est à plus de 21 m et composée de chênes d'un mélange de feuillus.

Tableau 24 - Variables caractéristiques de la Classe n°6 (FD d'Armainvilliers)

Modalités caractéristiques	% de la modalité dans la classe	% de la modalité dans la population
Tjeu=1	100	19
Fagé=1	100	29
TSF=1	100	37
21-25m=1	100	49
F=0	100	58
AutrF=1	92	56
TBaRe=0	100	69
CHE=1	100	71

La classe n°7 représente 4,4 p.100 des parcelles et sous parcelles décrites. Les deux modalités actives de celle-ci sont par ordres décroissants de sur représentation par rapport au profil moyen de la population enquêtée : les arbres de la strate basse de 0 à 10 m (0 – 10=1) et les jeunes plantations (planj=1). Ainsi :

- 100 p.100 des parcelles de cette classe ont moins de 10 m [alors qu'elles ne sont que 4 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon (cf. Tableau 25)] ;
- 100 p.100 des parcelles de cette classe sont en jeunes plantations [alors qu'elles ne sont que 4 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon).

C'est donc une classe sans dégâts, de faible hauteur car constituée de plantations récentes.

Tableau 25 - Variables caractéristiques de la Classe n°7 (FD d'Armainvilliers)

Modalités caractéristiques	% de la modalité dans la classe	% de la modalité dans la population
0-10m=1	100	4
planj=1	100	4

La classe n°8 représente 25 p.100 des parcelles et sous parcelles décrites. Les huit modalités actives de celle-ci sont par ordres décroissants de sur représentation par rapport au profil moyen de la population enquêtée : les résineux en essence principale (RES1=1), les futaies adultes (Fadul=1), les rugosités, irrégularités intra parcellaire de hauteur de peuplement, (rugos=1), l'absence du chêne (CHE=0), la futaie (F=1) et l'absence de la catégorie d'essences autres feuillus (AutrF=0). Ainsi :

- 100 p.100 des parcelles de cette classe sont enrésinées [alors qu'elles ne sont que 6 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon (cf. Tableau 26)] ;
- 100 p.100 des parcelles de cette classe sont en futaie adulte (alors qu'elles ne sont que 18 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- 100 p.100 des parcelles de cette classe présente une rugosité intra parcellaire de plus de cinq mètres (alors qu'elles ne sont que 20 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune des parcelles de cette classe ne possède de chêne (alors qu'elles ne sont que 29 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon)
- 100 p.100 des parcelles de cette classe sont en futaie pure (alors qu'elles ne sont que 42 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune des parcelles de cette classe n'a d'essences regroupées dans la catégorie autres feuillus (alors qu'elles ne sont que 44 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon).

C'est donc, là encore, une classe sans dégât notoire caractérisée par une futaie pure de résineux adultes où l'hétérogénéité des hauteurs est marquée.

Tableau 26 - Variables caractéristiques de la Classe n°8 (FD d'Armainvilliers)

Modalités caractéristiques	% de la modalité dans la classe	% de la modalité dans la population
RES1=1	100	6
Fadul=1	100	18
rugos=1	100	20
CHE=0	100	29
F=1	100	42
AutrF=0	100	44

La classe n°9 représente 4,4 p.100 des parcelles et sous parcelles décrites. Les deux modalités actives de celle-ci sont par ordres décroissants de sur représentation par rapport au profil moyen de la population enquêtée : les futaies jeunes (Fjeun=1), les résineux en essence secondaire (RES2=1). Ainsi :

- 100 p.100 des parcelles de cette classe sont moins de jeunes futaies [alors qu'elles ne sont que 4 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon (*cf.* Tableau 27)] ;
- 60 p.100 des parcelles de cette classe sont caractérisées par du résineux en essence d'accompagnement [alors qu'elles ne sont que 11 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon].

C'est donc une classe sans dégâts significatifs, constituée d'une futaie jeune ou l'essence d'accompagnement est résineuse.

Tableau 27 - Variables caractéristiques de la Classe n°9 (FD d'Armainvilliers)

Modalités caractéristiques	% de la modalité dans la classe	% de la modalité dans la population
Fjeun=1	100	4
RES2=1	60	11

La classe n°10 représente 25 p.100 des parcelles et sous parcelles décrites. Les seize modalités actives de celle-ci sont par ordres décroissants de sur représentation par rapport au profil moyen de la population enquêtée : le perchis (perchi), la strate des arbres de 16 à 20 m, la futaie (F=1), l'absence de la catégorie d'essences autres feuillus (AutrF=0), les coupes de faible intensité (éclaircie, amélioration, ..., Cfai=1), l'absence d'une strate de plus de 21 m (21-25m=0), du taillis sous futaie (TSF=0), du taillis balivable ou recépage (TbaRe=0), les faibles dégâts (ch10=1), l'absence des futaies âgées (Fagé=0), les chênes (CHE=1), l'absence du taillis (TS=0), d'une strate de plus de 11 à 15 m (11-15m=0), l'absence de rugosités, irrégularités intra parcellaire de hauteur de peuplement, (rugos=0), du taillis jeune (Tjeun=0) et, enfin, l'absence de dégâts moyens (ch40=0). Ainsi :

- 96 p.100 des parcelles de cette classe sont au stade du perchis [alors qu'elles ne sont que 24 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon (*cf.* Tableau 28)] ;
- 96 p.100 des parcelles de cette classe ont une strate comprise entre 16 et 20 m (alors qu'elles ne sont que 27 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- 100 p.100 des parcelles de cette classe sont en futaie pure (alors qu'elles ne sont que 42 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune des parcelles de cette classe n'a d'essences regroupées dans la catégorie autres feuillus (alors qu'elles ne sont que 44 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon)
- 82 p.100 des parcelles de cette classe ont connu une coupe de faible intensité (alors qu'elles ne sont que 35 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;

- 96 p.100 des parcelles de cette classe n'a pas d'arbres dans la strate des 21 m et plus (alors qu'elles ne sont que 51 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune des parcelles de cette classe n'a de peuplement en TSF (alors qu'elles ne sont que 63 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune des parcelles de cette classe n'a du taillis balivable ou recépage (alors qu'elles ne sont que 69 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- 89 p.100 des parcelles de cette classe ont connu des dégâts faibles ou nuls (alors qu'elles ne sont que 54 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- 100 p.100 des parcelles de cette classe sont en futaie âgée (alors qu'elles ne sont que 71 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- 100 p.100 des parcelles de cette classe possèdent du chêne (alors qu'elles ne sont que 71 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune parcelle de cette classe n'a de peuplement en taillis (alors qu'elles ne sont que 80 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune parcelle de cette classe n'a d'arbres dans une strate des 11 – 15 m (alors qu'elles ne sont que 80 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune parcelle de cette classe présente une rugosité intra parcellaire de plus de cinq mètres (alors qu'elles ne sont que 80 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- aucune parcelle de cette classe n'est en taillis jeune (alors qu'elles ne sont que 81 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon) ;
- 93 p.100 des parcelles de cette classe n'ont pas subi de dégâts moyens (alors qu'elles ne sont que 75 p.100 sur l'ensemble de l'échantillon).

C'est donc, là encore, une classe sans dégât notoire caractérisée par une futaie pure de jeunes chênes au stade du perchis et ayant connu un passage en coupe peu marqué sur les cinq dernières années.

Tableau 28 - Variables caractéristiques de la Classe n°10 (FD d'Armainvilliers)

Modalités caractéristiques	% de la modalité dans la classe	% de la modalité dans la population
perchi=1	96	24
16-20m=1	96	27
F=1	100	42
AutrF=0	100	44
Cfai=1	82	35
21-25m=0	96	51
TSF=0	100	63
TBaRe=0	100	69
ch10=1	89	54
Fagé=0	100	71
CHE=1	100	71
TS=0	100	80
11-15m=0	100	80
rugos=0	100	80
Tjeu=0	100	81
ch40=0	93	75

Ici, encore, il ressort de cette typologie qu'il y a peu de classes qui soient touchées. Cependant, celles-ci regroupent 20 p.100 des parcelles et sous parcelles. Bien qu'il n'y ait que deux

classes sur dix qui aient des variables de dégâts, désignées comme significatives par les valeurs tests, elles apportent un éclairage intéressant. L'enrésinement, toujours faible, n'est jamais désigné avec les variables de dégâts dans les typologies. En revanche, les échantillons font ressortir une sur représentation des dégâts sur le taillis, même bas (11 à 15).

Que ce soit pour l'ensemble de la forêt ou sur des groupes issus d'une typologie, ce sont les taillis qui sont touchés le plus significativement à Armainvilliers. Ces taillis sont soit simples soit traités en taillis sous futaie, mais âgés de plus d'une rotation (stades balivables ou recépages, voire vieux ou épuisés). Ce sont les feuillus autres que le chêne qui sont les plus atteints surtout lorsqu'ils sont en peuplement bas (- de 15 m).

2.2. Forêt communale d'Ozouer le Voulgis

La diversité géomorphologique de la FC d'Ozouer-le-Voulgis sous-tend le rôle des relations établies entre force, direction du vent et topographie. La problématique des destructions est ainsi plus attentive aux formes de relief, aux formations superficielles et aux sols.

Ont été considérées comme parcelles présentant un intérêt pour la compréhension des dégâts celles dont plus de la moitié de la surface possède plus de 50 % d'arbres à terre ou celles dont un tiers de la surface est pratiquement à blanc.

- Dans le massif nord (bois Communal), les parcelles au vent se situent sur le plateau et les versants exposés à l'ouest. La zone de dégâts est limitée par la rupture de pente du haut de versant, autour de la courbe 95 m, et la courbe 85 m. Les chablis sont assez bien circonscrits sur cette plage altitudinale de 10 mètres. Au-dessus et au-dessous de ces isohypses les peuplements ont été épargnés, ce qui conduit à penser que le vent s'est concentré sur le haut de pente et le rebord du plateau. Le fait que ces parcelles aient connu un passage en coupe dans les 4 à 5 ans précédant la tempête est un facteur favorable à la pénétration du vent. La limite orientale de la zone des dégâts est plus floue, dans le prolongement d'effet dominos. Elle dessine une couronne (18 parcelles sur les 27 du massif nord) calée sur la topographie de couloir due à la vallée.

- Le massif sud (bois de Vitry) présente une bande de dégâts entre les courbes de niveau 70 m et 90 m. C'est le cas des parcelles 29 et 30 (12,36 ha) où peu d'arbres ont résisté avec des chablis tombés selon une direction parallèle à la vallée de l'Yerres. L'effet de couloir à vent est aussi très marqué mais la surface concernée est nettement plus étroite qu'au nord (P29 et 30 en face du village).

Tableau 29 - facteurs explicatifs des dégâts (forêts d'Armainvilliers et d'Ozouer-le-Voulgis)

Facteurs	FD d'Armainvilliers	FC d'Ozouer
Feuillus instables	++	+
Résineux	++	Abs
Structure du parcellaire	+	-
Structure du peuplement	-	++
Gestion	+	--
Couloir de vent	-	++

Les parcelles 35 et 36 (71 à 100 % de dégâts) montrent l'influence, comme en forêt d'Armainvilliers, des peuplements de taillis simples d'essences secondaires, tilleuls, trembles et bouleaux : enracinements limités sur des terrains difficiles dont le traitement puis le vieillissement ont engendré des cépées aux houppiers disproportionnés.

Le poids relatif des facteurs explicatifs des dégâts pour les deux forêts d'Armainvilliers et – d'Ozouer-le-Voulgis peut s'exprimer comme suit (cf. Tableau 29) :

Les deux massifs ont au total peu de points communs quant à l'origine des chablis.

- En forêt communale d'Ozouer l'exposition au vent, les données topographiques et la structure des peuplements sont les causes premières des chablis ;
- En forêt domaniale d'Armainvilliers, c'est la présence d'essences instables en taillis simples et en futaies résineuses et des actions déstabilisatrices de la gestion.

2.3. Forêt domaniale de Fontainebleau : secteur de Bourron-Marlotte

Le secteur d'étude de Bourron-Marlotte en forêt domaniale de Fontainebleau comporte deux réserves biologiques intégrales (RBI) incluses dans un périmètre où la gestion forestière de l'ONF s'effectue normalement (cf. Figure 23). Il était, là encore, intéressant d'étudier ces deux entités dans une enquête unique pour dégager ce qui les différencie vis-à-vis d'un épisode tempétueux. Bien qu'homogènes par de nombreux aspects (cf. I.A.2.2.), le fait d'être « gérée » en réserve ou non laisse penser qu'il existe des différences importantes de physionomie. Il apparaît donc utile, avant tous résultats, de décrire, au travers des variables enquêtées, quels sont les paramètres communs aux deux « forêts » et quels sont ceux pour lesquels elles divergent. Seule, cette analyse préalable permet d'affirmer une certaine unité statistique propice à l'analyse et aux comparaisons de ces deux entités.

2.3.1. Unicité des deux entités

Les dégâts sont-ils importants et de plus, sont-ils différents d'une entité à l'autre ? Avec une moyenne de 9,9 p. 100 ($\pm 13,1$ p.100, au risque $\alpha=0.05$) de dégâts [nombre d'arbres abattus (chablis et volis) enquêtés sur le total des arbres échantillonnés par placette], les dégâts sont globalement moins importants qu'à Conches-Breteuil. Cependant, ces dégâts ne sont pas uniformément répartis. Les réserves biologiques intégrales (RBI) ont été beaucoup plus touchés que le reste du secteur géré par l'ONF. Si les deux RBI enregistrent 18,2 p.100 d'arbres enquêtés et touchés ($\pm 4,2$ p.100, au risque $\alpha=0.05$), pour le reste du secteur, ce ne sont que 7,7 p.100 ($\pm 12,4$ p.100, au risque $\alpha=0.05$) qui le sont [différence significative au seuil de 5 p.100 [test H de Kruskal et Wallis (Collectif, 2000, p.130)]. Cette différence étant importante, il convient de rechercher parmi les variables enquêtées, s'il existe d'autres paramètres différenciant ces deux entités et remettant, peut-être, en cause leur analyse commune. Bien que le nombre de placettes soit peu élevé, 35 au total (23 pour les RBI et 12 pour le reste du secteur géré par l'ONF), les intervalles de confiance associés aux dégâts moyens sont encore relativement serrés. Ils sont toutefois à peine supérieurs à ceux obtenus sur Conches-Breteuil (cf. 1.1.1. de la partie III).

Ces deux secteurs ne sont pas différents en terme de structure forestière, comme la densité des tiges ou de répartition en futaies, taillis simples et taillis sous futaie, par exemple, ni en terme de trouées ou de pente, pas plus qu'en terme de structure horizontale des strates arborescentes hautes (plus de 15 m) ou basses (7 à 15 m). En utilisant le test du khi deux (SCHWARTZ, 1991, p.75 et suivantes), avec 35 placettes enquêtées, les différences ne sont jamais significatives au seuil de 5 p. 100, seuil communément retenu pour le rejet de l'hypothèse nulle. Il est donc possible, au regard des informations collectées, d'étudier ces deux secteurs ensemble pour répondre à la question : « qui des réserves ou des parties de forêt soumises à la gestion a subi les dégâts les plus importants et pour quelles variables ? ».

2.3.2. Caractéristiques générales des dégâts

Plusieurs grands groupes de variables ont été étudiés sur cette partie du massif de Fontainebleau. Il s'agissait d'évaluer l'impact des dégâts en fonction du diamètre des peuplements, de leur nature et des essences présentes par placette d'inventaire. C'est cette première échelle d'analyse qui est présentée ici.

Avant de détailler les résultats significatifs de l'enquête, il faut présenter la description globale des paramètres collectés lors de l'enquête sur l'ensemble des placettes pour une meilleure mise en perspective. Comme on peut le voir sur le tableau n°29, sur 80 p.100 des placettes enquêtées (D9-D1), les moins extrêmes, il y a une soixantaine d'arbres d'écart. Moins de 10 p.100 des placettes comportent moins de 35 tiges ou plus de 106. Cinquante pour cent des placettes ont moins de huit arbres chablis ou pas d'arbres volis. Les dégâts sont peu importants et surtout très concentrés comme on va le voir plus loin, car seulement 10 p.100 des placettes enquêtées portent plus de 24,6 arbres chablis (D9, avec max. = 51) et surtout 2 arbres volis (max. = 6).

Tableau 30 – Détail des fractiles (nb d'arbres)

Nb. d'arbre	Enquêtés	Chablis	Volis	Cha. Feuill.	Cha. Résin.
min	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0
D1	34,6	0,4	0,0	0,0	0,0
Q1	62,5	2,0	0,0	1,0	0,0
Q2	80,0	8,0	0,0	6,0	0,0
Q3	92,5	11,0	1,0	10,5	0,0
D9	105,6	24,6	2,0	24,6	1,0
Max	123,0	51,0	6,0	51,0	10,0

D1 est le premier décile, Q1 le premier quartile, Q2 la médiane, Q3 le troisième quartile et D9 le neuvième décile. Min et Max, le minimum et le maximum.

Les chablis de feuillus sont largement majoritaires dans ce secteur de la forêt de Fontainebleau. Seules, 10 p.100 des placettes (D9) ont plus d'un chablis de résineux ! Le total des résineux enquêtés n'est que de 74 tiges debout et 17 tombés pour un total de 2 550 arbres enquêtés (également pour des tiges de plus de 7 m) en 35 parcelles.

Tableau 31 – Détails des fractiles (suite, diamètres et surfaces terrières)

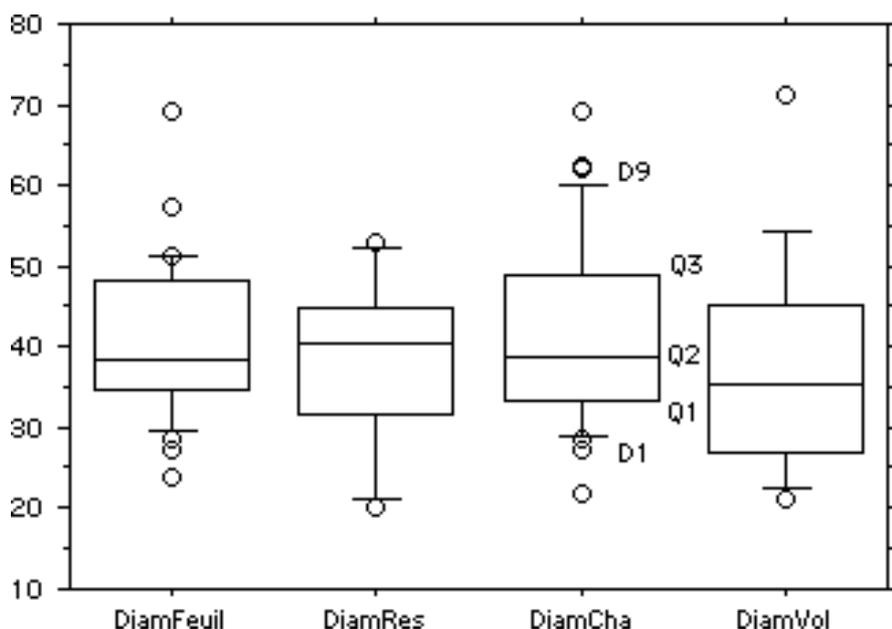
	Diam. Moy	Surf. terrière
min	0,0	0,0
D1	21,7	0,2
Q1	32,9	0,7
Q2	37,7	2,9
Q3	47,5	4,6
D9	51,1	7,8
Max	69,3	22,7

Diam. Moy. est le diamètre moyen, mesuré en cm à 1,30 m, des arbres tombés La Surf. terrière, également mesurée à 1,30 m, est la superficie de la section orthogonale des arbres tombés. Elle est en m² par ha. D1 est le premier décile, Q1 le premier quartile, Q2 la médiane, Q3 le troisième quartile et D9 le neuvième décile. Min et Max, le minimum et le maximum.

Si l'on reprend le découpage en petit bois (PB, tiges comprises entre 17,5 et 27,5 cm de diamètre), moyens bois (MB, tiges comprises entre 27,5 et 37,5 cm de diamètre), gros bois (GB, tiges comprises entre 37,5 et 47,5 cm de diamètre) et très gros bois (TGB, tiges supérieures à 47,5 cm de diamètre) tel qu'il a été utilisé pour Conches-Breteil (*cf.* 1.1.2. de la partie III), 50 p.100 des tiges cassées (diamètre moyen à la placette) sont des moyens bois (inférieures à Q2) et 25 p.100 sont des très gros bois (supérieures à Q3). En ce qui concerne la surface terrière, mesure qui

combine le diamètre et le nombre d'arbres touchés, là non plus les dégâts ne sont pas très importants et concentrés sur les dernières placettes. En effet, il faut attendre le dernier décile (D9) et donc les quatre dernières placettes (environ 10 p.100), pour constater un accroissement sensible de la surface terrière. Elle passe de 7,8 à 22,7 m² à l'ha.

Figure 23 – Intensité des dégâts en fonction des diamètres et du type de casse (diamètre moyen par parcelle)



C_CHA sont les diamètres moyens des chablis de charmes, C_CHE des chablis de chênes, C_HET des chablis de hêtres, C_PSY des chablis de pins sylvestres et V_HET des volis de hêtres. D1 est le premier décile, Q1 le premier quartile, Q2 la médiane, Q3 le troisième quartile et D9 le neuvième décile. Les cercles représentent des valeurs en deçà ou au delà des déciles.

Ce sont les essences les plus touchées par la tempête, et logiquement celles qui étaient les plus représentées, qui sont décrites sur la figure n°24. Celle-ci donne un aperçu de la prépondérance des dégâts sur le chêne C_CHE et le hêtre C_HET. Ses boîtes de dispersion indiquent le diamètre moyen maximal des arbres touchés par placette (ici le cercle le plus élevé indique 92 pour le chêne). Puis quelques cercles indiquent les 10 p.100 des placettes ayant les valeurs les plus élevés. D9 indique la valeur du neuvième décile (90 p.100 des valeurs lui sont inférieures). Q3 est le troisième quartile (75 p.100 des valeurs lui sont inférieures). Q2 est le deuxième quartile (50 p.100 des valeurs lui sont inférieures, c'est la médiane). Q1 est le premier quartile (25 p.100 des valeurs lui sont inférieures). D1 est le premier décile (10 p.100 des valeurs lui sont inférieures et donc 90 p.100 des valeurs lui sont supérieures). On voit clairement que les chablis de charme C_CHA sont à 50 p.100 inférieurs à 20 cm de diamètre et à 75 p.100 inférieurs à 27,5 cm de diamètre. Cette différence entre les essences n'est pas due au hasard. Elle est hautement significative pour un test comme le H de Kruskal et Wallis (Collectif, 2000, p.130). Sa valeur est de 22,7, soit un risque inférieur à 1/1 000 (table du khi2 avec 4 ddl). Ce sont donc des petits bois de charme qui sont tombés alors que ce sont au moins des moyens bois pour les autres essences. Le diamètre médian (Q2) est de 50 cm pour les chablis de chênes, 35,3 pour les hêtres, 42,5 pour les pins sylvestres et 36 pour les volis de hêtres (rappel : les gros bois ont des tiges comprises entre 37,5 et 47,5 cm de diamètre). En revanche, il n'est pas possible de savoir, en raison de la faiblesse de l'échantillon, si le chablis de charme est représentatif des reliques de taillis sous futaie présentes sur le secteur ou s'il est disséminé comme simple essence d'accompagnement sans traitement particulier.

Figure 24 - Intensité des dégâts en fonction des essences et du type de casse (diamètre moyen par parcelle)

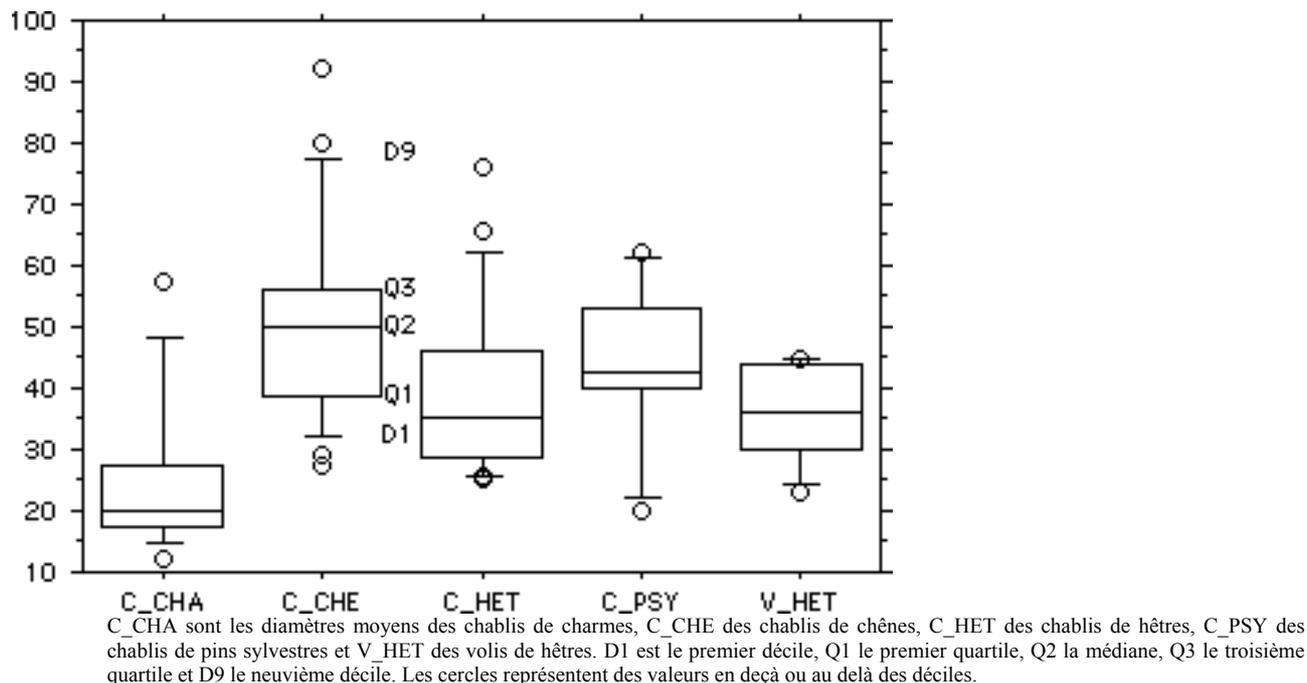
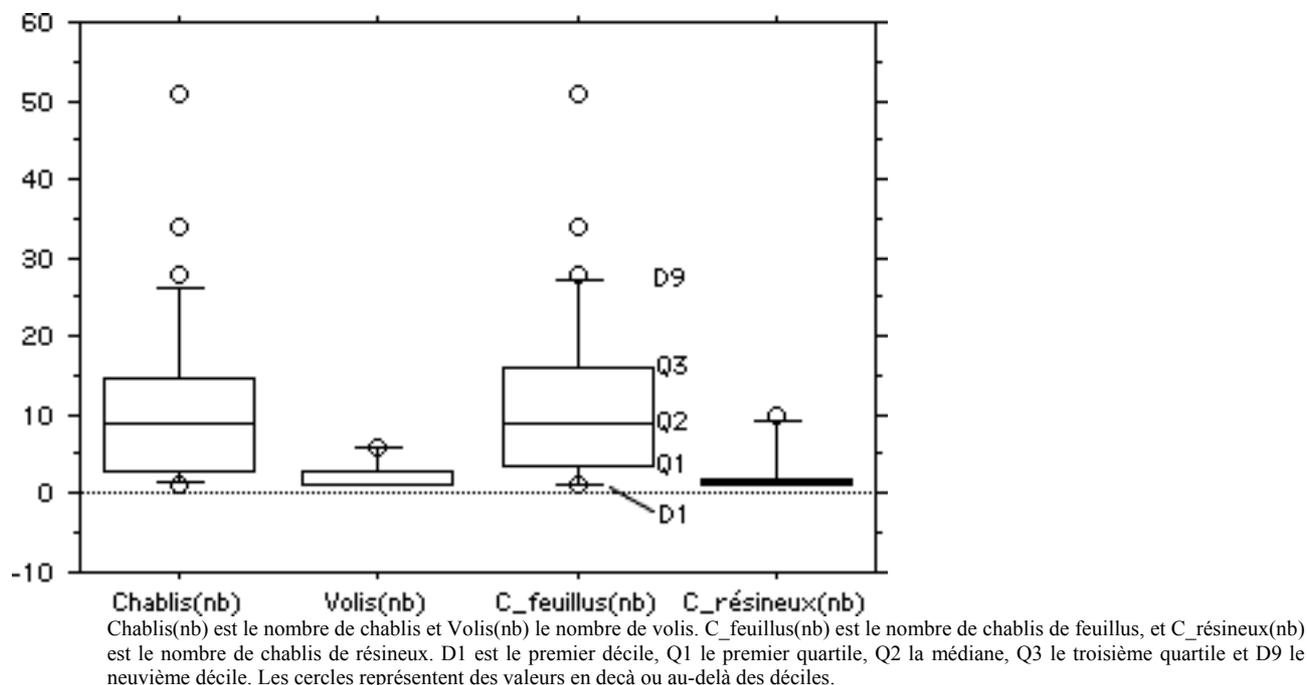


Figure 25 - Intensité des dégâts en fonction du type de casse et de la nature du peuplement (nb. par parcelle)



En raison des fortes précipitations qui ont précédé le mois de décembre 1999 et sans doute aussi d'un enracinement relativement superficiel sur le secteur d'étude (*cf.* I.A.2.2.), l'essentiel des dégâts s'est produit sous forme de chablis et non de volis (*cf.*

Figure 25). Cette différence entre les types de dégâts n'est pas, là non plus, due au hasard. Elle est hautement significative. La valeur du H de Kruskal et Wallis est de 13,6, soit un risque inférieur à 1/1 000 (table du khi2 avec 1 ddl). En revanche, elle ne l'est pas en terme de diamètre. Il n'y a pas de différences significatives entre les chablis et les volis par rapport à la variable diamètre moyen à 1,30 m. La valeur du H de Kruskal et Wallis est de 0,38, soit un risque supérieur à 0,5 (table du khi2 avec 1 ddl). Il est vrai que le diamètre moyen des chablis est de 41,5 cm, alors que celui des résineux est de 36 cm (note : ce sont des moyennes de moyennes !)

La faiblesse des dégâts sur les résineux est due à leur faible présence sur la zone d'étude. Ils ne représentent que 3 p.100 des arbres enquêtés sur les placettes. La sur représentation des dégâts en nombre de chablis de feuillus est également significative sur les 35 placettes d'inventaire. La valeur du H de Kruskal et Wallis est de 5,5, soit un risque inférieur à 2 p.100 (table du khi2 avec 1 ddl). En revanche, elle ne l'est pas, là non plus, en terme de diamètre. Il n'y a pas de différences significatives entre les chablis de feuillus et de résineux par rapport à la variable diamètre moyen à 1,30 m. La valeur du H de Kruskal et Wallis est de 0,4, soit un risque supérieur à 0,5 (table du khi2 avec 1 ddl). Il est vrai que le diamètre moyen des chablis de feuillus est de 41,3 cm, alors que celui des résineux est de 43,3 cm (note : ce sont des moyennes de moyennes !)

Globalement, sur le secteur de Bourron-Marlotte, et en fonction de la taille de l'échantillon, ce sont majoritairement des chablis qui ont touché les peuplements de la zone d'étude. Si le nombre de chablis est significativement supérieur à celui des volis, en revanche, ce sont des arbres de diamètres comparables, et assez importants (catégorie des gros bois) qui sont tombés. Seuls les hêtres ont été significativement volis, et là encore, par le nombre et pas par les diamètres. Les essences résineuses sont très peu touchées car très peu présentes.

2.3.3. Typologie multivariée

Ici aussi, plutôt que de passer en revue toutes les combinaisons possibles de variables, nous avons fait le choix de constituer une typologie des variables pertinentes sur les groupes de placettes qui s'agrégeaient par « affinités » statistiques. Cela permettait de dégager les combinaisons intéressantes à « creuser ». La présentation de la typologie est l'objet de ce paragraphe. Les relations bivariées d'un suivant.

Les données d'origine sont plus diverses que pour Conches-Breteuil. Il peut s'agir de nombres d'arbres (couchés, debout, grands, petits, ...) enquêtés par placette, mais aussi de pourcentages, ratios, etc. et des données satellitales sous forme de comptes numériques. Des ACP (analyses en composantes principales) puis des CAH (classifications ascendantes hiérarchiques), comme indiqué au 2.1.3 du II, leur ont été appliquées. Sur les trois partitions demandées, SPAD V.5 en propose effectivement trois :

- une en quatre classes, de 13, 6, 9 et 7 placettes avec une inertie inter classes de 5,8 pour une inertie totale de 6,9 (quotient inertie inter / inertie totale = 0,83) ;
- une en six classes, de 14, 4, 1, 9, 4 et 3 placettes avec une inertie inter classes de 6,4 pour une inertie totale de 6,9 (quotient inertie inter / inertie totale = 0,93) ;
- et enfin une en sept classes, de 8, 6, 4, 1, 9, 4 et 3 placettes avec une inertie inter classes de 6,5 pour une inertie totale de 6,9 (quotient inertie inter / inertie totale = 0,94).

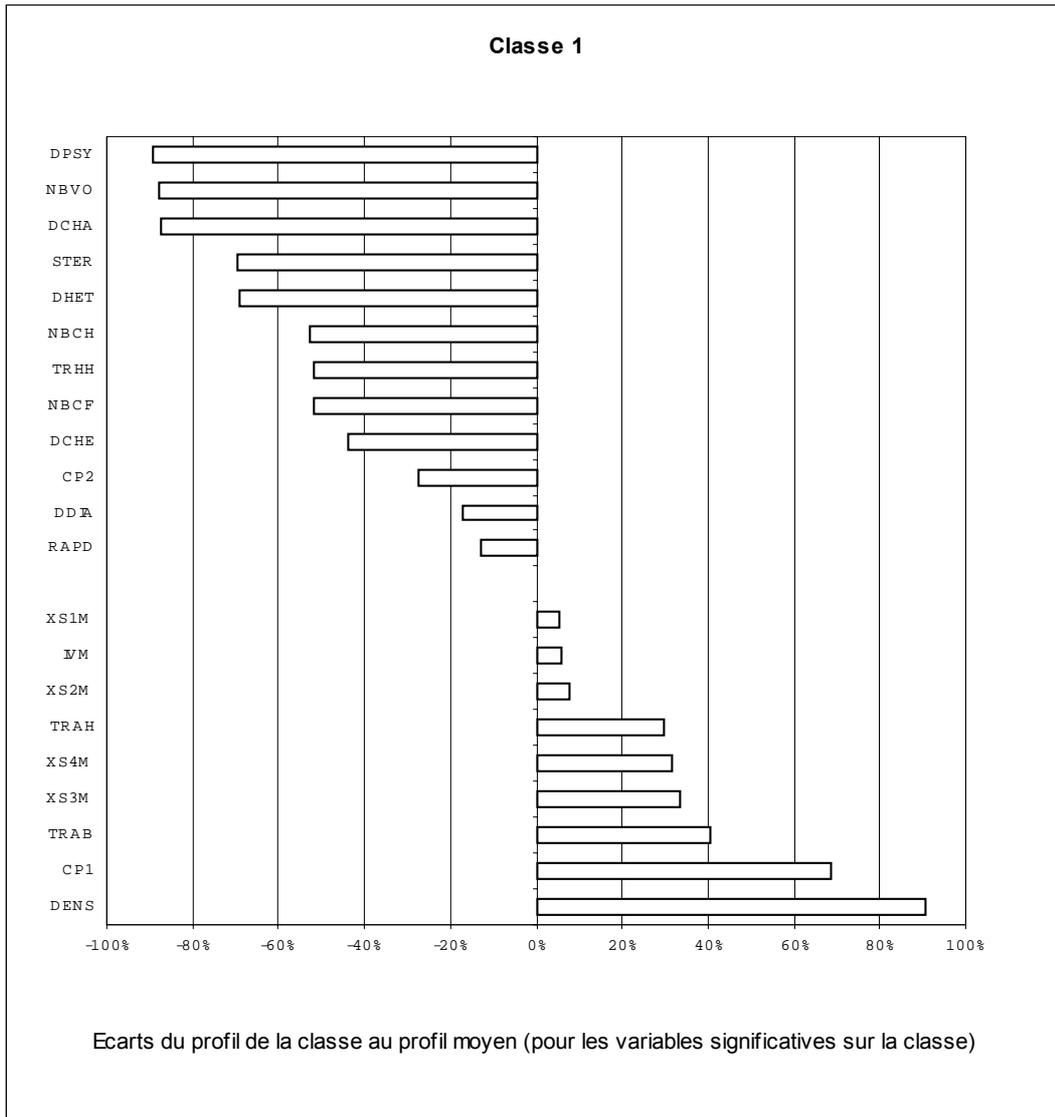
Tableau 32 – Distances des centres de classe au centre du nuage de points

n° des classes	Distances standardisées
1	17.05
2	3.76
3	1.08

4	6.76
---	------

C'est la première qui est retenue car elle ne comporte pas d'individus isolés constituant une classe à lui tout seul, car cela pose des problèmes lors des traitements de l'imagerie satellitale. Ses quatre classes ont des profils, et des effectifs, nettement différents. C'est la première qui est la plus singulière (cf. Tableau 32 des distances au centre du nuage et le Tableau 43 de l'Annexe n°5). De plus, elle concerne un plus grand nombre de placettes. En revanche, les trois dernières classes sont relativement plus « moyennes » avec des distances standardisées entre un et six.

Figure 26 - Variables caractéristiques de la Classe n°1 (FD de Fontainebleau, secteur de Bourron-Marlotte)



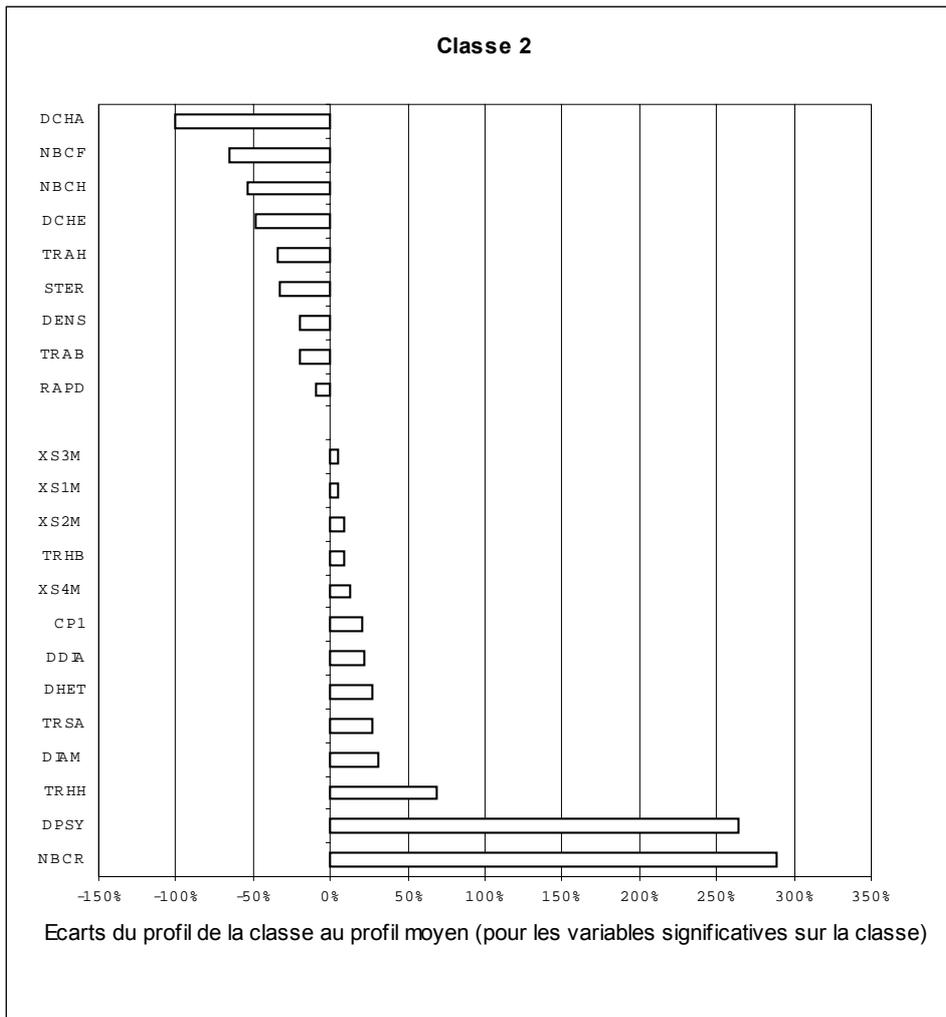
Ne sont décrites que les variables significatives (dont la valeur test est supérieure à 2). La valeur du profil de chaque variable correspond à la moyenne dans la classe moins la moyenne générale de cette variable le tout divisé par la moyenne général de cette variable (exprimé en p. 100).

Deux sortes de variables sont représentées sur les figures n°26 à 29. Il s'agit, d'une part de variables dendrométriques et sylvicoles, comme DPSY (dégâts sur le pin sylvestre) ou NBVO (nombre de vols), et d'autre part de variables ayant trait aux données satellitales, comme CP2 (valeur des données radiométriques pour la deuxième composante de l'ACP sur les moyennes extraite à la placette) ou XS1M {la moyenne des valeurs radiométriques (pour les placettes échantillons) sur la bande 1 [bande du vert (B1) de SPOT4]}, (cf. Tableau 45 et Tableau 46 de

l'Annexe n°5). En effet, pour établir la typologie des placettes, des analyses multivariées ont été réalisées en utilisant comme variable active la moyenne des données radiométriques de chaque parcelle pour chaque canal, à l'exception des composantes trois et quatre (CP3 et CP4) trop peu informatives. Les paramètres stationnels ont été utilisés comme variables illustratives. Une pondération à l'aide de la variable continue « Dégâts » (pourcentage des arbres touchés sur le total des arbres présents) a été ajoutée pour favoriser les paramètres stationnels dans les descriptions des typologies. Des ACP puis des classifications ascendantes hiérarchiques (CAH) ont été chaînées pour aboutir à des partitions comprises entre une et dix classes (*cf.* le paragraphe 2.3.2. du II).

En terme de variables (*cf.* Figure 26), la première classe connaît une sur représentation qui concerne essentiellement les taux de recouvrement des strates arborescentes hautes et basses (TRAH, plus de 15 m, et TRAB, entre 7 et 15 m) ainsi que la densité du couvert (DENS, le nombre d'arbres à l'ha). Elles sont surtout associées à aux variables radiométriques CP1 (première composante de l'ACP), XS3M (bande du proche infra rouge) et XS4M (bande du moyen infra rouge), toutes trois déjà très corrélées sur l'ensemble du fichier (*cf.* tableaux n°40 et 41 de l'annexe n°5). A l'inverse, sont sous représentés les dégâts. C'est donc une forêt peu touchée par la tempête, avec de forte densité et un couvert à fort recouvrement, qui est décrite ici. Pour ce qui est des individus (les placettes), cette classe concerne pour une part équivalente les points d'enquête situés dans le secteur géré par l'ONF (7 sur 13) et ceux dans les réserves biologiques intégrales, RBI, (6 sur 13).

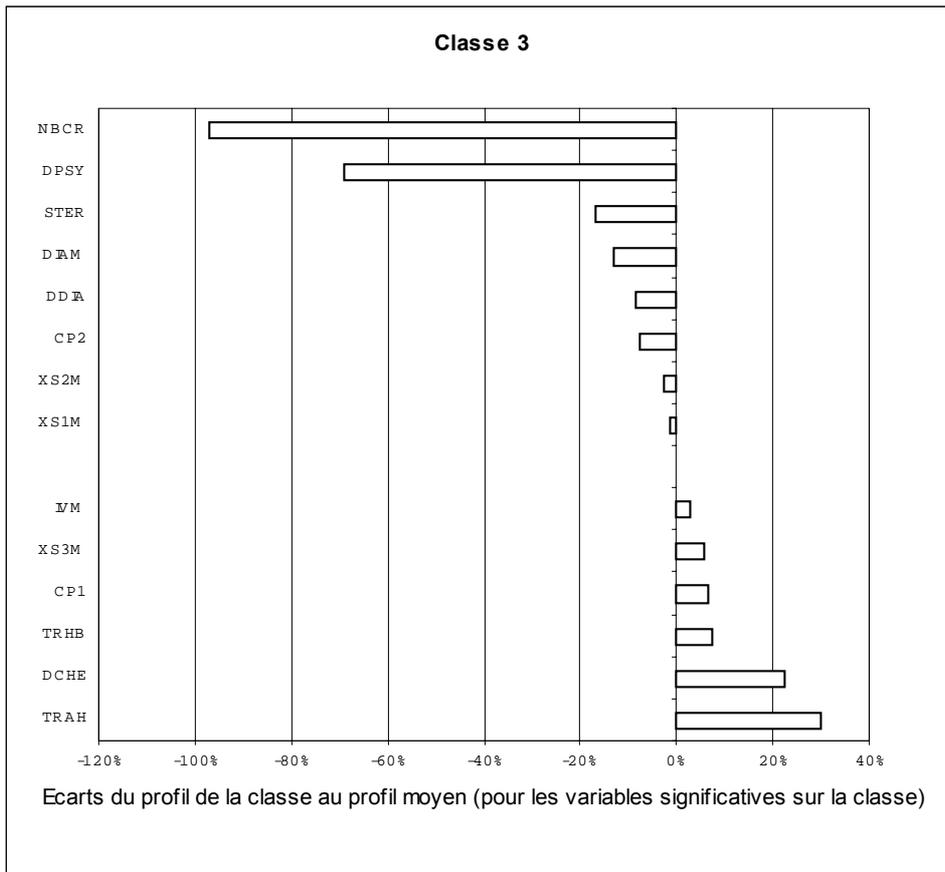
Figure 27 - Variables caractéristiques de la Classe n°2 (FD de Fontainebleau, secteur de Bourron-Marlotte)



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

La deuxième classe connaît une sur représentation nettement différente. Elle concerne essentiellement les chablis de résineux (NBCR) et en particulier sur les pins sylvestres (DPSY) dont la valeur du profil moyen sur la classe est trois à quatre fois supérieure à celle de la moyenne générale (respectivement 289 et 264 p. 100). La lumière pénétrant dans les trouées, les taux de recouvrement des strates inférieures sont élevés, que ce soit pour les herbacées (TRHH, taux de recouvrement de la strate herbacée haute, et TRHB, tx. de rec. herbacée basse) ou la strate arbustive (TRSA). Les dégâts sur le hêtre (DHET) sont également sur représentés dans cette deuxième classe, bien qu'un peu en retrait (27 p.100 seulement que le profil moyen général des dégâts sur le hêtre), tout comme la présence d'arbres de gros diamètre, encore debout (DIAM) ou, à terre (DDIA). Les variables radiométriques associées sont surtout CPI, XS4M et dans une moindre mesure XS2M, XS1M et XS3M. Ce n'est pas tant l'activité chlorophyllienne des strates basses qui est perçue mais probablement plus une certaine dessiccation. Les données satellitales sont du 23 septembre 2000. A l'inverse, sont sous représentés les dégâts sur les feuillus (NBCF) et l'importance en nombre des chablis (NBCH). C'est donc une forêt de résineux qui a été touchée par la tempête, mais dont l'importance numérique des dégâts est faible. Pour ce qui est des individus (les placettes), cette classe concerne pour une plus large part des points d'enquête situés dans les RBI (4 sur 6). Les individus de la classe n°2 (cf. la figure n°33 et le tableau n°38 de l'annexe n°5) appartiennent pour seulement un tiers (2 sur 6) au secteur géré par l'ONF.

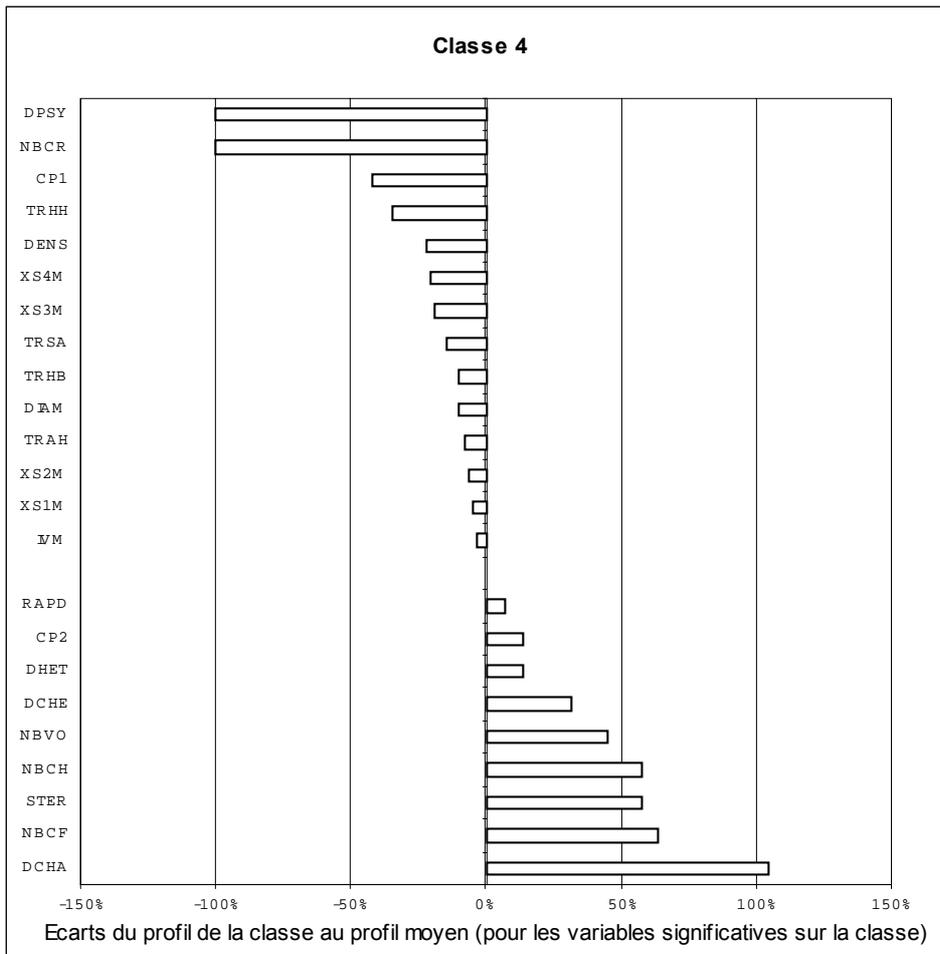
Figure 28 - Variables caractéristiques de la Classe n°3 (FD de Fontainebleau, secteur de Bourron-Marlotte)



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

Avec une distance standardisée faible [distance au barycentre de 1,08 (*cf.* tableau n°31 des distances au centre du nuage)], la troisième classe est relativement « moyenne ». De plus, elle est surtout typée par de fortes sous représentations. Les sur représentations qui la caractérisent sont assez faibles. Elles pointent les dégâts du chêne (DCHE) et indiquent que le couvert arborescent haut est encore très important (TRAH) tout comme le taux de recouvrement de la strate herbacée basse (TRHB). Dans la mesure où, les sous représentations concernent les dégâts sur les diamètres (DDIA) et la surface terrière des arbres tombés (STER), cette classe n'a pas connu de gros dégâts. Les dégâts sur les résineux sont également sous représentés. Les variables radiométriques caractéristiques marquent l'activité chlorophyllienne avec XS3M et IVM. Pour ce qui est des individus (les placettes), cette classe concerne pour une plus large part des points d'enquête situés dans les RBI (6 sur 9). Les individus de la classe n°3 (*cf.* la figure n°33 et le tableau n°38 de l'annexe n°5) appartiennent pour seulement un tiers (3 sur 9) au secteur géré par l'ONF.

Figure 29 - Variables caractéristiques de la Classe n°4 (FD de Fontainebleau, secteur de Bourron-Marlotte)



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

La quatrième classe connaît une sur représentation concentrée sur les dégâts à la forêt de feuillus. Elle concerne essentiellement les dégâts sur les charmes (DCHA), deux fois plus important que le profil moyen. Le nombre de chablis (NBCH) et de volis (NBVO) y est important. La sur représentation de la surface terrière des arbres tombés et du rapport entre les diamètres des arbres tombés (DDIA) et celui des arbres debout par placette (RAPD) indique également que ce sont de gros arbres qui sont tombés. Enfin, ces dégâts concernent également les chênes (DCHE) et les hêtres (DHET). L'unique variable radiométrique sur représentée est la deuxième composante de l'ACP (CP2). Elle est décorrélée d'avec toutes les autres de manière générale (cf. tab. n°40 de l'annexe n°5). C'est une variable caractéristique des forts dégâts. Les variables sous représentées sont liées aux taux de recouvrement des strates hautes ou basses (TRAH, TRSA, TRHH et TRHB), aux forts diamètres debout (DIAM), aux dégâts sur les résineux (DPSY et NBCR) et aux fortes densités (DENS). C'est donc une forêt de feuillus qui a été touchée par la tempête, qui est décrite ici. Les dégâts y sont importants. Cela ne concerne que des individus (les placettes) situés dans les RBI, à savoir sept placettes.

Un export de la typologie en quatre classes a été effectué vers le logiciel Idrisi. Les placettes de chacune des classes ont servi de zones d'entraînement pour initier les classifications. Le résultat est présenté sur la figure n°29.

2.3.4. Typologie bivariée

Un certain nombre d'associations de variables sont apparues lors de la constitution de la typologie présentée au paragraphe précédent. L'ensemble des relations, qui caractérisent les variables de l'étude, est regroupé, pour les variables quantitatives, dans la matrice des corrélations obtenue en sortie d'analyse en composante principale (ACP, cf. tableau n°40 de l'annexe n°5). L'analyse de cette matrice permet de dégager d'autres relations valables sur l'ensemble de la zone d'étude. Il faut pour cela retenir les corrélations significatives au seuil de 5 p.100 (seuil usuel) comme cela a été expliqué lors de la description des résultats pour le massif de Conches-Breteuil (cf. III.1.1.4.). On va donc, là aussi, retenir toutes les corrélations dont l'équivalent dans la matrice des valeurs-tests dépasse un certain seuil. En pratique, nous avons retenu les coefficients de corrélations supérieurs ou égaux à 60 p.100, soit une valeur-test de 6,6 ($\alpha < 1/1000$).

Deux groupes de corrélations ont été particulièrement analysés. Celui dont la relation entre variables dépasse en intensité 80 p.100 et celui où elle est comprise entre 60 et 80 p.100. Cependant, parmi celles-ci, un certain nombre sont triviales. Que le nombre de chablis (NBCH) soient très fortement corrélés (99 p.100) avec les chablis de feuillus (NBCF) confirme, s'il en était besoin, la prédominance du feuillus sur ce secteur. De même, que la surface terrière (STER, la somme de la surface, mesurée à 1,30 m, des sections des arbres chablis par placette en m² par ha) soit positivement corrélée avec le nombre de chablis (NBCH) n'est pas en soit très surprenant. En revanche, il est peut-être plus intéressant de se faire confirmer que le pourcentage des dégâts (DEGA) est significativement corrélé avec celui sur les hêtres (DHET). Le coefficient de corrélation lu dans la matrice est de 0,81 (cf. tableau n°40 de l'annexe n°5). Cependant, ces deux variables n'ayant pas une distribution que l'on peut assimiler à une distribution normale, il faut se référer au coefficient de corrélation sur les rangs « rho » de Spearman (SCHWARTZ, 1991, p.256). Celui-ci vaut 0,99 (pour n = 33, nombre de parcelles portant effectivement du hêtre), la relation entre le pourcentage globale de dégâts et ceux qui touchent le hêtre (DHET) est hautement significative avec un risque $\alpha < 0,01$. Les hêtres ont été systématiquement touchés lorsqu'ils étaient présents. Seules, deux placettes portant du hêtre sont indemnes de dégâts sur les 35 enquêtés. Malgré un pourcentage moyen de dégâts sur le hêtre nettement plus fort sur les RBI que sur le secteur géré par l'ONF, la différence n'est pas significative au seuil usuel de 0,05 ($\alpha > 0,09$ pour un U de Mann et Whiney valant 1,68).

Le nombre de chablis de feuillus (NBCF) est fortement corrélé au pourcentage de dégâts sur le charme (DCHA). Le coefficient de corrélation lu dans la matrice est de 0,76 (cf. tableau n°40 de l'annexe n°5). Cependant, là encore, il faut se référer au « rho » de Spearman. Celui-ci vaut 0,99 (pour n = 30, nombre de parcelles portant effectivement du charme). La relation entre le nombre de chablis de feuillus et le pourcentage de dégâts sur le charme est donc hautement significative avec un risque $\alpha < 0,01$. Là encore, quand on a constaté des dégâts et que les charmes étaient présents, ils ont été systématiquement touchés. Tout comme pour le hêtre, les dégâts sur le charme ne permettent pas de différencier les réserves biologiques intégrales du reste du secteur d'étude ($\alpha > 0,5$ pour un H de Krsukall et Wallis valant 0,005). En revanche, le nombre de chablis de feuillus (NBCF) permet de différencier les réserves du reste de la zone d'étude. Le pourcentage des chablis de feuillus a été de 5,5 p.100 ($\pm 10,6$ p.100, au risque $\alpha=0.05$) pour le secteur géré par l'ONF et de 16,6 p.100 ($\pm 4,1$ p.100, au risque $\alpha=0.05$) pour les réserves. Cette différence est significative ($\alpha < 0,02$ pour un U de Mann et Whiney valant 2,4).

Le nombre de chablis de feuillus (NBCF) est également corrélé au pourcentage de dégâts sur le chêne (DCHE). Le coefficient de corrélation lu dans la matrice, est un peu plus faible que précédemment, il n'est que de 0,62 (cf. tableau n°40 de l'annexe n°5). Cependant, ici encore, il faut se référer au « rho » de Spearman. Celui-ci vaut 0,82 (pour n = 34, nombre de parcelles portant effectivement du chêne). La relation entre le nombre de chablis de feuillus et le pourcentage de dégâts sur le chêne est donc hautement significative avec un risque $\alpha < 0,01$. Là encore, quand on a constaté des dégâts et que les chênes étaient présents, ils ont été systématiquement touchés. Contrairement au hêtre, les dégâts sur le chêne permettent de différencier les réserves biologiques

intégrales du reste du secteur d'étude. Le pourcentage des chablis de chêne a été de 2,6 p.100 ($\pm 7,5$ p.100, au risque $\alpha=0.05$) pour le secteur géré par l'ONF et de 6,2 p.100 ($\pm 2,7$ p.100, au risque $\alpha=0.05$) pour les réserves. Cette différence est significative ($\alpha < 0,02$ pour un U de Mann et Whiney valant 2,5).

En conclusion des ces recherches de relations significatives, eu égard à la taille de notre échantillon de placettes (35), seules les trois relations bivariées suivantes sont significatives sur l'ensemble du secteur de Bourron-Marlotte en forêt de Fontainebleau :

- le pourcentage des dégâts (DEGA) est significativement corrélé avec celui sur les hêtres (DHET) ;
- le nombre de chablis de feuillus (NBCF) est fortement corrélé au pourcentage de dégâts sur le charme (DCHA) ;
- le nombre de chablis de feuillus (NBCF) est également corrélé au pourcentage de dégâts sur le chêne (DCHE).

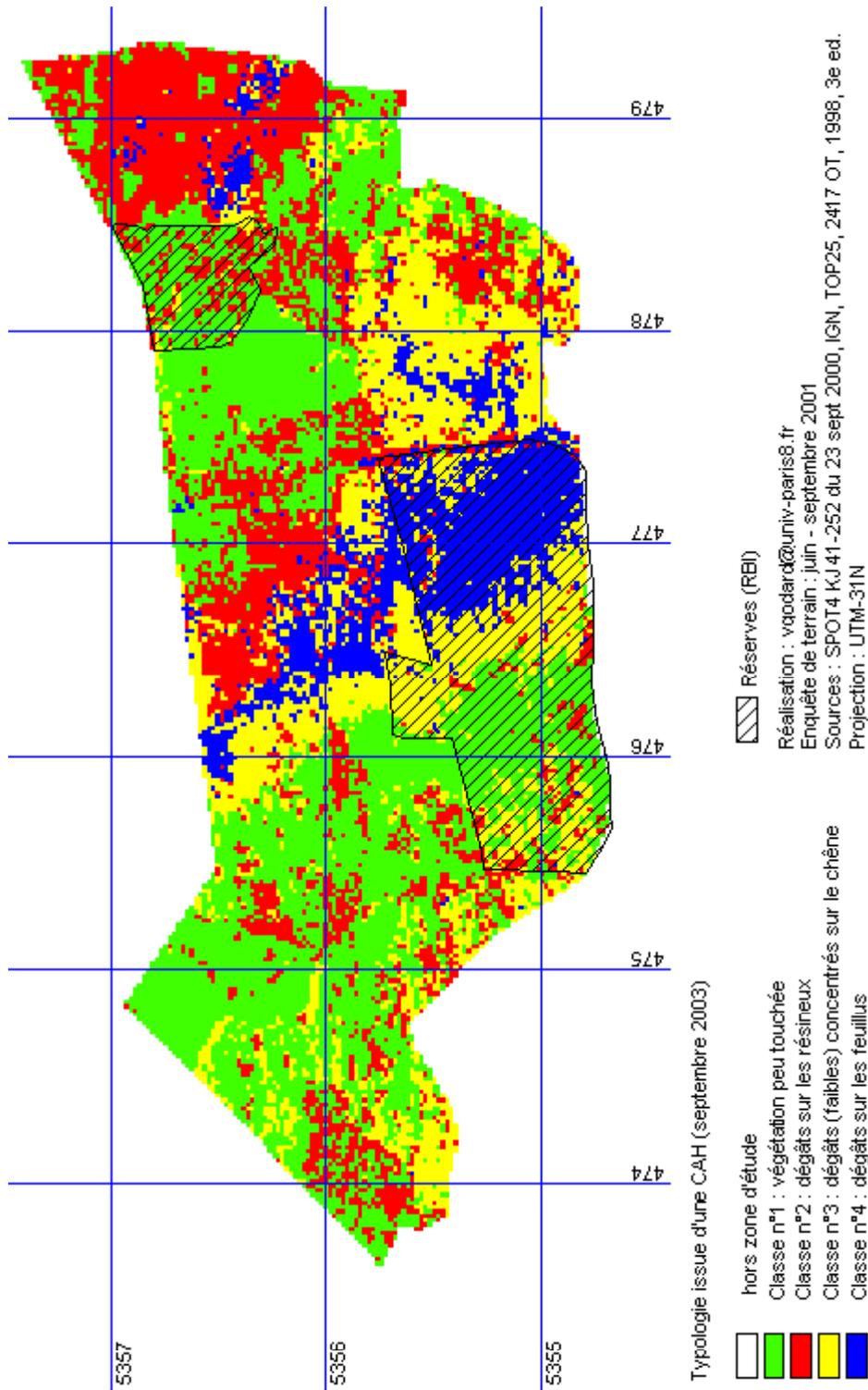
Le pourcentage des dégâts en général et sur le chêne en particulier, ainsi que le nombre de chablis de feuillus, sont les seules variables qui différencient spatialement les réserves biologique intégrales du secteur géré par l'ONF. Ce dernier étant toujours moins touché que les réserves.

Globalement, sur le secteur de Bourron-Marlotte, et en fonction de la taille de l'échantillon, ce sont majoritairement des chablis qui ont touché les peuplements de la zone d'étude. Si le nombre de chablis est significativement supérieur à celui des volis, en revanche, ce sont des arbres de diamètres comparables, et assez importants (catégorie des gros bois) qui sont tombés. Seuls les hêtres ont été significativement volis, et là encore, par le nombre et pas par les diamètres. Les essences résineuses sont très peu touchées car très peu présentes sur le secteur d'étude.

Une typologie en quatre classes fait ressortir : une première classe de feuillus « en place », non touchés par la tempête, où le taux de recouvrement est élevé ;, une deuxième classe où ce sont les chablis de résineux et en particulier ceux des pins sylvestres qui sont caractéristiques ; une troisième classe moins typé, mais où les dégâts sur le chêne sont sur représentés ; et enfin une quatrième classe regroupant les dégâts sur les feuillus.

Enfin, si l'on analyse les relations bivariées de l'ensemble des informations collectées (et pas uniquement sur les classes de la typologie), il ressort que : le pourcentage global des dégâts est fortement corrélé avec celui caractérisant les hêtres ; le nombre de chablis de feuillus est, lui aussi, fortement corrélé au pourcentage de dégâts sur le charme (DCHA) ; et qu'enfin, le nombre de chablis de feuillus est également corrélé au pourcentage de dégâts sur le chêne. Quant à différencier les espaces mis en réserve de ceux encore exploités, au regard de l'épisode tempétueux de décembre 1999, très peu de variables y contribuent. Seuls les pourcentages globaux de dégâts et ceux touchant le chêne, ainsi que le nombre de chablis de feuillus différencient significativement ces deux espaces

Figure 30 – Carte des dégâts en forêt domaniale de Fontainebleau (secteur de Bourron-Marlotte)



3. Synthèse des types de dégâts

A l'issue de ces analyses par secteur d'étude, il convient de synthétiser l'ensemble des informations générées. Les dégâts peuvent être présentés par grands types d'organisation structurale, mais également à l'aide de variables secondaires comme les essences.

- Existe-t-il une hauteur de peuplement plus particulièrement vulnérable ?

Il ne semble pas se dessiner sur les trois secteurs étudiés de hauteur seuil. Dans certains cas, ce sont les peuplements de petites tailles (- de 15 m) qui sont prioritairement touchés par la tempête (Armainvilliers), dans d'autres ce sont les peuplements dont la canopée dépasse 15, voire 20 m.

- Existe-t-il un diamètre moyen plus particulièrement vulnérable ?

Le diamètre des arbres semble être une variable influente quant à la vulnérabilité aux effets de la tempête, mais là encore, il est difficile d'en tirer une ligne générale. En effet, rien que sur le secteur de Conches-Breteuil, certaines classes de la typologie indiquent que les charmes sont atteints sur les petits et les très gros diamètres, les pins et les douglas sur les gros diamètres et les épicéas sur les moyennes sections. A Fontainebleau, sur le secteur de Bourron-Marlotte, c'est les gros diamètres qui sont touchés. Ce paramètre est donc important, il ressort souvent, mais semble être le jeu des conditions locales. Le calcul d'un coefficient d'élancement aurait peut-être apporté une autre éclairage quant à ces deux variables (hauteur et diamètre).

- Existe-t-il un traitement sylvicole plus particulièrement vulnérable ?

Ce ne sont pas les atteintes à la futaie qui sont les plus marquantes, bien qu'elles soient significatives, mais celles au taillis, que ce soit sur le taillis simple ou le taillis sous futaie. Ceci concerne, bien évidemment, les feuillus. La présence du taillis, que l'on peut envisager comme résiduel ou de gestion peu active, est en général accompagné de dégâts car celui-ci est au minimum balivable ou recépage, voire âgé ou épuisé. Cette variable est systématiquement et significativement associée aux dégâts sur Conches-Breteuil et Armainvilliers. A Fontainebleau, sur le secteur d'étude, le taillis n'était pas présent. La futaie, régulière pour les secteurs étudiés, est touchée au travers de certaines essences mais pas de façon réellement remarquable.

- Existe-t-il des essences plus particulièrement vulnérables ?

Là où ils sont suffisamment nombreux (au regard des critères de la représentativité statistique), les résineux ont été systématiquement perçus comme très vulnérables à la tempête. Cependant, cela ne concerne que le massif de Conches-Breteuil, ces essences étant peu ou pas représentées en forêt domaniale d'Armainvilliers et sur le secteur de Bourron-Marlotte à Fontainebleau. Dès lors qu'ils faisaient plus de 15 m, les pins (par volis) et les douglas de gros diamètre et les épicéas (par chablis) de moyen diamètre ont été touchés sur le massif de Conches-Breteuil.

Pour ce qui est des feuillus, les essences d'accompagnement qui constituent le taillis (bois blancs en général ou charmes en particulier) ont été significativement touchées par chablis. Localement, en taillis sous futaie pour les gros chênes (par chablis) ou en futaie pour le hêtre (par volis), on constate des dégâts significatifs sur la futaie de feuillus. Cependant, là encore sur les forêts étudiées, pas de règles générales.

Au final, une typologie des dégâts se dégage par petites touches sur les trois ensembles forestiers étudiés. Il n'y a pas de règles générales sur ces forêts de plaines ou de plateaux où le feuillus est plutôt dominant. Il ressort toutefois, de façon un peu générale, que les essences d'accompagnement du taillis, dont l'intérêt économique va décroissant, ne sont plus suffisamment exploitées, sont donc fragilisées et ont été particulièrement touchées. Les résineux, lorsqu'ils sont statistiquement assez nombreux, ce qui n'est pas toujours le cas dans ces forêts, sont effectivement, là encore, des essences très touchées.

CONCLUSION GENERALE

SYLVOFACIES ET SCENARIOS DE RECONSTITUTION

Le travail réalisé dans ce programme de recherche a privilégié l'approche stationnelle, conduite à l'échelle du sylvofaciès, unité élémentaire de peuplement et de milieu. Base d'enquête de terrain, cette unité spatiale permet une cartographie analytique (facteurs du milieu naturel, actes de gestion) et synthétique (potentialité), et ouvre sur les actions d'aménagement sylvicoles. La fiche d'identité précise le biofaciès de la station forestière, identifié par le bilan hydrique stationnel. Cette variable intégratrice permet la compréhension de la dynamique de l'eau sur l'interface atmosphère- plante-sol. Le biofaciès montre aussi tout son intérêt pour la recherche des voies de reconstitution des peuplements détruits. L'approche de ces processus relève d'analyses synchroniques et (ou) diachroniques. L'analyse synchronique s'applique à des unités forestières qui ont subi des catastrophes successives. Dès lors, l'analyse des structures forestières actuelles permet de retrouver les témoignages de cicatrisations successives, pour certains enregistrés dans les sources d'archives. Le recours aux historiens, de la forêt entre autres, s'avère indispensable. Cette approche conduit à repérer les unités de peuplements appartenant à un stade de cicatrisation chronologiquement fixé. La projection du vecteur temps sur le plan spatial permet l'identification et le repérage des phases de reconstitution des couverts forestiers appartenant à une séquence tempétueuse donnée. Les modèles de cicatrisation élaborés incluent les dynamiques des espèces ligneuses présentes, les concurrences intra et interspécifiques et les vitesses de transformation des sylvosystèmes.

L'analyse diachronique suit trois approches, chronologique, régressive, comparative, qui sont indépendantes ou imbriquées. L'approche chronologique inscrit l'événement tempétueux dans un calendrier. Cette démarche facilite la recherche d'une éventuelle distribution temporelle de la catastrophe, séquences qui se traduisent par des schémas de cicatrisation qui voient se télescoper les temps du climat, des cicatrisations biologiques et écologiques et ceux des actions anthropiques. Le montre, par exemple, le modèle classique de la sylvigénèse en milieu tempéré défini dans la RBI du Gros Fouteau (programme MAB ; FAILLE et alii, 1984). Il s'est bâti, pour une part, sur l'observation de la fermeture progressive des trouées ouvertes lors de violentes tempêtes, entre autres celles de 1967 et de 1984. L'approche régressive prend comme point de départ l'accident le plus récent qui autorise un constat, sur le terrain, des dégâts occasionnés et des processus de cicatrisation qui s'enclenchent immédiatement. Photographies aériennes et (ou) images satellitales sont les documents spatiaux privilégiés. Les critères-images issus de la confrontation avec le terrain peuvent être transposés sur le même type de documents enregistrant les phénomènes du passé. Ainsi, l'interprétation qualitative et quantitative des dégâts anciens devient possible, de même que l'évaluation des vitesses et des modalités de cicatrisation. L'analyse comparative se propose de mettre en regard puis de confronter les effets des accidents tempétueux survenus dans divers lieux d'un même massif forestier ou dans des massifs différents. Elle peut s'intégrer aussi bien à l'analyse synchronique qu'à l'analyse diachronique comme s'articuler dans une combinatoire des deux procédures.

Les recherches sur ce thème ont été conduites, durant les années 2001, 2002, et prolongées en 2003, dans la réserve biologique intégrale Les Erables et Déluge. Des éléments de comparaison étaient apportés par les travaux menés depuis plusieurs décennies dans les réserves de la Tillaie et du Gros-Fouteau (LEMEE, 1987 PONTAILLER et alii, 1997). Le secteur, mal desservi et mal innervé par les routes et les sentiers, était peu fréquenté. La "zone de silence" (mention qui figure sur les anciennes cartes I.G.N. au 1/25 000) fut créée dans les années 70, au moment où l'on commençait à fermer le massif bellifontain à la circulation automobile, avec l'installation de barrières destinée au public ; elle n'impliquait aucune gestion spécifique. Les peuplements

répondaient à l'exigence d'un réseau représentatif des écosystèmes typiques de plateau (les Ventes Emblard par exemple), mais aussi de coteaux ouest et est pour les parcelles de la Vallée Jauberton (P568 et P572, cf. GRANDMOUGIN, 2003, fig. 28, p. 49). Les peuplements sont des taillis sous futaie avec étage dominant de chêne puis sous étage de hêtre en mélange avec le merisier et le charme, futaie mélangée de chênes, hêtres, bouleaux, merisiers et même du châtaignier à l'extrême sud de la réserve (carrefour de la route de l'Épine et de la route de Recloses). L'intérêt sylvicole de ces parcelles était très limité, comme le montrent les nombreux bouleaux dans la strate arborescente supérieure.

Démarche et résultats sont présentés ci-dessous :

- a) Etude comparative dans les deux RBI de la Tillaie et des Erables et Déluge (cf. Tableau 33) ;
- b) Comparaison des dynamiques entre petites et grandes ouvertures dans la RBI les Erables et Déluge (cf. Tableau 34).

Tableau 33 - Etude comparative dans les deux RBI de la Tillaie et des Erables et Déluge

La Tillaie RBI créée en 1853	Les Erables et Déluge RBI créée en 1996
Tempêtes répertoriées depuis le milieu du XIXe siècle	Tempête de 1999
<ul style="list-style-type: none"> • suivi des petites et des grandes ouvertures sur documents et sur le terrain à partir des années 1980 • définition des phases et des stades de la reconquête • établissement de modèles de dynamiques 	<ul style="list-style-type: none"> • bilan parcellaire des dégâts en 2000 • suivi de ces parcelles en 2001, en 2002 • comparaison des étapes de reconquêtes des différentes ouvertures avec les documents établis pour la Tillaie

Tableau 34 - Comparaison des dynamiques entre petites et grandes ouvertures dans la RBI les Erables et Déluge

Années	Petites ouvertures	Grandes ouvertures
2000-2001	Herbacées Plantules de chênes Plantules d'érables	Herbacées Plantules de chênes Plantules d'érables
2002	Ronces	Densification du couvert Apparition de touffes de ronces et de plantules de hêtres
2003	Elimination progressive des jeunes chênes et érables	Mélange de chênes, hêtres, érables et touffes de ronces
+ n	Vers une forêt de hêtres	Vers une forêt mélangée de hêtres, de chênes et d'érables

La cicatrisation des espaces forestiers endommagés suit trois stratégies, l'élargissement des couronnes des arbres bordiers, la libération des tiges réprimées antérieurement par l'ombrage

disparu, la régénération à partir de semis postérieurs aux ouvertures (FAILLE et *alii*, 1984). La taille de l'ouverture, puits de lumière, trouée inférieure à 0,5 ha, trouée ou clairière supérieure à 0,5 ha, influe sur le déclenchement de l'une ou l'autre de ces stratégies (Courtois, 2003). Le comportement des essences accompagnatrices varie selon qu'elles croissent dans la chênaie ou la hêtraie. L'Erable sycomore, *Acer pseudoplatanus*, présente des jeunes tiges nombreuses ; la compétition intraspécifique est forte à moyen terme. Sous la hêtraie les chances de domination pourraient être liées la fréquence des épisodes tempétueux, qui empêcherait la redomination du hêtre. Les jeunes plants de Charme, *Carpinus betulus*, sont nombreux pour une espèce qui se développe assez bien à l'ombre. Ils ne participent pas encore activement à la reconquête des ouvertures. Semis, juvéniles et jeunes plants du Frêne, *Fraxinus excelsior*, existent mais sont peu fréquents ; ils possèdent un fort potentiel pour atteindre la strate arborescente. Mais les conditions stationnelles sont assez peu satisfaisantes. Le Merisier, *Prunus avium*, est disséminée ; sa présence est liée à un apport latéral de graines d'une parcelle voisine. L'Erable champêtre, *Acer campestre*, est présent sous la chênaie comme sous la hêtraie. Les semenciers n'ont pas été touchés par la tempête. La survie de l'espèce dans la parcelle est conditionnée à la fréquence des futures ouvertures.

A l'heure où la régénération naturelle est de plus en plus prise en compte dans la reconstitution des espaces ouverts, l'étude de la reconquête végétale spontanée s'inscrit dans l'état d'esprit d'une gestion de la forêt plus proche de la nature. L'ont montrés les nombreux débats dans la presse généraliste et les revues spécialisés.

BIBLIOGRAPHIE

- AMAT, J.-P. et M. HOTYAT, 1984 – "Etude 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, p. 103-135.
- AMAT, J.-P. et M. HOTYAT, à paraître – "De l'instantané de la catastrophe aux temps de la cicatrisation : tempêtes et forêts". In Actes du colloque, septembre 2002 *Géographie historique*, Paris.
- Anonyme, 1994 *Données climatiques et bioclimats forestiers de Normandie. Application au diagnostic de station*. Caen, CRPF de Basse-Normandie
- Anonyme, 2000 *Climatologie de Seine-et-Marne. Décembre 1999*. Melun, Météo-France, 20 p.
- BAIZE, D., 1989 *Guide des analyses courantes en pédologie*. Paris, Inra, 172 p.
- BERGONZINI, J.-C. et O. LAROUSSINIE, 2000 - *Les écosystèmes forestiers dans les tempêtes*. Paris, ECOFOR, 133 p.
- BERTIN, J., 1967 – *Sémiologie graphique*. Paris, Gauthier-Villars, 431 p.
- BRAQUE, R., 1978 - *La forêt et ses problèmes dans le sud du Bassin Parisien*. Clermont-Ferrand, université, thèse de doctorat d'Etat, 2 vol., 943 p.
- BRUCIAMACCHIE, M, G. GRANDJEAN et F. JACOBEE, 1994 – "Installation de régénérations feuillues dans de petites trouées en peuplements irréguliers". *Revue forestière française*, XLVI, n°6, pp. 639-654.
- CARDENAS G. et Ch. De FOUQUET, 2001 - *Étude géostatistique des dégâts occasionnés par la tempête de décembre 1999 à la Forêt d'Armainvilliers* (Seine-et-Marne). École des Mines, Fontainebleau, 63 p.
- Collectif, 2000 - *Tempête sur les forêts françaises*. Fontainebleau, AFEF, Rencontres Forêt-Bois, n° 8.
- Collectif, 2000 - *Expertise collective sur les tempêtes, la sensibilité des forêts, et sur leur reconstitution*. ECOFOR, juin 2000.
- Collectif, 1999 – *Impacts potentiels du changement climatique en France au XXIe siècle*. Paris, MATE, 128 p.
- CHAAR, H. et F. COLIN, 1999 – "Développement en hauteur des régénérations de chêne sessile". *Revue forestière française*, LI, n°2, pp. 341-354.
- CHADULE, 1997 - *Initiation aux pratiques statistiques en géographie*. Paris, Armand Colin / Masson, 4ème éd., Col. U, Série Géographie, 203 p.
- COURTOIS, N., 2003 *Forêt et tempête à Fontainebleau : scénarii de reconstitution*. Mémoire de DEA, université Paris IV, 138 p. et annexes.
- DHOTE, J-F, 1997 – "Effet des éclaircies sur le diamètre dominant des futaies régulières de hêtre ou de chêne sessile". *Revue forestière française*, XLIX, n°2, pp. 341-354.
- EASTMAN, J.-R., 2001 *IDRISI Guide to GIS and Image Processing*. Volume 2. Worcester (MA), Clark Labs, 144 p.
- FAILLE, A, LEMEE G. et PONTAILLER J.-Y., 1984a – "Dynamique des clairières d'une forêt inexploitée (réserves biologiques de Fontainebleau). II : Origine et état actuel des ouvertures". *Acta Oecologica Generalis*, V, n°2, pp. 181-199.
- FAILLE, A, G. LEMEE et J.-Y. PONTAILLER, 1984b – "Dynamique des clairières d'une forêt inexploitée (réserves biologiques de Fontainebleau). II : Fermeture des clairières actuelles". *Acta Oecologica Generalis*, V, n°2, pp. 181-199.
- FORTIN, P. et B. SEGUIN, 1975 "Estimation de l'ETR régionale à partir de l'ETP locale : utilisation de la relation de Bouchet", *Ann. agron.*, 1975, 26, 5.
- FOURNIER, Ph., 1985 – Enquête sur l'utilisation du territoire effectuée en 1985 par la méthode des segments. p.7

- GRANDMOUGIN, A., 2001 – *Chablis et peuplements en forêt de Fontainebleau suite à la tempête du 26 décembre 1999. Etude de la parcelle 569 de la réserve biologique intégrale « Les Erables et Déluge »*. Mémoire de maîtrise de géographie, université Paris IV, 59 p. et annexes.
- GRANDMOUGIN, A., 2002 – *Tempête à Fontainebleau : Impacts sur la réserve biologique intégrale « Les Erables et Déluge »*. Mémoire de DEA, université Paris IV, 132 p. et annexes.
- GUIOT, Gw., 2001 *Analyse de l'impact de la tempête de décembre 1999 à l'aide d'un SIG sur deux forêts du département de l'Eure en Haute Normandie, la forêt des Hospices civils de Lyon et le groupement forestier de Souvilly*. Université Paris VIII, mémoire de maîtrise de géographie, 154 p.
- HENNERON, Ph., 1999 – *Le massif de Ferrières-Armainvilliers : évolution paysagère et fonctionnelle dans un contexte périurbain*. Mémoire de maîtrise de géographie, université Paris IV, 154 p. et annexes.
- HIGOUNET, Ch., 1990 *Défrichements et villeneuves du Bassin parisien (XIe-XIVe siècles)*. Paris, éd. du CNRS, 384 p.
- HOUZARD, G., 1980 *Les massifs forestiers de Basse-Normandie, Brix, Andaines et Ecouves. Essai de biogéographie*. Thèse pour le doctorat d'Etat ès Lettres et Sciences humaines, mention géographie, université de Caen, 2 vol., 667 p.
- HOUZARD, G., 1984 "Vers un classement des bioclimats des forêts caducifoliées françaises", *RFF*, 1984, 5, vol. 36, p. 362-374.
- HUDSON, WD, RAMM CW, 1987 – Correct formulation of the Kappa coefficient of agreement, *Photogramm. Eng. Remote Sens.* Vol. 53, num. 4, April, pp 421-422.
- IFN, 1985 - *But et méthodes de l'inventaire forestier national*. Paris, Ministère de l'agriculture, Service des forêts, 67 p.
- JAUBERT, G., 2001 – *La tempête du 26 décembre 1999 : effet sur les peuplements forestiers et sur la gestion sylvicole*. Application au Groupe technique de Gretz-Armainvilliers. Mémoire de Maîtrise, Université Paris XII, 163 p. (+ annexes)
- JAUBERT, G., 2002 *Carte de vulnérabilité forestière. Un outil pour la gestion durable des forêts*. Mémoire de DEA, Université Paris IV, 37 p. (+ annexes)
- LALLEMENT, B., 2002 – *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.
- LAROUSSINIE, O. et S. DROUINEAU (coord.) 2000 – Expertise collective sur les tempêtes, la sensibilité des forêts, et sur leur reconstitution. Paris, ECOFOR, np.
- LEMEE, G., 1966 – "Sur l'intérêt écologique des réserves biologiques de la forêt de Fontainebleau". *Bulletin de la Société botanique de France*, CXIII, n°5-6, p. 305-323.
- LEMEE, G., 1987 – "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, pp. 1-11.
- LEMEE, G., 1989 – "Structure et dynamique de la hêtraie des réserves biologiques de la forêt de Fontainebleau : un cas de complexe climacique de forêt feuillue monospécifique tempérée". *Acta Oecologica, Oecologica Generalis*, X, n°2, p. 155-174.
- RICHARD DE LOMENIE, H., 2001 – La tempête du 26 décembre 1999 : Approche météorologique et historique. Mémoire de maîtrise de géographie, université Paris IV, 121 p.
- LOUSSOT, Ph., 2000 – *Catalogue des stations forestières de la Brie francilienne*. AEV, CG de Seine-et-Marne, ONF.
- NAKACHE, J.-P. et F. ONFAIS, 2000 *Méthodes de classification. Avec illustrations SPAD et SAS. Montreuil*. CISIA.CERESTA, 192 p.
- ONF, 1983 – *Aménagement de la Forêt Régionale de Ferrières 1983-2002*. ONF, direction régionale d'Ile-de-France, service départemental de Seine-et-Marne, 110 p. + annexes.
- PARDE, J., 1959 "Indice CVP (Climate, Vegetation, productivity) en France". *RFF*.

- PARDE, J., 1964 "Indice climatique et production ligneuse". Paris, Compte-rendus hebd. des séances de l'Acad. d'Agri. de France, 15 avril 1964.
- PONTAILLER, J.-Y., A. FAILLE et G. LEMEE, 1997 – "Storms drive successional dynamics in natural forests : a case study in Fontainebleau forest (France)". *Forest Ecology and Management*, XCVIII, pp. 1-15.
- ROBIN, A.-M., 1993 – *Catalogue des principales stations forestières de la forêt de Fontainebleau*. Paris, ONF, 371 p.
- ROSENFELD, GH, FITZPATRICK-LINS, K, 1986 – "A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy." *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 52, num. 2, February, pp 223-227.
- SANDERS, L. 2001 *Modèle en analyse spatiale*. Paris, Hermès Science-Lavoisier, 333 p.
- SCHWARTZ, D., 1990 - *Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes*. Paris, Flammarion, 3ème éd., 310 p.
- TENDRON, G., 1983 – *La forêt de Fontainebleau. De l'écologie à la sylviculture*. ONF, 96 p.
- VALLAURI, D., 2002 – "Si la forêt s'écroule... Quelle gestion forestière française après les tempêtes ?" *Revue forestière française*, LIV, n°1, pp. 4-22.

Photographies aériennes

Mission aérienne - février 2000 – 84 photographies aériennes obliques couleurs à l'échelle moyenne du 1/15 000 sur le secteur du Huttier sur un ensemble de 212. Propriété du GF de Conches-Breteuil.

Cartes topographiques

- IGN, 1981, 1914O, La-Neuve-Lyre, 1/25 000
- IGN, 1998, 2414ET, Marne-la-Vallée, Forêt d'Armainvilliers, 1/25 000
- IGN, 1998, 2417OT, Forêt de Fontainebleau, 1/25 000

Cartes thématiques

Cartes géomorphologiques du CNRS, Breteuil-sur-Iton 1/50 000 et Fontainebleau 1/25 000

- ONF, 2001a, Forêt domaniale d'Armainvilliers, Carte des sols, éch. graph. : 1/30 000
- ONF, 2001b, Forêt domaniale d'Armainvilliers, Carte des peuplements, éch. graph. : 1/30 000
- ONF, 2001c, Forêt domaniale d'Armainvilliers, Carte des aménagements, éch. graph. : 1/30 000

ANNEXES

Annexe n°1 : Les données bioclimatiques stationnelles du massif de Conches-Breteuil Fiche de présentation du bilan d'eau stationnel

Les variables de l'analyse bioclimatique, les données brutes des stations retenues et les résultats des calculs sont présentés sous la forme d'une fiche synoptique normalisée appelée *Bilan d'eau stationnel* (BES). La période d'activité de la saison végétative (PAVP) est l'ensemble des mois de l'année de température moyenne supérieure ou égale à 7° C pour les feuillus et à 3°C pour les résineux.

La fiche d'une station comporte, sur deux pages, un tableau principal et trois tableaux pour lesquels les lignes identiques à celles du tableau principal n'ont pas été reproduites.

La première page comporte :

- le tableau principal qui présente, pour une réserve d'eau standard de 100 mm ;
- les étapes du calcul du déficit hydrique relatif ;
- le type de biofacès stationnel ;
- l'indice de potentialité bioclimatique, IPB, et les indices d'aridité ;
- le tableau simplifié pour une réserve de 150 mm.

La seconde page comporte :

- deux tableaux simplifiés pour les réserves d'eau de 75 et 50 mm.
- la barrette graphique des classes de déficit.

Le BES confronte terme à terme une offre climatique (énergétique et hydrique) et une demande biotique.

= L'offre énergétique

- Les températures, valeurs moyennes mensuelles, sont celles enregistrées par les postes du réseau météorologique.

- Les variables radiatives sont l'insolation mensuelle théorique (en heures), l'insolation mensuelle réelle (en heures) et l'irradiation solaire journalière moyenne en l'absence d'atmosphère (IGA, calories/cm²/jour). Les valeurs de l'insolation mensuelle réelle sont fournies par la Météorologie nationale pour les stations principales du réseau ; les autres valeurs sont calculées (AMAT, 1999).

= L'évapotranspiration potentielle, ETP

L'ETP, qui représente l'efficacité thermique du climat, est calculée avec la formule de Turc. Des analyses comparées ont montré que, compte tenu de l'objectif et des marges d'approximation sur les autres variables du BES, les méthodes de Turc et de Penman donnent des résultats équivalents.

= L'offre hydrique

Le BES ne prend en compte que les ressources en eau du réservoir du sol utilisables par les plantes pour leur alimentation et définit la réserve utile (**R**, en mm). La première étape du calcul utilise le stock modal **R = 100 mm**, classiquement retenu par les agronomes. La réserve utilisable (**RU**), fraction de la réserve utile "immédiatement" mobilisable, est évaluée mois par mois. La part de RU que la plante pompe durant la période déficitaire de la PAVP est la réserve utilisée, **Rut**, ou **RFU**, *Réserve facilement utilisable*(BAIZE, 1989). La réserve hydrique se reconstitue, après pompage par la plante, par remplissage du réservoir.

= L'évapotranspiration réelle, ETR

L'ETR signe l'efficacité hydrique du bioclimat.

ETR = Pr + RUt (en mm). Contrairement à celui de l'ETP, le calcul de l'ETR prend en compte les facteurs du milieu qui conditionnent le réservoir de chaque station, comme l'épaisseur et la texture du sol. A l'échelle mésologique les valeurs de l'ETR varient comme varie la couverture pédologique.

= Les déficits hydriques

Le déficit hydrique ΔH traduit l'ajustement entre l'offre et la demande. Il est calculé mois par mois pour la PAVP. Facteur limitant de la croissance biologique, il a une signification en terme de productivité forestière. Le déficit hydrique relatif, **delta H%**, permet les comparaisons entre les déficits hydriques de stations d'ETP différentes ; il est calculé pour chaque mois et pour la période d'activité végétale.

= Le surplus hydrologique

Le surplus hydrologique **SH** mesure l'ajustement entre les entrées et les sorties de l'eau dans le réservoir du sol. Calculé par mois, c'est une variable du bilan hydrologique général.

= Une synthèse bioclimatique

Un calage des valeurs de déficit hydrique avec celles des indices d'aridité établis par de Martonne a permis d'établir sept *classes de déficit hydrique relatif*, applicables au mois puis à la PAVP. (cf. Tableau 35).

Tableau 35 - Classes de déficit hydrique relatif

Biofaciès	Déficit HS%	Biofaciès	Déficit HS%
hyper-humide	1 à 5[	subsec	20 à 25[
humide	5 à 10[	sec	25 à 30[
subhumide	10 à 15[	très sec	30 à 50
déficient	15 à 20[

Le biofaciès d'une station est ainsi caractérisé par un type bioclimatique, défini par la classe de déficit hydrique auquel il appartient, et par un profil bioclimatique, succession des valeurs mensuelles du déficit hydrique relatif de sa saison végétative.

Ces classes de déficit hydrique relatif ont été proposées aux forestiers (HOUZARD, 1984). La fiche de BES porte donc les valeurs des indices d'aridité, annuel **A**, semestriel **As**, de la PAVP (qui se confond avec l'indice semestriel) **AS** et du mois de juillet **Aj**.

= L'indice de potentialité bioclimatique, IPB

Calibrer sur le plan biologique une potentialité bioclimatique revient à établir des outils de mesure de l'offre climatique à la croissance du végétal ligneux. Sture PETERSON proposa une des premières corrélations, l'indice CVP (Climate, Vegetation, Production). Jean PARDE en adapta un indice CVP' et montra la corrélation linéaire entre cet indice et la production ligneuse dans les peuplements forestiers de la France du nord (PARDE, 1959, 1964). A sa suite Gérard HOUZARD, travaillant sur les mêmes bases de données des postes météorologiques proposa l'indice de potentialité bioclimatique, IPB (G. HOUZARD, 1980, 1984), combinant ETP, ETR et déficit hydrique, dont la formule "empirique" est donnée sous la forme :

$$IPB = \sqrt{ETR * (ETR - \Delta H)}$$

Après ajustements G. HOUZARD proposa des équivalences entre le déficit hydrique relatif, l'indice CVP' et l'indice de potentialité bioclimatique (*cf.* Tableau 36).

Tableau 36 - Equivalence entre les classes de déficit et l'indice de potentialité bioclimatique

Déficit hydrique relatif (Houzard)		Indice de potentialité (Houzard)		Indice CVP' (Pardé)
seuil d'indice	biofaciès	seuil d'indice	potentialités de croissance ligneuse	product. potentielle (m ³ /ha/an)
		IPB > 600	exceptionnelles	plus de 14,5
H% < 5	hyperhumide	600 > IPB > 500	très fortes	12 à 14,5
5 < H% < 10	humide	500 > IPB > 450	fortes	9,5 à 12
10 < H% < 15	subhumide	450 > IPB > 400	moyennes	8,5 à 9,5
15 < H% < 20	déficient	400 > IPB > 290	faibles	6,5 à 8,5
20 < H% < 25	subsec	290 > IPB	très faibles	Inférieures à 6,5
25 < H% < 30	sec			
30 < H%	très sec			

La fiche synoptique présente les déficits hydriques mensuels sous la forme d'une *barrette graphique*, limitée aux mois de la PAVP. Chaque classe de déficit est affectée d'une trame à valeur variable de gris.

Cette barrette est un résultat car elle signe le bioclimat stationnel, signature mensuelle et annuelle, statique et dynamique ; c'est aussi un instrument qui autorise les comparaisons, les itérations et les simulations.

Tableau 37 – Bilan d'eau stationnel, station de Breteuil (1951-1980) –1/2

BRETEUIL (1951-1980) Feuillus

RESERVE UTILE (R): 75mm

*****	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	PAVP	ANNEE
Réserve utilisable (RU) (mm)	75	75	75	61	39	21	10	6	5	21	75	75		
Réserve utilisée (Rut) (mm)	0	0	0	14	22	18	11	4	1	0	0	0	70	70
ETR (PrU+Rut) (mm)	8	14	34	56	73	67	63	53	53	39	16	9	404	485
Déficit hydrique (ΔH%)	0	0	0	2	13	34	46	42	15	0	0	0	152	152
Surplus hydrolog. (SH) (mm)	45	35	9								2	46		137
Défic.hydr.relatif (ΔH%)	0	0	0	3	15	34	42	44	22	0	0	0		
Classes Défic.hydr.relat.					■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■				

DEFICIT HYDRIQUE RELATIF DE LA PAVP: $\Delta HS = 27\%$

BIOFACIES: **SEC**

INDICE DE POTENTIALITE BIOCLIMATIQUE: **IPB=319**

CLASSE DE POTENTIALITE: **FAIBLE**

RESERVE UTILE (R): 50mm

*****	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	PAVP	ANNEE
Réserve utilisable (RU) (mm)	50	50	50	40	24	11	5	2	2	18	50	50		
Réserve utilisée (Rut) (mm)	0	0	0	10	16	13	6	3	0	0	0	0	48	48
ETR (PrU+Rut) (mm)	8	14	34	52	67	62	58	52	52	39	16	9	382	463
Déficit hydrique (ΔH%)	0	0	0	6	19	39	51	43	16	0	0	0	174	174
Surplus hydrolog. (SH) (mm)	45	35	9								24	46		159
Défic.hydr.relatif (ΔH%)	0	0	0	10	22	39	47	45	24	0	0	0		
Classes Défic.hydr.relat.				■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■				

DEFICIT HYDRIQUE RELATIF DE LA PAVP: $\Delta HS = 31\%$

BIOFACIES: **TRES SEC**

INDICE DE POTENTIALITE BIOCLIMATIQUE: **IPB=282**

CLASSE DE POTENTIALITE: **TRES FAIBLE**

BARRETTE GRAPHIQUE DES CLASSES DE DEFICIT

ΔH%	Biofaciès		ΔH%	Biofaciès
1: 0-4	HYPERHUMIDE	■	5: 20-24	SUBSEC
2: 5-9	HUMIDE	■ ■	6: 25-29	SEC
3: 10-14	SUBHUMIDE	■ ■ ■ ■	7: >=30	TRES SEC
4: 15-19	DEFICIENT	■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■		
		1 2 3 4 5 6 7		

Tableau 38 - Bilan d'eau stationnel, station de Breteuil (1951-1980) -2/2

***** BILAN D'EAU STATIONNEL *****

BRETEUIL (EURE) (1951-1980)

Latitude: 43° 50'

Altitude: 150m

Station principale: TRAPPES (1951-1980)

Type de peuplement: Feuillus

PAVP: température mensuelle moyenne >= 7 °C

RESERVE UTILE (R): 100mm

*****	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	PAVP	ANNEE
Insolation réelle (h)	52	76	132	172	202	214	225	206	170	122	53	43		
Insolat.théorique (h)	266	280	364	407	468	477	480	438	373	329	270	252		
IGA (cal/cm2/j)	239	373	568	773	927	994	957	825	636	433	272	200		
Température moyenne (°C)	2.9	3.9	6.4	9.2	12.7	15.7	17.6	17.4	15.1	11.1	6.4	3.9	14.1	10.2
ETP (TURC) (mm)	8	14	34	58	86	101	109	95	67	39	15	9	555	636
Précipitations (Pr) (mm)	53	49	43	42	51	49	52	49	52	55	72	55	350	622
Déficit climat. (ETP-Pr) (mm)	-45	-35	-9	16	35	52	57	46	15	-16	-56	-46		
Déficit cumulé (mm)				16	51	103	160	206	221					
Réserve utilisable (RU) (mm)	100	100	100	85	59	34	19	12	10	26	82	100		
Réserve utilisée (RUT) (mm)	0	0	0	15	26	25	15	7	2	0	0	0	90	90
ETR (Pr+RUT) (mm)	8	14	34	57	77	74	67	56	54	39	16	9	424	505
Déficit hydrique (ΔH%)	0	0	0	1	9	27	42	39	13	0	0	0	131	131
Surplus hydrolog. (SH) (mm)	45	35	9									28		117
Défic.hydr.relatif (ΔH%)	0	0	0	2	10	27	39	41	19	0	0	0		
Classes Défic.hydr.relat.					■	■■■■	■■■	■■■	■ ■					

DEFICIT HYDRIQUE RELATIF DE LA PAVP: ΔHS=24%

BIOFACIES:

SUBSEC

INDICE DE POTENTIALITE BIOCLIMATIQUE: IPB=352

CLASSE DE POTENTIALITE: FAIBLE

INDICES D'ARIDITE (ANNUEL, SEMESTRIEL, DE JUILLET):

A=31

As=24

Aj=23

INDICE D'ARIDITE DE LA PAVP:

Ap=25

RESERVE UTILE (R): 150mm

*****	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	PAVP	ANNEE
Réserve utilisable (RU) (mm)	150	150	150	135	106	74	51	37	33	49	105	150		
Réserve utilisée (RUT) (mm)	0	0	0	15	29	32	23	14	4	0	0	0	117	117
ETR (Pr+RUT) (mm)	8	14	34	57	80	81	75	63	56	39	16	9	451	532
Déficit hydrique (ΔH%)	0	0	0	1	6	20	34	32	11	0	0	0	104	104
Surplus hydrolog. (SH) (mm)	45	35	9									1		90
Défic.hydr.relatif (ΔH%)	0	0	0	2	7	20	31	34	16	0	0	0		
Classes Défic.hydr.relat.					-	■■■	■■■	■■■	■ ■					

DEFICIT HYDRIQUE RELATIF DE LA PAVP: ΔHS=19%

BIOFACIES:

DEFICIENT

INDICE DE POTENTIALITE BIOCLIMATIQUE: IPB=396

CLASSE DE POTENTIALITE: FAIBLE

Tableau 39 – Bilan d'eau stationnel, station d'Evreux, année 2000

***** BILAN D'EAU STATIONNEL *****

EVREUX (EURE) (2000)

Latitude: 49° 1'

Altitude: 138m

Station principale: TRAPPES (1951-1980)

Type de peuplement: Feuillus

PAVP: température mensuelle moyenne >= 7 °C

RESERVE UTILE (R): 100mm

*****	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	PAVP	ANNEE
Insolation réelle (h)	52	76	132	172	202	214	225	206	170	122	63	43		
Insolat.théorique (h)	266	280	364	497	469	478	481	439	373	329	269	251		
IGA (cal/cm2/j)	237	370	565	771	927	994	956	824	634	431	269	198		
Température moyenne (°C)	3.9	6.7	7.4	9.3	14.4	16.4	16.3	18.8	16.2	11.5	7.8	6.5	13.1	11.3
ETP (TURC) (mm)	10	20	37	58	92	103	105	98	70	40	18	11	621	664
Précipitations (Pr) (mm)	17	56	29	38	63	44	125	22	39	127	99	83	636	797
Déficit climat. (ETP-Pr) (mm)	-7	-36	8	-30	29	59	-20	75	31	-87	-81	-75		
Déficit cumulé (mm)			8		29	88		75	107					
Réserve utilisable (RU) (mm)	100	100	92	100	74	40	60	45	33	100	100	100		
Réserve utilisée (RUt) (mm)	0	0	8	0	26	34	0	15	12	0	0	0	95	95
ETR (E _{Pr} +RUt) (mm)	10	20	37	58	89	78	105	37	51	40	18	13	513	556
Déficit hydrique (ΔH%)	0	0	0	0	3	25	0	61	19	0	0	0	108	108
Surplus hydrolog. (SH) (mm)	7	36		22						20	81	75	123	241
Défic.hydr.relatif (ΔH%)	0	0	0	0	3	24	0	62	27	0	0	0		
Classes Défic.hydr.relat.						■		■	■	■				

DEFICIT HYDRIQUE RELATIF DE LA PAVP: ΔHS=17%

BIOFACIÈS:

DEFICIENT

INDICE DE POTENTIALITE BIOCLIMATIQUE: IPB=456

CLASSE DE POTENTIALITE:

FORTE

INDICES D'ARIDITE (ANNUEL, SEMESTRIEL, DE JUILLET):

A=37

As=30

Aj=57

INDICE D'ARIDITE DE LA PAVP:

Ap=37

REMARQUES:

Températures de la station

BARRETTE GRAPHIQUE DES CLASSES DE DEFICIT								
ΔE%	Biofaciès						ΔH%	Biofaciès
1: 0-4	HYPERHUMIDE		-	■	■	■	5: 20-24	SUBSEC
2: 5-9	HUMIDE		-	■	■	■	6: 25-29	SEC
3: 10-14	SUBHUMIDE		-	■	■	■	7: >=30	TRES SEC
4: 15-19	DEFICIENT		-	■	■	■		
		1	2	3	4	5	6	7

Annexe n°2 : Fiches d'enquête

Fiche n°1 - Enquête de terrain pour la Forêt des Hospices civils de Lyon et celle du Groupement forestier de Souvilly

N° du point d'enquête	N° de parcelle	Enquêteur	Date

Pente

Nulle Faible Modéré Forte

Exposition

Sans objet Direction en octants (45°) : _____

Taux de recouvrement (et effectif) des essences par strate

	Nb total de tiges comptés dans la strate			Nb total de comptages			% de recouvrement de la strate		
	Norm	Chablis	volis	Norm	Chablis	volis	Norm	Chablis	volis
Strate arbores. haute (+ de 15 m)									
Strate arbores. basse (7<<15m)									
Strate arbustive (2<<7m)									
Strate herbacée haute (1<<2m)									
Strate herbacée basse (<1m)									

4. Structure horizontale des strates prépondérantes (+ de 25%)

4.1. Strate (+ de 15)

Arbres isolés Bouquets lignes maillage géométrique aléatoire ou nappe

4.2. Strate (7<<15)

Arbres isolés Bouquets lignes maillage géométrique aléatoire ou nappe

4.3. Strate (2<<7)

Arbres isolés Bouquets lignes maillage géométrique aléatoire ou nappe

5. Présence de trouées

Exceptionnelles Rares Fréquentes Dues à la tempête

Remarques : (chablis, volis ...)

6. Stade du traitement

Taillis : sans objet recépage jeunes cépées vieillissant

Remarques : _____

Futaie : Sans objet semis ou plants fourré Gaulis perchis
futaie

Remarques : _____

7. Rapport francs de pieds / cépées

sans objet 100-0 80-100 60-40 40-60 20-80 0-100

Remarques : _____

8. Espacement moyen entre les arbres (densité)

sans objet <2,5m 2,5<<5m >5m (lignes) (_____)
 sans objet <2,5m 2,5<<5m >5m (colonnes) (_____)

Remarques : _____

9. Diamètre moyen des arbres (10 arbres)

Strate arborescente haute :

Strate arborescente basse :

10. Dégâts tempête

Stade du traitement :

Etats sanitaires des arbres :

Etat des feuilles :

Age moyen :

Remarques et n° de photo :

DETAILS DU PEUPEMENT (Espèce/Hauteur/Diamètre)

Parcelle n°	Point n°	Di a m ètr e	Petits Bois (17.5/27.5)			Bois Moyen (27.5/37.5)			Gros Bois (37.5/47.5)			Très Gros Bois (+ de 47.5)		
			Essence	NORM	CHAB LIS	VOLI S	NORM	CHAB LIS	VOL IS	NORM	CHA BLI S	VOL IS	NOR M	CHA BLI S	VOI S
Chêne	Strate													
	+ de 15m													
	7 à 15m													
	2 à 7m													
Hêtre	+ de 15m													
	7 à 15m													
	2 à 7m													
Charme	+ de 15m													
	7 à 15m													
	2 à 7m													
Frêne	+ de 15m													
	7 à 15m													
	2 à 7m													
Bouleau	+ de 15m													
	7 à 15m													
	2 à 7m													

DETAILS DU PEUPELEMENT (Espèce/Hauteur/Diamètre) - suite

Parcelle n°	Point n°	Di a m ètr e	Petits Bois (17.5/27.5)			Bois Moyen (27.5/37.5)			Gros Bois (37.5/47.5)			Très Gros Bois (+ de 47.5)		
			Essence	NORM	CHAB LIS	VOLI S	NORM	CHAB LIS	VOL IS	NORM	CHA BLI S	VOL IS	NOR M	CHA BLI S
Douglas	Strate													
	+ de 15m													
	7 à 15m													
	2 à 7m													
Épicéa	+ de 15m													
	7 à 15m													
	2 à 7m													
Pins	+ de 15m													
	7 à 15m													
	2 à 7m													
Mélèze	+ de 15m													
	7 à 15m													
	2 à 7m													
A. grandis	+ de 15m													
	7 à 15m													
	2 à 7m													

Fiche n°2 - Enquête de terrain pour la Forêt de Fontainebleau

N° du point d'enquête	N° de parcelle	Enquêteur(s)	Date
Coordonnées GPS		N° des photos	
x =	y =	z =	

*L'inventaire porte sur un carré d'environ 60*60 m*

1. Type d'occupation du sol

- Formation forestière
 Lande ou friche
 Prairie
 Autres :

2. Effectif des individus par strate (pour un comptage de : _____ levés)

	Décompte des levés sous tiges vivantes	Eff. total	Déc. ss tiges mortes	Eff. Total
Strate arbores. haute (+ de 15 m)				
Strate arbores. basse (7 < < 15 m)				
Strate arbustive (2 < < 7 m)				
Strate herbacée haute (1 < < 2 m)				
Strate herbacée basse (< 1 m)				

3. Composition des strates

	Essences	Nb de tiges par essence		Chablis (Diam.)	Volis (Diam.)
		Uniques	Multiples		
Strate arbores. haute (+ de 15 m)					
Strate arbores. basse (7 < < 15 m)					
Strate arbustive (2 < < 7 m)					
Chablis					

Annexe n°3 – Données collectées sur la Forêt d'Armainvilliers

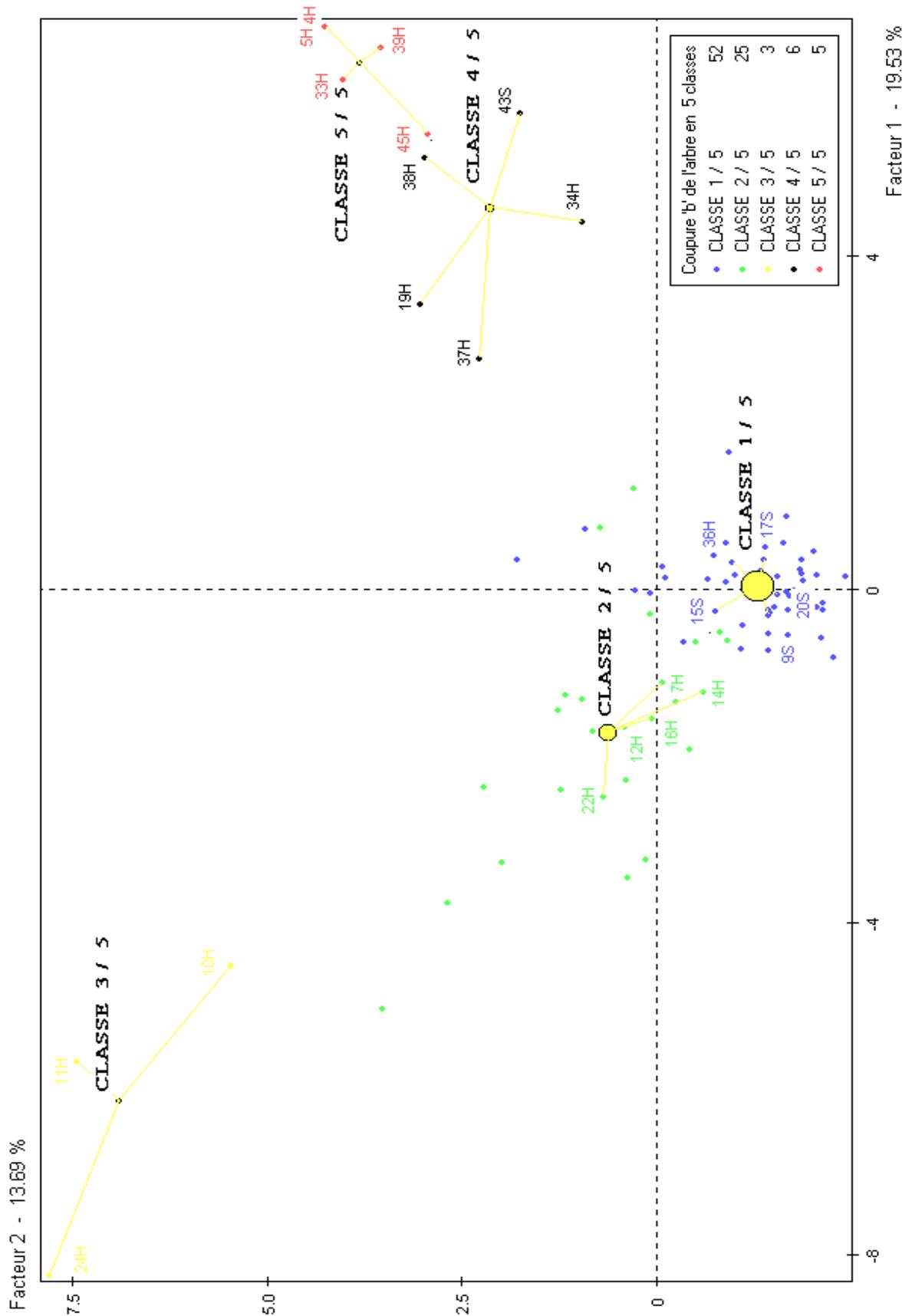
Tableau 40 – Variables actives

Abrév.	N°	et nom des variables	Nb de parcelles
surf	1	surface (ha) : parcelles ou parties	
		volume de chablis (en % du bois sur pied)	
ch10	2	0 - 10 %	61
ch40	3	11 - 40 %	28
ch70	4	41 - 70 %	13
ch100	5	71 - 100 %	11
		structures du peuplement	113
planj	7	jeune plantation	5
perchi	8	perchis et jeune futaie	27
Fjeun	9	futaie jeune	5
Fadul	10	futaie adulte	20
Fagé	11	futaie âgée	33
Tjeu	12	taillis jeune	22
TBaRe	13	taillis balivable ou recéparable	35
TviEp	14	taillis vieilli ou épuisé	8
		hauteur du peuplement	155
0-5m	15	0 - 5 m	5
6-10m	16	6 - 10 m	0
11-15m	17	11 - 15 m	23
16-20m	18	16 - 20 m	30
21-25m	19	21 - 25 m	55
26-30m	20	26 - 30 m	0
rugos	21	rugosité inter-classes	23
		passage en coupe depuis 1995	113
Cfai	22	faible intensité	39
Cfor	23	forteintensité	5
		essences prépondérantes	44
CHE	24	Chêne	80
HET	25	Hêtre	0
PEU	26	Peuplier	0
Afe	27	autres feuillus	63
RES1	28	résineux	7
		essences secondaires	
RES2	29	résineux	12
		données du milieu	
plat	30	plateau	109
vers	31	versant	0
fdva	32	fond de vallon	4
altM	33	altitude maximale de la parcelle	
altm	34	altitude minimale de la parcelle	
argM	35	substrat : argile à meulière	113
autS	36	autre substrat	1
limo	37	formations superficielles : limons	109
coll	38	formations superficielles : colluvions	5
mare	39	hydromorphie de surface : mares	39

Les variables n°1, 33 et 34 « surf, altM et altm » sont des variables continues traitées en variables illustratives dans les traitements multivariés. Les variables n°30 à 32 et 36 à 38 n'ont pas été prises en compte dans les traitements multivariés en raison de leur faible potentiel informatif.

Annexe n°4 – Résultats sur la Forêt de Conches-Breteil

Figure 31 – Répartition des 5 classes sur le 1er plan factoriel (HC de Lyon et GF de Souvilly)



- Les cercles jaunes positionnent le barycentre de chaque classe. Ils sont proportionnels au nombre de placettes qu'ils représentent.
- Les faisceaux jaunes matérialisent les parangons (points les plus représentatifs) de chaque classe.
- Cinq parangons ont été indiqués par classe (trois pour la classe trois en Forêt des Hospices civils de Lyon). Ils sont renseignés par leur numéro de placette. Un « H » indique qu'elle est en Forêt des Hospices civils de Lyon, un « S » qu'elle est dans le GF de Souvilly.
- La part d'inertie de chaque facteur est indiquée à côté de celui-ci.

Tableau 41 – Appartenance des individus aux classes (HC de Lyon et GF de Souvilly)

CLASSE 1 / 5

Numéro d'ordre	Libellé de l'individu
1	17H
2	26H
3	27H
4	28H
5	36H
6	40H
7	41H
8	43H
9	44H
10	1S
11	2S
12	3S
13	4S
14	5S
15	9S
16	11S
17	12S
18	13S
19	14S
20	15S
21	16S
22	17S
23	18S
24	19S
25	20S
26	21S
27	22S
28	23S
29	24S
30	25S
31	26S
32	27S
33	28S
34	29S
35	30S
36	32S
37	33S

38	34S
39	35S
40	36S
41	37S
42	38S
43	39S
44	40S
45	44S
46	45S
47	46S
48	47S
49	48S
50	49S
51	50S
52	52S

CLASSE 2 / 5

Numéro d'ordre	Libellé de l'individu
1	1H
2	2H
3	3H
4	6H
5	7H
6	8H
7	9H
8	12H
9	13H
10	14H
11	15H
12	16H
13	18H
14	20H
15	21H
16	22H
17	23H
18	25H
19	29H
20	31H
21	32H
22	42H
23	46H
24	10S
25	31S

CLASSE 3 / 5

Numéro d'ordre	Libellé de l'individu
1	10H
2	11H
3	24H

CLASSE 4 / 5

Numéro d'ordre	Libellé de l'individu
1	19H
2	34H
3	37H
4	38H
5	42S
6	43S

CLASSE 5 / 5

Numéro d'ordre	Libellé de l'individu
1	4H
2	5H
3	33H
4	39H
5	45H

Figure 32 – Arbre de classification avec partitions en 3 et 5 classes (HC de Lyon et GF de Souvilly)

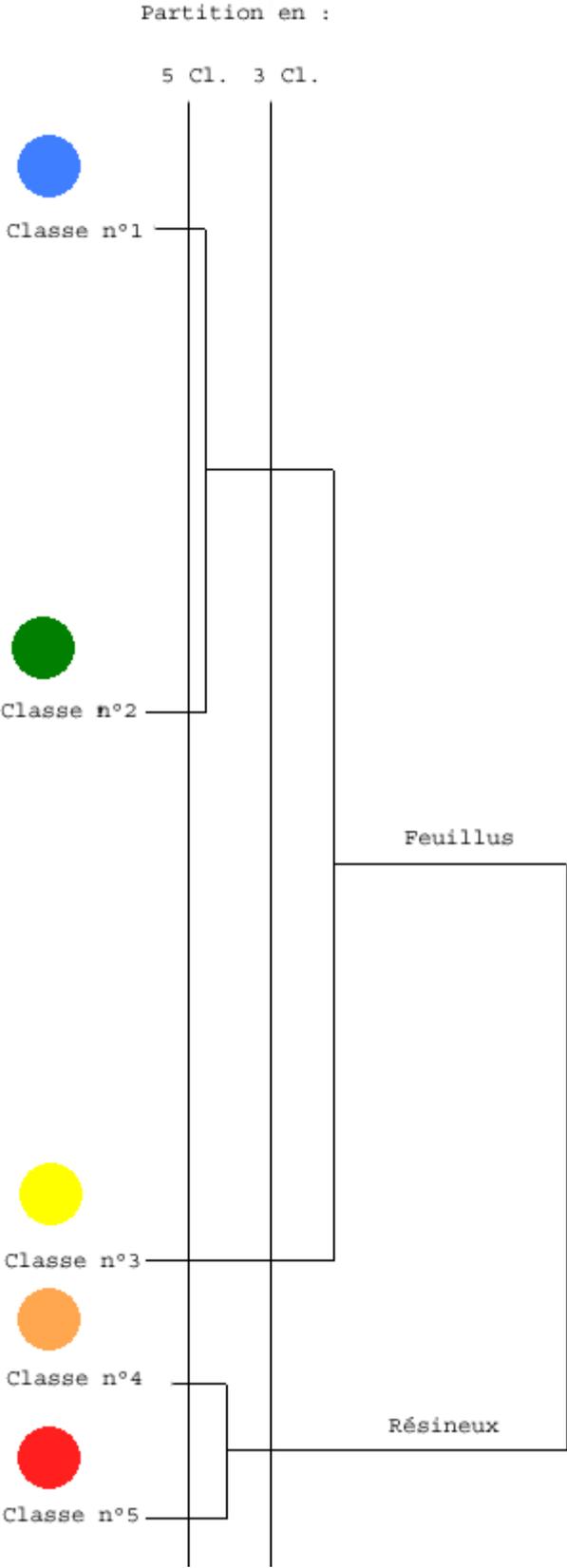


Tableau 42 – Abréviations utilisées pour les forêts normandes (HC de Lyon et GF de Souvilly)

Développé court	Développé long	Signification
Nb_a	Nbarbres	Nombre d'arbres
ADeb	ADebout	Arbres debout
ACha	AChablis	Arbres chablis
AVol	AVolis	Arbres volis
S1Db	S1Dbt	Arbres de la strate haute (> 15m) debout
S1Ch	S1Cha	Arbres de la strate haute (> 15m) chablis
S1Vo	S1Vol	Arbres de la strate haute (> 15m) volis
S2Db	S2Dbt	Arbres de la strate intermédiaire (7 < h < 15m) debout
S2Ch	S2Cha	Arbres de la strate intermédiaire (7 < h < 15m) chablis
S2Vo	S2Vol	Arbres de la strate intermédiaire (7 < h < 15m) volis
S3Db	S3Dbt	Arbres de la strate basse (2 < h < 7m) debout
S4Ch	S3Cha	Arbres de la strate basse (2 < h < 7m) chablis
S3Vo	S3Vol	Arbres de la strate basse (2 < h < 7m) volis
PBDb	PBDbt	Petit bois (17,5 < d < 27,5) debout
PBCh	PBCha	Petit bois (17,5 < d < 27,5) chablis
PBVo	PBVol	Petit bois (17,5 < d < 27,5) volis
MBDb	MBDbt	Moyen bois (27,5 < d < 37,5) debout
MBCh	MBCha	Moyen bois (27,5 < d < 37,5) chablis
MBVo	MBVol	Moyen bois (27,5 < d < 37,5) volis
GBDb	GBDbt	Gros bois (37,5 < d < 47,5) debout
GBCh	GBCha	Gros bois (37,5 < d < 47,5) chablis
GBVo	GBVol	Gros bois (37,5 < d < 47,5) volis
TGBD	TGBDbt	Très gros bois (47,5 < d) debout
TGBC	TGBCha	Très gros bois (47,5 < d) chablis
TGBV	TGBVol	Très gros bois (47,5 < d) volis
CHE	CHE	Chênes debout
CHET	CHETom	Chênes chablis et volis
HET	HET	Hêtres debout
HETT	HETom	Hêtres chablis et volis
CHA	CHA	Charmes debout
CHAT	CHATom	Charme chablis et volis
BB	BB	Bois blancs (bouleaux, trembles, ...) debout
BBTo	BBTom	Bois blancs chablis et volis
DOU	Doug	Douglas debout
DOUT	DouTom	Douglas chablis et volis
EPI	Epi	Epicéas debout
EPIT	EpiTom	Epicéas chablis et volis
PIN	Pin	Pins debout
PINT	PinTom	Pins chablis et volis
SAP	Sapin	Sapins debout
SAPT	SapTom	Sapins chablis et volis

Tableau 43 – Matrice des corrélations (en p.100) pour les forêts normandes (HC de Lyon et GF de Souvilly)

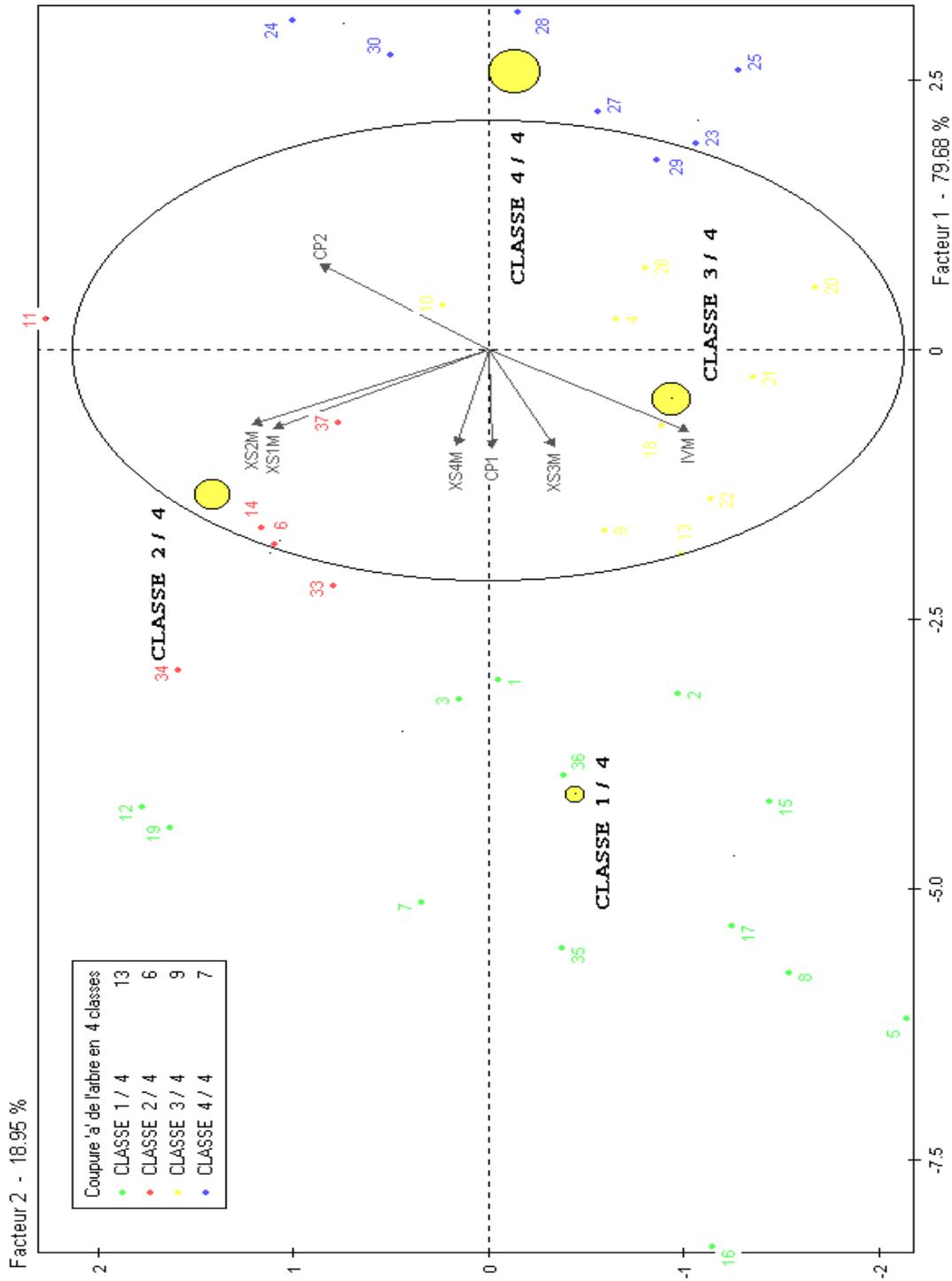
	S1Dbt	S1Cha	S1Vol	S2Dbt	S2Cha	S2Vol	S3Dbt	S3Cha	S3Vol	PBDbt	PBCha	PBVol	MBDbt	MBCha
S1Dbt	100%													
S1Cha	-18%	100%												
S1Vol	-49%	17%	100%											
S2Dbt	-25%	-20%	-28%	100%										
S2Cha	17%	17%	-10%	13%	100%									
S2Vol	5%	7%	-7%	21%	43%	100%								
S3Dbt	-1%	-23%	-26%	-14%	2%	1%	100%							
S3Cha	20%	2%	-5%	-2%	41%	25%	7%	100%						
S3Vol	5%	6%	-4%	1%	28%	-2%	5%	-2%	100%					
PBDbt	43%	-36%	-60%	64%	22%	22%	18%	14%	2%	100%				
PBCha	31%	46%	-12%	2%	41%	11%	-6%	7%	8%	20%	100%			
PBVol	14%	1%	5%	-6%	7%	16%	-8%	4%	3%	9%	10%	100%		
MBDbt	26%	-20%	-23%	-9%	1%	-6%	8%	13%	3%	-6%	1%	-11%	100%	
MBCha	-38%	37%	63%	-19%	0%	6%	-20%	1%	-4%	-44%	-3%	-3%	-17%	100%
MBVol	-41%	30%	73%	-21%	-8%	-5%	-19%	-4%	-3%	-47%	-11%	-4%	-17%	91%
GBDbt	28%	-10%	-30%	-16%	-5%	-5%	27%	0%	0%	-13%	-1%	-11%	11%	-26%
GBCha	-19%	79%	-5%	-17%	0%	-5%	-14%	-1%	4%	-34%	7%	-4%	-14%	-6%
GBVol	-32%	-6%	71%	-18%	-6%	-5%	-17%	-3%	-2%	-40%	-9%	-5%	-15%	-1%
TGBDbt	56%	6%	-22%	1%	32%	16%	-2%	11%	20%	34%	39%	12%	-2%	-18%
TGBCha	24%	39%	-10%	4%	39%	28%	-6%	13%	14%	19%	56%	13%	-8%	1%
TGBVol	13%	23%	-5%	1%	14%	21%	-13%	-4%	-3%	6%	28%	16%	-3%	2%
CHE	23%	-6%	-50%	39%	12%	3%	12%	7%	2%	40%	22%	-10%	8%	-33%
CHETom	12%	51%	-18%	-5%	28%	13%	-8%	10%	9%	-3%	51%	7%	-7%	-1%
HET	15%	-20%	-21%	-14%	0%	-8%	16%	-7%	15%	-3%	-14%	-13%	3%	-16%
HETom	7%	-2%	-8%	-2%	3%	-4%	2%	-3%	13%	0%	-4%	-1%	0%	-5%
CHA	59%	11%	-34%	13%	36%	17%	8%	23%	12%	51%	60%	12%	8%	-18%
CHATom	30%	46%	-9%	5%	45%	20%	-7%	11%	16%	22%	92%	18%	-2%	-2%
BB	19%	-25%	-25%	31%	-6%	16%	10%	-2%	-8%	57%	-6%	-5%	-6%	-19%
BBTom	34%	17%	-10%	2%	19%	33%	2%	1%	-4%	24%	52%	29%	7%	-1%
DouTom	-26%	48%	31%	-17%	-6%	-4%	-16%	-3%	-2%	-39%	-9%	1%	-6%	3%
EpiTom	-44%	24%	76%	-23%	-8%	-6%	-20%	-4%	-3%	-48%	-12%	-1%	-24%	89%
PinTom	-29%	-7%	60%	-14%	-5%	-3%	-13%	-3%	-2%	-31%	-8%	-6%	-15%	3%
SapTom	-1%	6%	-3%	-2%	-3%	-2%	-8%	-2%	-1%	-1%	8%	-3%	-3%	12%
	MBVol	GBDbt	GBCha	GBVol	TGBDbt	TGBCha	TGBVol	CHE	CHETom	HET	HETom	CHA	CHATom	BB
MBVol	100%													
GBDbt	-27%	100%												
GBCha	-4%	5%	100%											
GBVol	5%	-13%	-2%	100%										
TGBDbt	-19%	-9%	-10%	-15%	100%									
TGBCha	-10%	-10%	1%	-8%	46%	100%								
TGBVol	-7%	-17%	-4%	-5%	37%	77%	100%							
CHE	-39%	43%	-3%	-32%	10%	21%	12%	100%						
CHETom	-15%	12%	31%	-12%	19%	58%	40%	46%	100%					
HET	-15%	33%	-9%	-13%	-5%	-6%	-12%	9%	-11%	100%				
HETom	-6%	7%	0%	-5%	10%	8%	0%	-2%	-3%	47%	100%			
CHA	-28%	2%	-12%	-23%	69%	52%	31%	17%	34%	-25%	-3%	100%		
CHATom	-10%	-5%	5%	-7%	46%	72%	48%	21%	51%	-14%	-1%	65%	100%	
BB	-18%	-22%	-19%	-16%	1%	-5%	-7%	-1%	-18%	-2%	3%	-1%	-6%	100%
BBTom	-10%	1%	-3%	-8%	41%	19%	0%	9%	18%	-17%	-7%	47%	41%	22%
DouTom	16%	-5%	65%	29%	-16%	-8%	-6%	-32%	-13%	-12%	-5%	-24%	-8%	-15%
EpiTom	90%	-30%	-10%	19%	-20%	-10%	-7%	-41%	-16%	-15%	-6%	-30%	-10%	-20%

PinTom	6%	-19%	-6%	82%	-12%	-6%	-4%	-25%	-10%	-10%	-4%	-19%	-6%	-12%
SapTom	-1%	-8%	-1%	-2%	-8%	-4%	-3%	-10%	-2%	-6%	-2%	1%	-4%	-1%

	BBTom	DouTom	EpiTom	PinTom	SapTom
BBTom	100%				
DouTom	-9%	100%			
EpiTom	-11%	-6%	100%		
PinTom	-7%	-4%	26%	100%	
SapTom	6%	-2%	-3%	-2%	100%

Annexe n°5 – Résultats sur la Forêt de Fontainebleau, secteur de Bourron-Marlotte

Figure 33 – Répartition des quatre classes sur le premier plan factoriel (secteur de Bourron-Marlotte)



- Les cercles jaunes positionnent le barycentre de chaque classe. Ils sont proportionnels au nombre de placettes qu'ils représentent.

- Les vecteurs indiquent l'orientation et l'intensité de leur représentation sur ce plan factoriel. XS1M représente la moyenne des valeurs radiométriques (pour les placettes échantillons) sur la bande 1 [bande du vert (B1) de SPOT4]. XS2M représente la moyenne des valeurs radiométriques (pour les placettes échantillons) sur la bande 2 [bande rouge (B2)]. XS3M représente la moyenne des valeurs radiométriques (pour les placettes échantillons) sur la bande 3 [bande du PIR (B3)]. XS4M représente la moyenne des valeurs radiométriques (pour les placettes échantillons) sur la bande 4 [bande du MIR (B4)]. IVM représente la moyenne des valeurs radiométriques (pour les placettes échantillons) de l'indice de végétation normalisé $[(XS3-XS2)/(XS3+XS2)]$. CP1 et CP2 sont respectivement les moyennes de la 1^{ère} composante et la 2^e composante de l'ACP sur les données satellitales de la zone d'étude (pour les placettes échantillons).
- La part d'inertie de chaque facteur est indiquée à côté de celui-ci.

Tableau 44 – Appartenance des individus aux classes (secteur de Bourron-Marlotte)

Coupure 'a' de l'arbre en 4 classes

CLASSE 1 / 4

Numéro d'ordre	Numéro dans la Base	Libellé de l'individu
1	1	1
2	2	2
3	3	3
4	5	5
5	7	7
6	8	8
7	12	12
8	15	15
9	16	16
10	17	17
11	19	19
12	33	35
13	34	36

CLASSE 2 / 4

Numéro d'ordre	Numéro dans la Base	Libellé de l'individu
1	6	6
2	11	11
3	14	14
4	31	33
5	32	34
6	35	37

CLASSE 3 / 4

Numéro d'ordre	Numéro dans la	Libellé de l'individu
----------------	----------------	-----------------------

	Base	
1	4	4
2	9	9
3	10	10
4	13	13
5	18	18
6	20	20
7	21	21
8	22	22
9	26	26

CLASSE 4 / 4

Numéro d'ordre	Numéro dans la Base	Libellé de l'individu
1	23	23
2	24	24
3	25	25
4	27	27
5	28	28
6	29	29
7	30	30

Tableau 45 - Abréviations utilisées pour la forêt domaniale de Fontainebleau

Données discrètes

PENT	penne
------	-------

Structure (aléatoire =1 ; organisée ou autre =2) pour les :

SSAH	Strate arborescente haute (tiges de plus de 15 m)
SSAB	Strate arborescente basse (7 < h < 15 m)
SSA	Strate arbustive (2 < h < 7 m)

Présence de trouées

TROU	absente = 1 ; présente = 2
------	----------------------------

Gestion en réserve biologique intégrale ou non :

TRAI	RBI = 1 ; ONF = 2
------	-------------------

Traitement en futaie ou non :

FPCP	F < 80% = 1 ; F > 80% = 2
------	---------------------------

Distance entre les arbres encore debout

DIST	D < 5m = 1 ; D > 5m = 2
------	-------------------------

Données continues

DENS	Densité en nombre d'arbres à l'ha
DIAM	Diamètre moyen (en cm) des arbres debout
DDIA	Diamètre moyen (en cm) des arbres tombés
RAPD	Rapport DIAM/DDIA
DEGA	Dégâts (en %) calculés sur les strates SAH & SAB
NBCH	Nombre total de chablis
NBVO	Nombre total de volis
NBCF	Nombre de chablis feuillus

NBCR	Nombre de chablis résineux
STER	Surface terrière des arbres tombés
DCHA	% de dégâts sur le charme
DCHE	% de dégâts sur le chêne
DHET	% de dégâts sur le hêtre
DPSY	% de dégâts sur le pin sylvestre
TRAH	Taux de recouvrement (en %) de la strate arbores. haute (tiges de plus de 15 m)
TRAB	Taux de recouvrement (en %) de la strate arbores. basse (7 < h < 15 m)
TRSA	Taux de recouvrement (en %) de la strate arbustive (2 < h < 7 m)
TRHH	Taux de recouvrement (en %) de la strate herbacée haute (1 < h < 2 m)
TRHB	Taux de recouvrement (en %) de la strate herbacée basse (h < 1 m)

Tableau 46 – Matrice des corrélations (en p.100) des variables dendrométriques pour la forêt de Fontainebleau (secteur de Bourron-Marlotte)

	DENS	DIAM	DDIA	RAPD	DEGA	NBCH	NBVO	NBCF	NBCR	STER	DCHA	DCHE	DHET
DENS	100%												
DIAM	-62%	100%											
DDIA	-46%	62%	100%										
RAPD	-15%	2%	72%	100%									
DEGA	-31%	23%	28%	20%	100%								
NBCH	-30%	5%	13%	20%	89%	100%							
NBVO	-17%	0%	12%	19%	44%	37%	100%						
NBCF	-28%	4%	13%	19%	85%	99%	28%	100%					
NBCR	-6%	2%	0%	3%	12%	-4%	50%	-20%	100%				
STER	-32%	14%	31%	30%	85%	90%	51%	88%	-1%	100%			
DCHA	-17%	-14%	8%	24%	67%	76%	59%	77%	-13%	77%	100%		
DCHE	-24%	12%	31%	29%	55%	62%	18%	64%	-23%	62%	54%	100%	
DHET	-20%	33%	33%	12%	81%	57%	13%	58%	-15%	56%	41%	38%	100%
DPSY	-5%	-14%	1%	6%	-12%	-15%	9%	-22%	48%	-16%	-17%	-26%	-17%
TRAH	-39%	25%	32%	25%	-33%	-16%	2%	-13%	-21%	-9%	-8%	7%	-39%
TRAB	7%	-42%	-31%	-2%	-57%	-42%	-13%	-42%	7%	-38%	-24%	-38%	-58%
TRSA	52%	-36%	-47%	-37%	-40%	-39%	-29%	-34%	-26%	-30%	-23%	-31%	-19%
TRHH	-16%	33%	20%	-7%	6%	-10%	-15%	-8%	-11%	-3%	-12%	-11%	33%
TRHB	13%	2%	13%	9%	22%	14%	20%	12%	10%	26%	13%	7%	23%

	DPSY	TRAH	TRAB	TRSA	TRHH	TRHB
DPSY	100%					
TRAH	-15%	100%				
TRAB	25%	15%	100%			
TRSA	-10%	-15%	30%	100%		
TRHH	10%	-17%	-1%	25%	100%	
TRHB	-1%	-5%	-20%	-1%	47%	100%

Tableau 47 - Matrice des corrélations (en p.100) des variables radiométriques pour la forêt de Fontainebleau (secteur de Bourron-Marlotte)

	XS1M	XS2M	XS3M	XS4M	IVM	CP1	CP2
XS1M	100%						
XS2M	98%	100%					
XS3M	68%	62%	100%				
XS4M	81%	78%	93%	100%			
IVM	34%	27%	91%	75%	100%		
CP1	79%	74%	98%	98%	83%	100%	
CP2	-43%	-37%	-95%	-81%	-98%	-89%	100%

Table des figures

Figure 1 – Carte de localisation des forêts étudiées : Massif de Conches-Breteuil	8
Figure 2 – Carte de localisation des forêts étudiées : Forêts franciliennes	9
Figure 3 – Les forêts étudiées et la géomorphologie à Conches-Breteuil	10
Figure 4 – Répartition des points d'enquête dans la Forêt des Hospices civils de Lyon et le GF de Souvilly	25
Figure 5 – Répartition des points d'enquête dans la Forêt de Fontainebleau	26
Figure 6 – Classes de dégâts en forêt domaniale d'Armainvilliers.....	33
Figure 7 – Classe de dégâts et rapport francs de pied / cépée dans la Forêt des Hospices civils de Lyon et le GF de Souvilly	35
Figure 8 – Dynamique radiométrique des 35 placettes d'enquête	38
Figure 9 – Intensité des dégâts en fonction de la structure verticale (nb. d'arbres par parcelle).....	44
Figure 10 – Intensité des dégâts en fonction des classes de diamètres (nb. d'arbres par parcelle) ..	45
Figure 11 – Intensité des dégâts en fonction des essences (nb. d'arbres par parcelle)	46
Figure 12 – Variables caractéristiques de la Classe n°1 (HC de Lyon et GF de Souvilly)	47
Figure 13 - Variables caractéristiques de la Classe n°2 (HC de Lyon et GF de Souvilly)	48
Figure 14 - Variables caractéristiques de la Classe n°3 (HC de Lyon et GF de Souvilly)	49
Figure 15 - Variables caractéristiques de la Classe n°4 (HC de Lyon et GF de Souvilly)	49
Figure 16 - Variables caractéristiques de la Classe n°5 (HC de Lyon et GF de Souvilly)	50
Figure 17 – Traitements sylvicoles et typologie en cinq classes des Forêts des Hospices civils de Lyon et celles du GF de Souvilly d'après l'enquête d'août 2000.....	51
Figure 18 – Nature du peuplement et typologie en cinq classes des Forêts des Hospices civils de Lyon et celles du GF de Souvilly d'après l'enquête d'août 2000.....	52
Figure 19 – Ajustement entre les volis de gros bois et les pins tombés.....	54
Figure 20 – Carte d'intensité des dégâts sur le secteur du Huttier.....	57
Figure 21 – Intensité des dégâts sur le secteur du Huttier	58
Figure 22 – Dégâts dans les classes d'âge de la futaie résineuse du Huttier	59
Figure 23 – Intensité des dégâts en fonction des diamètres et du type de casse (diamètre moyen par parcelle).....	78
Figure 24 - Intensité des dégâts en fonction des essences et du type de casse (diamètre moyen par parcelle).....	79
Figure 25 - Intensité des dégâts en fonction du type de casse et de la nature du peuplement (nb. par parcelle).....	79
Figure 26 - Variables caractéristiques de la Classe n°1 (FD de Fontainebleau, secteur de Bourron-Marlotte)	81
Figure 27 - Variables caractéristiques de la Classe n°2 (FD de Fontainebleau, secteur de Bourron-Marlotte)	82
Figure 28 - Variables caractéristiques de la Classe n°3 (FD de Fontainebleau, secteur de Bourron-Marlotte)	83
Figure 29 - Variables caractéristiques de la Classe n°4 (FD de Fontainebleau, secteur de Bourron-Marlotte)	84
Figure 30 – Carte des dégâts en forêt domaniale de Fontainebleau (secteur de Bourron-Marlotte) ..	87
Figure 31 – Répartition des 5 classes sur le 1er plan factoriel (HC de Lyon et GF de Souvilly)...	111
Figure 32 – Arbre de classification avec partitions en 3 et 5 classes (HC de Lyon et GF de Souvilly)	115
Figure 33 – Répartition des quatre classes sur le premier plan factoriel (secteur de Bourron-Marlotte)	119

Table des tableaux

Tableau 1 - Découpage bioclimatique pour les essences feuillues, Normandie, R = 100 mm.....	14
Tableau 2 - Découpage bioclimatique pour les essences feuillues, Normandie, R = 50 mm.....	14
Tableau 3 – Matrice de corrélations des valeurs radiométriques sur les parcelles d’entraînement..	39
Tableau 4 – Matrice de confusions	39
Tableau 5 – Détail des fractiles.....	44
Tableau 6 – Distances des centres de classe au centre du nuage de points.....	47
Tableau 7 – Pourcentage de dégâts et degré d’intensité	56
Tableau 8 – Ancienneté des éclaircies et intensité des dégâts sur le secteur du Huttier.....	59
Tableau 9 – Intensité moyenne des dégâts selon la distance aux trouées.....	60
Tableau 10 - Intensité moyenne des dégâts dans le douglas selon la distance aux trouées.....	60
Tableau 11 - Intensité moyenne des dégâts dans le TSF selon la distance aux trouées.....	61
Tableau 12 – Contribution relative de chaque couple de modalités des chablis et traitements au Khi2.....	62
Tableau 13 - Contribution relative de chaque couple de modalités des chablis et des différents stades de la futaie au Khi2	63
Tableau 14 - Contribution relative de chaque couple de modalités des chablis et des différents stades du taillis au Khi2	64
Tableau 15 - Contribution relative de chaque couple de modalités des chablis et des différentes essences au Khi2	65
Tableau 16 - Contribution relative de chaque couple de modalités des chablis et des différentes hauteurs de peuplements au Khi2	66
Tableau 17 – Relation entre hauteur des peuplements et traitements sylvicoles en FD d’Armainvilliers.....	66
Tableau 18 – Distances des centres de classe au centre du nuage de points.....	67
Tableau 19 - Variables caractéristiques de la Classe n°1 (FD d’Armainvilliers).....	68
Tableau 20 - Variables caractéristiques de la Classe n°2 (FD d’Armainvilliers).....	69
Tableau 21 - Variables caractéristiques de la Classe n°3 (FD d’Armainvilliers).....	70
Tableau 22 - Variables caractéristiques de la Classe n°4 (FD d’Armainvilliers).....	70
Tableau 23 - Variables caractéristiques de la Classe n°5 (FD d’Armainvilliers).....	71
Tableau 24 - Variables caractéristiques de la Classe n°6 (FD d’Armainvilliers).....	72
Tableau 25 - Variables caractéristiques de la Classe n°7 (FD d’Armainvilliers).....	72
Tableau 26 - Variables caractéristiques de la Classe n°8 (FD d’Armainvilliers).....	73
Tableau 27 - Variables caractéristiques de la Classe n°9 (FD d’Armainvilliers).....	73
Tableau 28 - Variables caractéristiques de la Classe n°10 (FD d’Armainvilliers).....	74
Tableau 29 - facteurs explicatifs des dégâts (forêts d’Armainvilliers et –d’Ozouer-le-Voulgis).....	75
Tableau 30 – Détail des fractiles (nb d’arbres).....	77
Tableau 31 – Détails des fractiles (suite, diamètres et surfaces terrières)	77
Tableau 32 – Distances des centres de classe au centre du nuage de points.....	80
Tableau 33 - Etude comparative dans les deux RBI de la Tillaie et des Erables et Déluge	90
Tableau 34 - Comparaison des dynamiques entre petites et grandes ouvertures dans la RBI les Erables et Déluge	90
Tableau 35 - Classes de déficit hydrique relatif.....	98
Tableau 36 - Equivalence entre les classes de déficit et l’indice de potentialité bioclimatique.....	99
Tableau 37 – Bilan d’eau stationnel, station de Breteuil (1951-1980) –1/2	100
Tableau 38 - Bilan d’eau stationnel, station de Breteuil (1951-1980) –2/2.....	101
Tableau 39 – Bilan d’eau stationnel, station d’Evreux, année 2000.....	102
Tableau 40 – Variables actives	109
Tableau 41 – Appartenance des individus aux classes (HC de Lyon et GF de Souvilly).....	112

Tableau 42 – Abréviations utilisées pour les forêts normandes (HC de Lyon et GF de Souvilly).	116
Tableau 43 – Matrice des corrélations (en p.100) pour les forêts normandes (HC de Lyon et GF de Souvilly).....	117
Tableau 44 – Appartenance des individus aux classes (secteur de Bourron-Marlotte)	120
Tableau 45 - Abréviations utilisées pour la forêt domaniale de Fontainebleau.....	121
Tableau 46 – Matrice des corrélations (en p.100) des variables dendrométriques pour la forêt de Fontainebleau (secteur de Bourron-Marlotte).....	122
Tableau 47 - Matrice des corrélations (en p.100) des variables radiométriques pour la forêt de Fontainebleau (secteur de Bourron-Marlotte).....	123

Table des matières

Remerciements	3
ARGUMENTAIRE.....	5
I – CHOIX ET PRESENTATION DES FORETS ÉTUDIÉES	7
A – LE CHOIX DES MILIEUX PHYSIQUES.....	7
1. Milieux physiques homogènes.....	7
1.1. Le massif forestier de Conches-Breteuil (Eure, Haute-Normandie).....	7
1.1.1. Géomorphologie	7
1.1.3. Les groupements végétaux.....	12
1.1.4. L’approche climatique par la méthode du bilan d’eau stationnel	12
1.1.4.1. Données générales	12
1.1.4.2. Approche par le bilan d'eau stationnel	13
1.1.4.3. Les résultats	13
1.1.4.4. L'intérêt de la méthode des bilans d’eau stationnels.....	14
1.2. Forêt domaniale d’Armainvilliers.....	15
1.2.1. Géomorphologie, hydromorphie et pédologie	15
1.2.2. Climat.....	16
1.2.3. Drainage et assainissement:	17
1.2.4. Stations forestières	17
2. Milieux physiques différenciés	18
2.1. La forêt communale d'Ozouer Le Voulgis.....	18
2.1.1. Géomorphologie et pédologie.....	18
2.1.2. Climat.....	19
2.2. La forêt domaniale de Fontainebleau.....	19
2.2.1. Géomorphologie et pédologie.....	19
2.2.2. Climat.....	20
B - LES PEUPELEMENTS ET LEUR HISTORIQUE	20
1. Le massif normand de Conches-Breteuil.....	20
1.1. Historique de la forêt de Breteuil.....	20
1.2. La forêt d'établissement public des Hospices civils de Lyon	21
1.3. La forêt du Comte de Béarn.....	21
1.4. Le secteur forestier du Huttier	21
2. Les forêts franciliennes	21
2.1. Forêt domaniale d’Armainvilliers.....	21
2.1.1. Historique :	22
2.1.2. Répartition des essences	22
2.1.3. L’aménagement forestier	22
2.1.4. Une forêt surexploitée.....	22
2.2. Forêt communale d’Ozouer le Voulgis.....	23
2.2.1. Historique.....	23
2.2.2. Essences et peuplements :	23
2.2.3. L’aménagement.....	23
2.3. Forêt domaniale de Fontainebleau	23
2.3.1. Historique.....	23
2.3.2. Aménagements et réserves.....	24
II - METHODOLOGIE.....	27
1. Échantillonnage et collecte de l'information.....	27
1.1. Échantillonnages ponctuels.....	27
1.1.1. Tirage systématique de points.....	27

1.1.2. Tirage aléatoire et stratifié de points.....	28
1.2. Échantillonnages surfaciques.....	29
1.2.1. Cartographie exhaustive sans photo-interprétation.....	29
1.2.2. Cartographie exhaustive avec photo-interprétation.....	29
2. Le traitement de l'information.....	30
2.1. Les traitements statistiques.....	30
2.1.1. Traitements univariés.....	30
2.1.2. Traitements bivariés.....	30
2.1.3. Traitements multivariés.....	31
2.2. Les traitements cartographiques.....	32
2.2.1. Traitements univariés.....	32
2.2.2. Traitements bivariés.....	32
2.2.3. Traitements multivariés.....	34
2.3. Le traitement des données satellitales.....	36
2.3.1. Les prétraitements effectués.....	36
2.3.2. Les traitements.....	37
2.4. Quelques traitements spécifiques par analyse spatiales.....	40
2.4.1. La distribution des dégâts.....	40
2.4.2. Influence de l'environnement sur les dégâts.....	40
III - ANALYSE DES DÉGÂTS.....	43
1. Les Forêts normandes : le massif de Conches-Breteuil.....	43
1.1. La forêt des Hospices civils de Lyon et le groupement forestier de Souvilly.....	43
1.1.1. Unicité des deux entités.....	43
1.1.2. Caractéristiques générales des dégâts.....	44
1.1.3. Typologie multivariée.....	46
1.1.4. Typologie bivariée.....	53
1.2. Le secteur du Huttier.....	56
1.2.1. Les dégâts sur l'ensemble du secteur du Huttier.....	56
1.2.2. Les dégâts « aspatiaux ».....	59
1.2.3. Les dégâts « spatiaux ».....	60
2. Les Forêts franciliennes.....	61
2.1. Forêt domaniale d'Armainvilliers.....	61
2.1.1. Typologie bivariée.....	61
2.1.1.1. Part des traitements sylvicoles dans les chablis.....	62
2.1.1.2. Part du traitement en futaie dans les chablis.....	63
2.1.1.3. Part du traitement en taillis dans les chablis.....	64
2.1.1.4. Part des différentes essences dans les chablis.....	65
2.1.1.5. Part de la hauteur des peuplements dans les chablis.....	65
2.1.2. Typologie multivariée.....	67
2.2. Forêt communale d'Ozouer le Voulgis.....	75
2.3. Forêt domaniale de Fontainebleau : secteur de Bourron-Marlotte.....	76
2.3.1. Unicité des deux entités.....	76
2.3.2. Caractéristiques générales des dégâts.....	77
2.3.3. Typologie multivariée.....	80
2.3.4. Typologie bivariée.....	85
3. Synthèse des types de dégâts.....	88
CONCLUSION GENERALE.....	89
BIBLIOGRAPHIE.....	93
Photographies aériennes.....	95
Cartes topographiques.....	95

Cartes thématiques	95
ANNEXES	97
Annexe n°1 : Les données bioclimatiques stationnelles du massif de Conches-Breteuil	97
Fiche de présentation du bilan d'eau stationnel	97
Annexe n°2 : Fiches d'enquête	103
Fiche n°1 - Enquête de terrain pour la Forêt des Hospices civils de Lyon et celle du Groupement forestier de Souvilly	103
Fiche n°2 - Enquête de terrain pour la Forêt de Fontainebleau	107
Annexe n°3 – Données collectées sur la Forêt d'Armainvilliers	109
Annexe n°4 – Résultats sur la Forêt de Conches-Breteuil	111
Annexe n°5 – Résultats sur la Forêt de Fontainebleau, secteur de Bourron-Marlotte	119
Table des figures	125
Table des tableaux	127
Table des matières	129