



Évaluation des facteurs de résistance au vent des peuplements de pin maritime après la tempête Klaus à l'aide des données de l'inventaire forestier

Thierry Belouard, Rémy Marchadier, Dominique Merzeau, Céline Meredieu,
Yves Brunet, Sébastien Drouineau, Eric Paillassa, Philippe Riou-Nivert

► To cite this version:

Thierry Belouard, Rémy Marchadier, Dominique Merzeau, Céline Meredieu, Yves Brunet, et al..
Évaluation des facteurs de résistance au vent des peuplements de pin maritime après la tempête Klaus
à l'aide des données de l'inventaire forestier. [0] 2012, 77 p. hal-02803727

HAL Id: hal-02803727

<https://hal.inrae.fr/hal-02803727>

Submitted on 5 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Évaluation des facteurs de résistance au vent des peuplements de pin maritime après la tempête Klaus à l'aide des données de l'inventaire forestier



Juin 2012

Thierry Bélouard (IGN), Rémy Marchadier
Dominique Merzeau (CNPFP)
Céline Meredieu (INRA), Yves Brunet (INRA)
Sébastien Drouineau (CRPF Aquitaine)
Eric Paillassa (CNPFP), Philippe Riou-Nivert
(CNPFP)

*Étude réalisée avec l'appui financier
du Conseil Régional d'Aquitaine*

Sommaire

0.	Résumé	5
1.	Introduction.....	7
2.	Contexte et motivation de l'étude	9
3.	Données mobilisées.....	10
3.1.	Introduction	10
3.2.	Données brutes et données calculées disponibles	10
3.2.1.	Données IGN.....	10
3.2.2.	Données de vent	15
3.2.3.	Données de placettes expérimentales.....	16
3.3.	Données élaborées dans le cadre de l'étude	18
3.3.1.	Dendrométrie.....	18
3.3.2.	Données météorologiques	18
3.3.3.	Caractéristiques du paysage à partir de la cartographie	19
4.	Méthodes statistiques.....	22
4.1.1.	Introduction.....	22
4.1.2.	Modèle linéaire généralisé.....	22
4.1.3.	Un cas particulier : la régression logistique.....	22
4.1.4.	Choix du modèle	23
5.	Analyse statistique	24
5.1.	Analyse qualitative	24
5.1.1.	Ensemble du Sud-Ouest	24
5.1.2.	Peuplements de pin maritime du Massif landais	28
5.2.	Prédiction du taux de dégâts de pin maritime.....	35
5.2.1.	Détermination des facteurs de stabilité.....	35
5.2.2.	Précision du modèle	37
5.3.	Prédiction des dégâts majeurs de pin maritime.....	40

5.4.	Corrélation entre facteurs	45
6.	Analyse des résultats	48
6.1.	Facteurs de stabilité identifiés	48
6.2.	Facteurs non significatifs.....	50
7.	Evaluation du modèle.....	51
7.1.	Évaluation du modèle sur des données indépendantes	51
7.2.	Cartographie	52
8.	Conclusion : limites et perspectives	53
9.	Bibliographie.....	55
10.	Annexes.....	59
10.1.	Trajectoire du centre de la dépression de la tempête Klaus	59
10.2.	Calcul de quelques données dendrométriques et stationnelles	60
10.3.	Nomenclature de quelques données écologiques et stationnelles	61
10.4.	Fonction logit	62
10.5.	Régions forestières en Aquitaine	62
10.6.	Couverts et taux de couvert	63
10.7.	Liste des facteurs analysés dans l'étude	65
10.8.	Script SQL d'extraction et de calcul des données issues de la base de données de l'inventaire forestier IGN.....	73

Note de lecture : Ce document fait abondamment référence à deux établissements publics ; à l'IFN (Inventaire forestier National) d'une part, à l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) d'autre part. Placé désormais sous la tutelle des ministères chargés du développement durable et des forêts, l'inventaire forestier est, depuis le 1^{er} Janvier 2012, un service de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). La référence à l'un ou l'autre de ces établissements est guidée par la date des opérations citées.

0. Résumé

Dix ans après la tempête Martin, la tempête Klaus survenue le 24 janvier 2009 a provoqué des dégâts de grande ampleur dans le Sud-Ouest de la France, abattant près de 43 millions de m³, dont 37 millions pour le seul pin maritime, essentiellement en Aquitaine.

Cet évènement a renforcé la nécessité d'identifier les principaux facteurs de stabilité des peuplements. Une étude a donc été réalisée en s'appuyant sur la large base de données forestières de l'IGN complétée par des informations caractérisant la vitesse du vent (issues des stations de Météo France et de l'INRA).

L'analyse s'est focalisée sur les peuplements de pin maritime. 145 variables issues de données brutes, calculées ou élaborées spécialement pour l'analyse, ont été testées : elles sont relatives à des caractéristiques dendrométriques, stationnelles, paysagères (occupation du sol à l'ouest du peuplement) ou météorologiques (vent).

Après une analyse qualitative préliminaire permettant de visualiser les relations entre dégâts et facteurs potentiels d'instabilité, des modèles statistiques basés sur des régressions logistiques ont été construits pour estimer le risque de dégâts.

Un premier modèle statistique a permis d'identifier des facteurs significatifs, mais il tend à sous estimer les très forts dégâts. Une amélioration de la précision du modèle a été obtenue en s'intéressant uniquement à la prédiction des taux de dégâts supérieurs à 40 % (dégâts majeurs).

Au final, huit facteurs se sont avérés déterminants dans l'explication de la stabilité des peuplements de pin maritime face au vent.

Ainsi, le risque d'avoir des taux de dégâts supérieurs à 40 % augmente avec :

- la turbulence du vent, une turbulence élevée indiquant que des rafales très intenses se produisent. Ce facteur, qui n'avait jamais été étudié auparavant, permet notamment de distinguer les peuplements de la dune de ceux du massif : sur la dune, où les dégâts sont faibles, la turbulence apparaît en effet moins forte que dans le massif ;
- la « vitesse moyenne maximale » du vent (i.e. maximum journalier de la vitesse moyenne sur 10 mn) ;
- la hauteur du peuplement ;
- la fertilité de la station indiquée par la hauteur dominante à 40 ans.

Les dégâts sont plus faibles pour :

- les stations sèches (le type de station est déterminé par bio-indication à partir de la flore) ;
- les sols non hydromorphes ;
- les taux de couvert correspondant à des peuplements très fermés ou très ouverts ;
- les peuplements abrités à l'ouest par une parcelle de plus grande hauteur.

En revanche, aucun rôle n'a été mis en évidence dans cette étude pour des facteurs comme les éclaircies, la profondeur du sol, l'exposition, le facteur d'élancement ou le mélange d'essences, en raison peut-être de la nature et de la qualité des données.

Ce travail montre bien la diversité des facteurs impliqués dans la stabilité des peuplements qui ne peut pas être expliquée par une ou deux variables clefs. Il met en évidence certains

facteurs déjà identifiés dans des études précédentes : la vitesse du vent, la hauteur des peuplements, l'humidité du sol, le taux de couvert. Il permet aussi d'identifier deux nouveaux facteurs : un lié à la turbulence atmosphérique et un autre à la structure du paysage. En outre, il ne semble pas que les facteurs de gestion des peuplements puissent permettre de diminuer les dégâts dans des situations extrêmes telles que celles rencontrées en 2009.

Le modèle obtenu est perfectible : il repose en particulier, sur des données météorologiques imprécises mais une amélioration importante pourrait être apportée avec les progrès récents de la simulation atmosphérique. Il serait aussi intéressant d'élaborer de nouvelles variables ayant une signification physique directe, comme par exemple la force exercée sur le houppier.

Les rôles des facteurs « abri » et « turbulence du vent » s'ils sont confirmés ultérieurement, ouvrent des questions nouvelles pour la gestion forestière en rajoutant une dimension territoriale à la dimension parcellaire.

1. Introduction

En Europe, les tempêtes hivernales sont des événements qui peuvent être extrêmement destructeurs pour les forêts (Schelhaas et al., 2003 ; Gardiner et al., 2010). A la fin du XX^e siècle, de nombreuses tempêtes ont eu lieu, notamment les deux tempêtes de décembre 1999 (Martin et Lothar). Ces deux événements exceptionnels par leur intensité, ont ravagé toute l'Europe de l'ouest et particulièrement la France (IFN, 2003). Récemment, la tempête Klaus, le 24 janvier 2009 a détruit 43 millions de m³ de bois dans le Sud-Ouest de la France (IFN, 2009b). Il en résulte des pertes économiques immédiates avec la baisse de la valeur marchande du bois et un approvisionnement futur compromis pour la filière bois. Il n'est pas possible d'affirmer aujourd'hui que la fréquence et l'intensité des tempêtes hivernales à venir seront plus importantes avec le changement climatique (Bessemoulin, 2009). Néanmoins, l'étude des facteurs mis en cause dans la stabilité ou l'instabilité des peuplements d'arbres est très importante, afin d'en déduire des conseils pour la gestion des forêts permettant de tenter d'assurer une plus grande stabilité des peuplements. La probabilité ou l'intensité des dégâts peut être liée à différents types de facteurs complexes : météorologiques, topographiques, stationnels, dendrométriques, structure du paysage...

De nombreuses études ont analysé les dégâts causés par les tempêtes par le biais de méthodes empiriques (Albrecht et al., 2010 ; Mayer et al., 2005 ; Piton, 2002 ; Schmidt et al., 2010). D'autres études ont utilisé une approche expérimentale, qui permet d'établir des relations causales dans des conditions contrôlées. Cette approche conduit à des modèles plus mécanistes (Cucchi et al., 2005 ; Gardiner et al., 2000 ; Peltola et al., 1999). Il existe également des modèles incluant des analyses des flux d'air (Dupont et Brunet, 2006 et 2008). Les études expérimentales sont des moyens de comprendre les mécanismes physiques mis en cause dans le déracinement (chablis) ou le bris de l'arbre (volis), et d'une manière générale, les mécanismes qui engendrent des dégâts lors de tempêtes. Les modèles mécanistes ne permettent pas d'obtenir des estimations de probabilités de dégâts pour des inventaires à grande échelle, car ils nécessitent des données précises difficilement mesurables en conditions réelles. Dans le cas d'études sur la base de l'observation régionale de dégâts, les modèles statistiques sont plus appropriés car ils permettent de prédire la probabilité de dommages dus au vent, pour une forêt d'une zone géographique donnée, en mettant en relation les dégâts observés sur cette forêt, avec des facteurs connus pour influencer la résistance au vent. Ces modèles sont souvent construits sous la forme d'une régression logistique. Ils sont particulièrement bien adaptés pour les forêts monospécifiques et équiennes, mais leur pouvoir explicatif est bien souvent limité (Meredieu et al., 2009).

Parmi les études sur la stabilité des peuplements forestiers, de nombreux facteurs potentiels ont été mis en évidence, mais certains apparaissent plus fréquemment que d'autres.

Le facteur « vent » est naturellement très important. Des vitesses de vent élevées engendrent des dégâts considérables. Mais l'augmentation des dégâts avec le vent ne serait pas linéaire (Renaud, 2002). Au-delà d'une vitesse de vent en rafale de 140 km/h, les dégâts sont majeurs pour tous les types de peuplements (Doll, 1988).

L'essence est un facteur qui est toujours examiné. En effet, les feuillus sont réputés d'une manière générale plus résistants aux tempêtes d'hiver que les résineux (Renaud, 2002). Il est vrai que les feuillus ne sont pas feuillés en hiver contrairement aux résineux, ce qui réduit leur prise au vent. De nombreuses tentatives de classement des essences ont été réalisées, mais des contradictions peuvent être relevées car les facteurs pédologiques et les données climatiques ne sont pas toujours pris en compte (Colin et al., 2009). Néanmoins, les chênes pédonculés et sessiles sont généralement considérés comme très résistants, et le mélèze semble être l'un des conifères les plus stables (Riou-Nivert et al., 2005 ; Renaud et al., 2005). Le pin maritime est jugé peu résistant en raison des importants dégâts relevés lors des tempêtes. Il est toutefois intéressant de noter que les pins maritimes de la région forestière de la dune littorale ont bien résisté au vent, car peu de dommages y ont été observés pour les tempêtes de 1999 et 2009 (IFN, 2003 et 2009b). Cette contradiction conduirait à penser que l'espèce est un facteur confondant, puisque entre pins de la dune et

ceux de la lande tout y est différent excepté l'espèce : type de sol, topographie, type de peuplements, mais aussi les conditions de vent.

La topographie est un facteur délicat à prendre en compte dans les études statistiques. L'effet de l'exposition peut varier selon les tempêtes en fonction de la direction des vents au cours de celles-ci. Les peuplements exposés en plein vent apparaissent plus vulnérables (Mayer et al., 2005 ; Piton, 2002 ; Schmidt et al., 2010). De plus, les variables comme la position topographique, la pente, l'exposition et l'altitude sont souvent mal adaptées, car redondantes ou comportant des interactions.

Les caractéristiques dendrométriques des peuplements sont souvent mises en évidence. L'effet de la hauteur est très souvent significatif, notamment pour le pin maritime (Piton, 2002 ; Rosa, 2004). Les peuplements les plus hauts sont potentiellement les plus à risque.

Les caractéristiques stationnelles jouent aussi un rôle sur la stabilité. Un enracinement superficiel lié à la présence d'un horizon compact ou d'une nappe d'eau à faible profondeur rend les peuplements plus vulnérables (Ni Dhubhain et al., 2001). Dans le cas du pin maritime, une fertilisation forte, qui entraîne un surdéveloppement du houppier par rapport aux racines, augmenterait la sensibilité au vent (Najar et al., 2002). Selon Mayer et al. (2005), les dégâts sont accrus sur sols acides. Malgré ces études, l'aspect stationnel reste mal connu.

Les pratiques sylvicoles peuvent également influencer sur le risque de chablis lors d'une tempête. Une éclaircie réalisée lors des cinq années précédant la tempête a un effet déstabilisant pour les résineux, effet qui est moins marqué pour les feuillus (Piton, 2002 ; Renaud et Hervé, 2005). Najar et al. (2002) montrent qu'au niveau de placettes expérimentales des Landes, les éclaircies fragilisent les peuplements tant qu'ils ne sont pas refermés, donc dans les deux premières années après la coupe. La fragilisation moindre des peuplements feuillus pourrait s'expliquer par une gamme d'intensité d'éclaircie peu étendue et des capacités de fermeture du couvert plus efficaces, notamment pour le hêtre (Colin et al., 2009).

Un des domaines les plus débattus concerne les peuplements mélangés et la structure des peuplements. Les résultats de Renaud et Hervé (2005) n'ont pas mis en évidence d'effet marquant du mélange sur la stabilité. D'après Becquey (2000), le mélange peut avoir des effets positifs ou négatifs en fonction de la station, sa composition en essence et sa gestion. Les études n'ont pas non plus permis de mettre en évidence des effets de structure. Selon Bock et al. (2002), dans des conditions de forts vents, et à conditions stationnelles identiques, les dommages sont équivalents pour des taillis sous-futaie et des futaies régulières de hêtre.

La principale limite des modèles statistiques est le manque de connaissance des écoulements de vent à l'échelle du peuplement et du paysage. Une meilleure prise en compte des effets de lisière et de la structure du paysage permettrait sans doute d'améliorer l'analyse des dégâts. Ceci commence à être exploré, à l'aide des modèles mécanistes et des analyses des flux d'air.

Déterminer dans quelle mesure les dommages sont liés aux caractéristiques aérodynamiques du paysage est fondamental. Cet aspect prend en compte l'effet de lisière et l'influence des ouvertures (territoires non boisés, trouées, pare-feux...) sur l'écoulement du vent. On parlera de fragmentation du paysage. Les études sur les flux d'air ont révélé que la turbulence joue un rôle déterminant dans les phénomènes de casse ou d'arrachement du tronc (Brunet et al., 2009). La modélisation des écoulements turbulents au voisinage des canopées permet de tester des hypothèses, de simuler et de prédire des comportements d'arbres face aux turbulences.

2. Contexte et motivation de l'étude

La tempête Klaus a ravagé le Sud-Ouest de la France le 24 janvier 2009, abattant près de 43 millions de m³, dont 37 millions pour le seul pin maritime, essentiellement en Aquitaine (IFN, 2009b).

Dix ans plus tôt, la tempête Martin avait abattu 23 millions de m³ et le plan de reconstitution n'était qu'aux trois quarts achevé début 2009. Ce nouveau coup très dur pose de nombreuses questions sur la sylviculture du pin maritime du Massif landais qui avait pourtant été optimisée au cours du temps (Lesgourgues et al., 2009 ; Inra, 2009).

Après la tempête de 1999, l'IDF, l'IFN (Inventaire Forestier National aujourd'hui IGN Institut National de l'information Géographique et forestière, voir note en page 4) et l'INRA (UMR LERFoB à Nancy) ont mené une vaste étude dans le cadre de l'appel d'offre du GIP Ecofor « Forêt, vent et risques » pour évaluer, à l'aide des données de l'IFN, les facteurs (dendrométriques, stationnels, sylvicoles...) qui avaient influencé la résistance au vent des arbres (Riou-Nivert et al., 2005). Une partie de ces recherches, effectuées au niveau national et pour toutes les essences, avait déjà à l'époque concerné l'Aquitaine, mais le modèle généraliste construit s'était avéré insuffisamment précis. Ces travaux ont aussi débouché, dans une seconde phase, sur la mise au point d'une méthode de diagnostic de la stabilité des peuplements au niveau régional (Bélouard et al., 2005).

À l'heure où la reconstitution du Massif landais doit à nouveau être organisée, beaucoup d'interrogations subsistent. La première impression, au vu des dégâts, incite à l'humilité. Tous les types de peuplements du Massif landais, quels que soient leur âge et la sylviculture pratiquée, semblent avoir souffert. Il s'agit d'un cas type où le vent a dépassé le seuil critique de 140 km/h. Dans d'autres secteurs, où la vitesse de vent a été inférieure, certains peuplements ont résisté et d'autres non, sans qu'une explication ressorte clairement. Il est donc très utile d'analyser ces cas pour en tirer des enseignements, afin de les intégrer dans les conseils sylvicoles futurs et bâtir une gestion plus sûre.

Le retour sur plus de 3200 points d'inventaire effectué rapidement par l'IFN juste après la tempête a permis d'accumuler une masse importante d'informations. Une partie de celle-ci a servi à évaluer les volumes abattus et les surfaces touchées, mais beaucoup de données sur la station et la dendrométrie du peuplement n'avaient pas alors été valorisées au moment du lancement de cette étude. Par ailleurs, l'IFN a appliqué depuis 2005 une nouvelle méthodologie d'inventaire (quatre campagnes réalisées jusqu'à la date de la tempête), mieux adaptée que la précédente à l'évaluation des dégâts lors des catastrophes brutales.

Après avoir indiqué dans un premier temps le contexte, nous détaillerons les données mobilisées dans le cadre de cette étude, selon leur source et leur nature (brute ou élaborée, statistique ou cartographique, etc.). L'approche statistique de la stabilité s'appuie sur le modèle linéaire généralisé dans le cas où la variable d'intérêt est un taux de dégâts continu compris dans l'intervalle 0% - 100%, et sur la régression logistique lorsqu'on s'intéresse à une variable binaire du type « arbre chablis » vs. « arbre indemne » mais également à une variable du type « taux de dégâts supérieur à un seuil donné ».

L'analyse s'appuie largement sur les bases de données forestières de l'IGN. Ces bases de données du service de l'inventaire forestier et statistique comportent des observations et des mesures dendrométriques, stationnelles et topographiques, relevées sur le terrain selon un protocole standardisé. L'analyse est réalisée à partir de données collectées lors des campagnes de levé de 2005 à 2008 et de données collectées immédiatement après la tempête du 24 janvier 2009, ce qui représente plus de 3200 placettes pour le Sud-Ouest. Les facteurs de stabilité pressentis des arbres ont été testés à l'aide d'un modèle linéaire généralisé.

L'analyse à proprement parler s'est focalisée sur les peuplements comportant du pin maritime. Il s'agit principalement des peuplements forestiers du Massif des Landes de Gascogne, dune littorale comprise. L'analyse qualitative préliminaire a permis de visualiser

le lien et sa force entre facteur potentiel d'instabilité et dégâts. Cette analyse qualitative introduit l'analyse statistique et la tentative de construction d'un modèle de stabilité des peuplements de pin maritime. Il n'a pas été effectué d'analyse individuelle des dégâts des arbres dans le cadre de cette étude. Ces résultats devaient ensuite être analysés et évalués à partir d'un jeu de données indépendant, celui du GIS Coopératives de données, qui s'appuie sur un réseau de placettes expérimentales. Le temps imparti à ce projet et les variables mises en évidence dans le modèle n'ont pas permis de conduire cette évaluation. Enfin, la conclusion aborde les limites de cette étude et les perspectives qu'elle ouvre.

Les objectifs initiaux de ce projet étaient donc d'utiliser les informations disponibles à l'IFN pour tenter d'établir des relations statistiques entre les taux de dégâts et des variables susceptibles de les expliquer, de mettre au point des conseils sylvicoles pour la gestion des peuplements de pin maritime dans les Landes de Gascogne et, enfin, de produire si possible des cartes de sensibilité des peuplements restants pour en améliorer la gestion vis-à-vis d'un risque tempête futur.

3. Données mobilisées

3.1. Introduction

Les données utilisées dans le cadre de la présente étude peuvent être classées selon différents critères :

- leur source : IGN, Météo France, GIS Coopérative de données ;
- leur niveau d'élaboration : données issues de mesures ou d'observations, données élaborées c'est-à-dire issues d'un calcul, d'un modèle ou du croisement de plusieurs données voire d'une combinaison de plusieurs de ces traitements ;
- leur domaine : caractéristiques du peuplement, de la station, localisation géographique, météorologie (vent), etc.

La liste des données utilisées dans l'analyse statistique est fournie en annexe (10.7). **Cent quarante cinq variables ont été testées** dans les analyses statistiques. Elles sont présentées dans les paragraphes ci-dessous.

3.2. Données brutes et données calculées disponibles

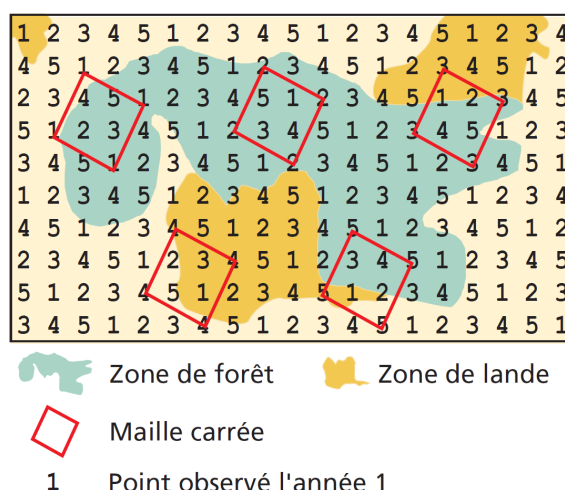
3.2.1. Données IGN

Inventaire statistique

Données courantes

L'échantillon de l'inventaire forestier est systématique dans l'espace et le temps. Il est fractionné en échantillons annuels qui ont la même propriété de répartition uniforme dans l'espace (Figure 1).

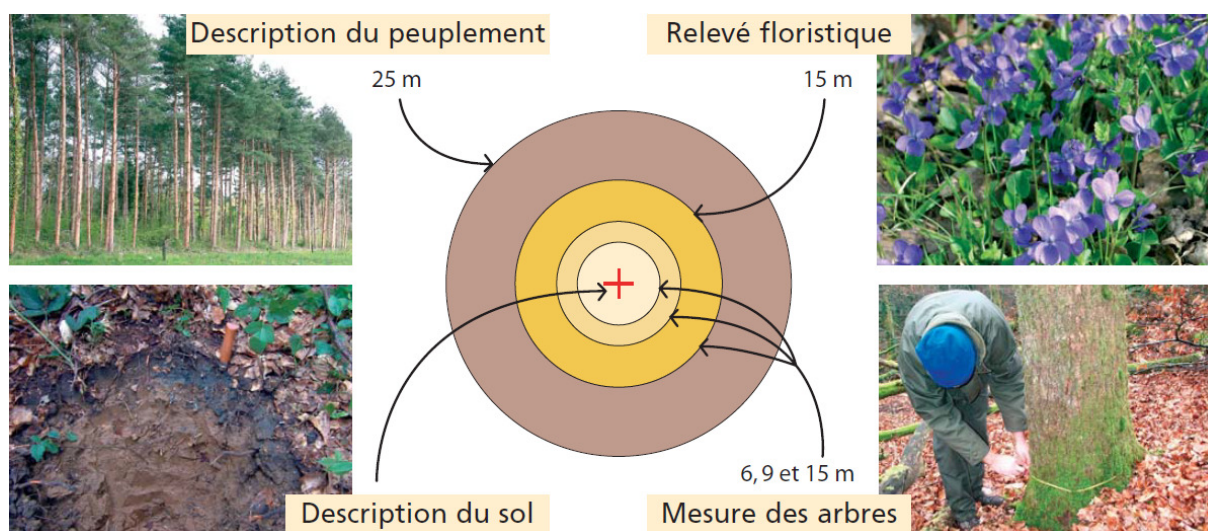
Figure 1 : échantillonnage systématique et annuel de l'IGN (Bélouard et al., 2005)



Ainsi, les échantillons annuels sont sensiblement de même taille, aux aléas d'échantillonnage près. Dix années sont nécessaires pour observer l'échantillon complet.

Après une première phase de photo-interprétation ponctuelle, 9 000 placettes environ, réparties sur tout le territoire national, sont visitées chaque année par les équipes de terrain. En général, en forêt, un levé est réalisé pour 2 000 hectares tous les ans. La forêt du Massif landais étant assez homogène, un levé pour 4 000 hectares s'avère suffisant afin d'obtenir des résultats précis. Les points en forêt de production font l'objet de nombreuses observations (Figure 2).

Figure 2 : schéma d'une placette de levé sur le terrain avec les types d'observations réalisées (IFN 2007)



Chaque point de relevé est le centre de placettes circulaires emboîtées :

- placette de 6 m de rayon : données dendrométriques relevées pour les petits bois (circonférence à 1,30 m comprise entre 23,5 et 70,5 cm) ;
- placette de 9 m de rayon : données dendrométriques relevées pour les moyens bois (circonférence à 1,30 m comprise entre 70,5 et 117,5 cm) ;
- placette de 15 m de rayon : données dendrométriques relevées pour les gros bois (circonférence à 1,30 m supérieure à 117,5 cm), relevés écologiques et floristiques ;

- placette de 25 m de rayon : description du peuplement (taux de couvert¹, structure, etc.).

Données spécifiques à la tempête Klaus

Un protocole spécifique a été mis en place par l'IFN afin de quantifier rapidement les dégâts suite à la tempête de 2009 (IFN, 2009a). Les agents de terrain sont retournés sur l'ensemble des points des campagnes précédentes d'inventaire, qui étaient situés dans la zone touchée (Sud-Ouest). Les opérations dans les départements de la Gironde (33) et des Landes (40), les plus touchés, ont été réalisées quelques jours après les autres, lorsque l'IFN y a été autorisé par l'administration. Les points de coupe rase et sans arbre recensable vivant sur pied lors du levé initial (réalisé entre 2005 et 2008) n'ont pas été revisités.

Sur toutes les placettes de levé avec des arbres recensables, une estimation ponctuelle des dégâts a été faite, afin de quantifier globalement leur importance au niveau de la placette de 7 ares (15 m de rayon).

Cette estimation s'est faite selon cinq classes de taux de dégâts en volume :

- 0 : aucun dégât
- 1 : moins de 20 % de dégâts
- 2 : de 20 % à 40 % de dégâts
- 3 : de 40 % à 60 % de dégâts
- 4 : plus de 60 % de dégâts

Lorsque les conditions l'ont permis (pratiques et sécurité), une analyse des dégâts de tempête au niveau « arbre » a été réalisée, ce qui a permis de fournir une estimation très fine des volumes touchés.

Pour chaque arbre levé lors du levé initial, le type de dégât a été noté selon la nomenclature suivante :

- 1 – Arbre chablis : arbre déraciné et mis au sol par la tempête ;
- 2 – Arbre encroué (ou soulevé) : arbre déraciné (ou soulevé) et encroué sur un arbre voisin, ou arbre soulevé mais non encroué (en équilibre instable) quel que soit l'angle du tronc avec le sol ;
- 3 – Arbre volé : arbre cassé au niveau du tronc par la tempête ;
- 4 – Dégâts houppier : arbre dont le houppier a été détruit à plus des 2/3 par la tempête ;
- 5 – Arbre courbé : arbre fortement courbé ou déformé par la tempête ;
- X – Dégât indéterminé : l'arbre a été exploité rapidement après tempête, sans doute en raison d'un dégât, mais non déterminé.

Dans les secteurs considérés comme difficiles d'accès *a priori* du fait de la présence des chablis (Massif landais) ou du relief (certains secteurs pyrénéens), la campagne de retour sur le terrain a été complétée par une campagne de prise de vues à basse altitude afin de photo-interpréter les dégâts sur la placette de levé. Dans la pratique, cette campagne a été véritablement utile uniquement dans le département des Pyrénées-Orientales et une partie de l'Ariège car il a été finalement possible de se rendre sur quasiment toutes les placettes du Massif landais (Figure 3). Au total, 3217 placettes ont fait l'objet d'un retour sur le terrain.

¹ Le taux de couvert est le rapport total de la projection verticale des houppiers à la surface de la placette (se reporter à l'annexe 10.6 pour plus de détails).

Figure 3 : échantillon d'observation des dégâts de la tempête Klaus selon le type d'opération

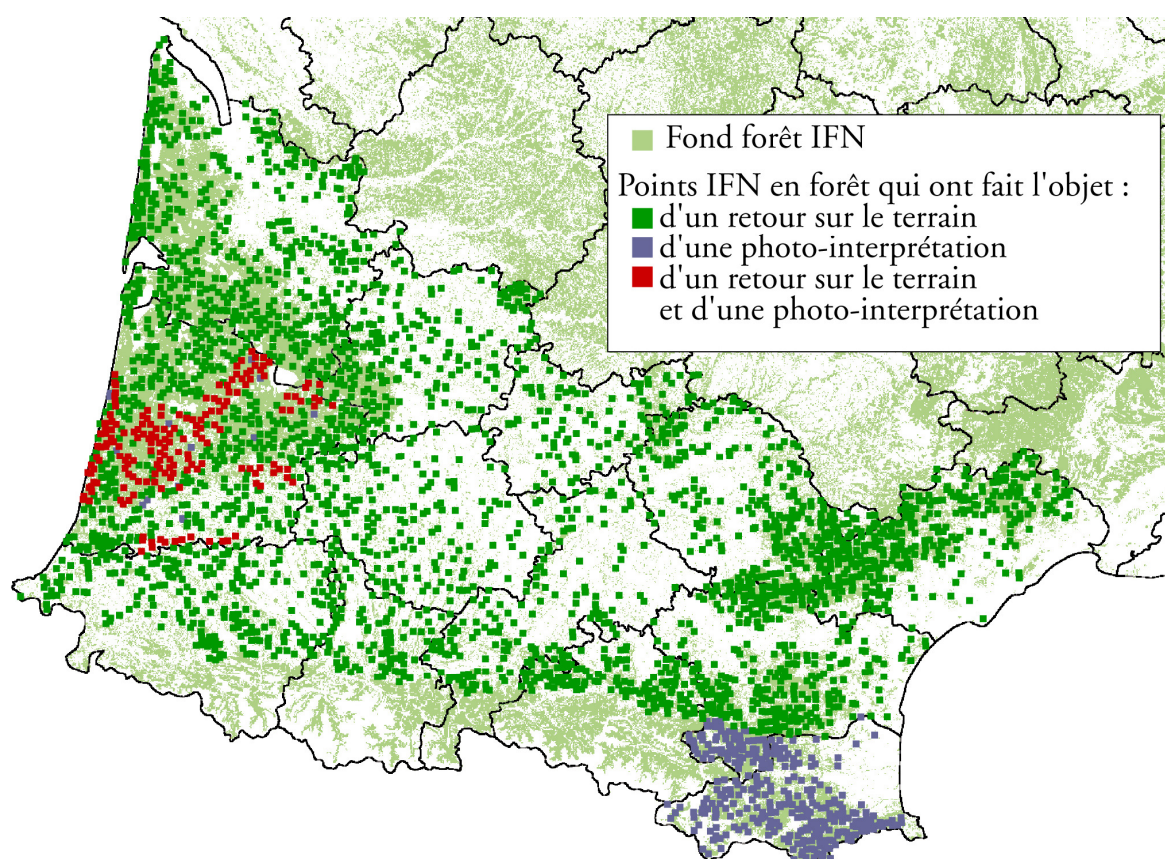


Tableau 1 : échantillon de placettes de levé selon le type d'observation des dégâts et la zone administrative

Région	Département	Levé terrain	Photo-interprétation	Levé et PI	Total
Aquitaine	33	370	5	85	460
	40	316	16	229	561
	47	165			165
	64	224			224
Languedoc-Roussillon	11	278	76		354
	30	1			1
	34	328			328
	66		249		249
Midi-Pyrénées	09	135	13		148
	12	2			2
	31	152			152
	32	151			151
	65	95			95
	81	250			250
	82	76			76
Poitou-Charentes	17	1			1
Total		2 544	359	314	3 217

Le script SQL d'extraction des données de la base du service de l'inventaire forestier et statistique de l'IGN est fourni en annexe (10.8).

La présente étude s'appuie donc avant tout sur les données issues du retour sur le terrain avec une codification des chablis au niveau arbre. En effet, en faisant le rapport entre le type de dégât observé de chaque arbre et son volume relevé avant tempête, un taux de dégâts est obtenu pour la placette. Les volumes sur la placette de levé sont calculés en tenant compte du poids statistique de l'arbre lié à sa classe de grosseur, du fait des différentes tailles des placettes circulaires de la placette de levé.

Pour réaliser un modèle sur le pin maritime, nous avons choisi d'analyser le taux de dégâts des placettes en l'estimant uniquement à partir des pins maritimes présents. Ceci permet d'avoir **le taux de dégâts spécifique au pin maritime sous la forme d'une variable continue entre 0 et 1.**

Cartographie

Outre les données issues de l'échantillon de placettes de l'inventaire statistique, différentes cartographies disponibles auprès de l'IGN ont été mobilisées dans le cadre de cette étude afin, en particulier, d'essayer de caractériser l'effet de la structure du paysage sur l'importance des dégâts. Cette approche a été conduite exclusivement dans le Massif des Landes de Gascogne.

Trois cartographies ont ainsi été utilisées.

Cartographie des types de formation végétale

La cartographie des types de formation végétale est réalisée à partir de la photo-interprétation de prises de vue aériennes infrarouges fausses couleurs IRC, le canal infrarouge étant particulièrement bien adapté à la caractérisation de la végétation (Boureau, 2008 ; IFN, 2010).

Jusqu'en 2006 (version 1), cette cartographie s'appuyait sur le régime du peuplement (futaie/taillis/mélange de futaie et de taillis) et le groupe principal de l'essence (feuillu *vs.* résineux). Seules les essences importantes du département étaient distinguées (pin maritime dans le Massif landais, châtaignier en Dordogne, hêtre dans les Pyrénées-Atlantiques par exemple). La surface minimale de représentation était alors de 2,25 ha. Depuis 2007, la cartographie des types de formation végétale (version 2) est nettement plus précise en termes de composition puisque l'essence des peuplements purs de plus de 2 ha est identifiée. Elle est également plus précise géographiquement puisque la surface minimale de représentation est passée à 50 ares (IFN, 2008). A l'inverse, le régime forestier n'apparaît plus dans la nomenclature.

Dans le cadre de la présente étude, la nouvelle cartographie (version 2) des départements de la Gironde, des Landes et de Lot-et-Garonne n'étaient pas encore disponibles. Nous avons donc utilisé la version 1 de 1995 (département de la Gironde) et 1997 (départements des Landes et du Lot-et-Garonne).

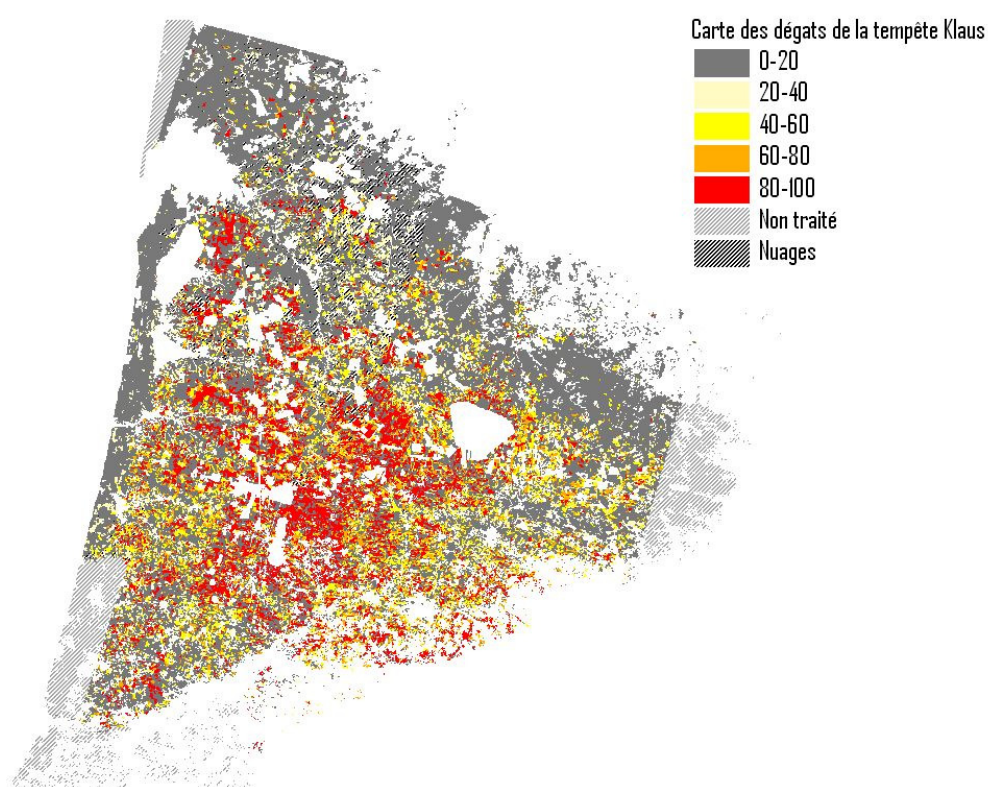
Cartographie des coupes rases

La méthode de cartographie des coupes rases repose sur une comparaison d'images satellitaires (Landsat, résolution de 30 m, Spot, résolution de 10 ou 20 m) de deux années successives (ou séparées de deux ans). La méthode, initialement mise au point par l'INRA de Bordeaux à la fin des années 1980, a été améliorée par l'IFN (Stach et al., 2005). La cartographie des coupes rases du Massif landais a été réalisée sur la période 1990 – 2008 à la demande des utilisateurs (État, région Aquitaine, interprofession forêt-bois) car elle ne relève pas des missions courantes de l'IGN. La Surface Minimale de Représentation (SMR) est de 1 ha, ce qui occasionne une légère sous-estimation de leur importance, de l'ordre de 10%.

Cartographie des dégâts de la tempête Klaus

Parallèlement à l'inventaire statistique des dégâts de la tempête Klaus par retour sur les placettes de levé, l'IFN a procédé à la cartographie des dégâts à partir d'images satellitaires Spot selon une méthode dérivée de celle de la cartographie des coupes rases (Stach et al., 2006). Deux mosaïques d'images ont été constituées pour la circonstance, l'une avant la tempête (février 2008), l'autre juste après (février 2009). Cinq classes de dégâts en couvert d'amplitude constante et égale à 20% ont été retenues. La SMR est de un hectare et la précision planimétrique de 30 m (Figure 4). Cette carte a fait l'objet d'une validation à partir d'autres sources (évaluation statistique IFN, CRPF Aquitaine).

Figure 4 : carte des dégâts forestiers en taux de couvert de la tempête Klaus dans le Massif des Landes de Gascogne par observation satellitaire



3.2.2. Données de vent

Météo France et l'INRA ont pu nous fournir deux types de données, mesurées à 10 m de hauteur, pour caractériser la vitesse du vent lors de la tempête Klaus :

- le maximum journalier de la vitesse instantanée qui est une moyenne sur environ 0,5 s, que nous appellerons **vitesse instantanée maximale** (Figure 6) ;
- le maximum journalier de la vitesse moyenne sur 10 min, que nous appellerons **vitesse moyenne maximale** (Figure 7).

Comme la tempête a débuté dans la nuit du 23 au 24 janvier 2009 sur la côte atlantique, les données des deux jours ont été acquises afin de bien disposer des valeurs maximales (annexe 10.1). Après vérification, il s'est effectivement avéré que les vitesses maximales ont bien été mesurées le 24 janvier sur l'ensemble du Sud-Ouest, y compris sur la côte atlantique.

Les données ont été mesurées sur 99 stations météorologiques situées dans les quinze départements du Sud-Ouest qui ont fait l'objet d'un retour sur le terrain (Figure 6). Les vitesses données en mètres par seconde ont été converties en kilomètres par heure.

Les stations ne sont pas réparties de manière homogène sur le territoire. Il se trouve que les départements de la Gironde et des Landes (les deux départements les plus touchés), sont ceux où la densité de stations est la plus faible. Seules 14 stations météorologiques au total étaient disponibles pour ces deux départements, dont trois au cœur du département des Landes, là où les dégâts ont été les plus importants.

Il s'agit donc de données de vent synthétiques avec une moyenne résolution spatiale (mésos-échelle). En aucun cas, il ne s'agit de données à l'échelle du peuplement forestier (micro-échelle).

3.2.3. Données de placettes expérimentales

Le GIS « Coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers » a pour objet le recueil et la mise en commun de données scientifiques sur la croissance des peuplements forestiers, destinées à l'établissement de modèles de croissance et de références techniques. Cela se concrétise par la mise en place, le suivi et la mesure de réseaux multi-sites et multi-organismes de placettes expérimentales permanentes à très long terme, selon des protocoles standardisés.

La coopérative s'intéresse à cinq espèces forestières : Chênes sessile et pédonculé, Pin maritime, Douglas et Pin laricio auquel s'ajoute un groupe sur les forêts hétérogènes.

Dans le cas du Pin maritime, le réseau, principalement installé en Aquitaine, a comporté jusqu'en 1999 plus de 658 placettes réparties dans 91 dispositifs. Elles sont réparties dans les différents milieux (des dunes aux landes humides) et permettent de croiser différents facteurs : niveau génétique, scénarios de densité, préparation du sol et intensification culturale. Ces placettes, d'une surface minimale de 10 ares, sont mesurées au minimum tous les trois ans. Les variables suivantes sont suivies : statut, circonférence à 1,3 m et hauteur totale. Le type de milieu n'est pas évalué ni par une analyse de la végétation du sol ni par des analyses de sol. Cette procédure est néanmoins en cours.

Lors de la tempête de 2009, tous les arbres ont été notés selon la grille en 4 classes (Figure 5).

Figure 5 : grille de notation des dégâts des arbres utilisée dans les placettes Pin maritime du Gis Coopérative de données en 2009.

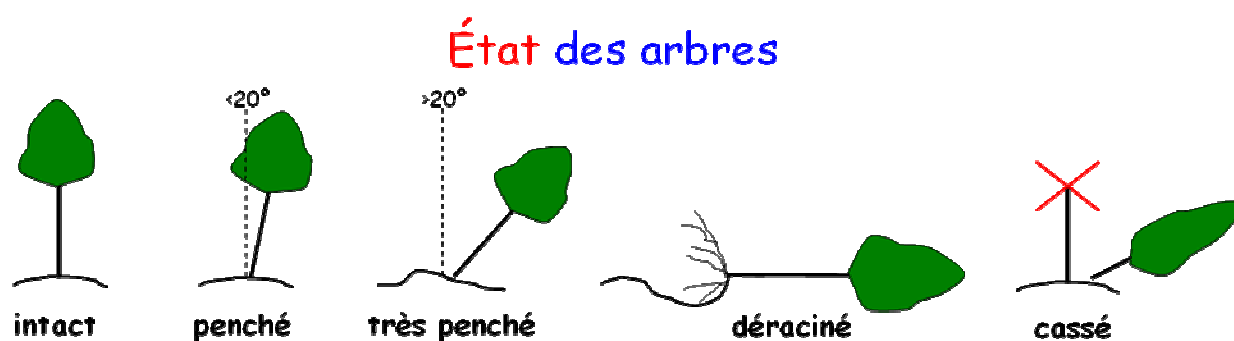


Figure 6 : vitesse instantanée maximale du vent le 24 janvier 2009 mesurée dans les stations météorologiques (sources : Météo France et INRA)

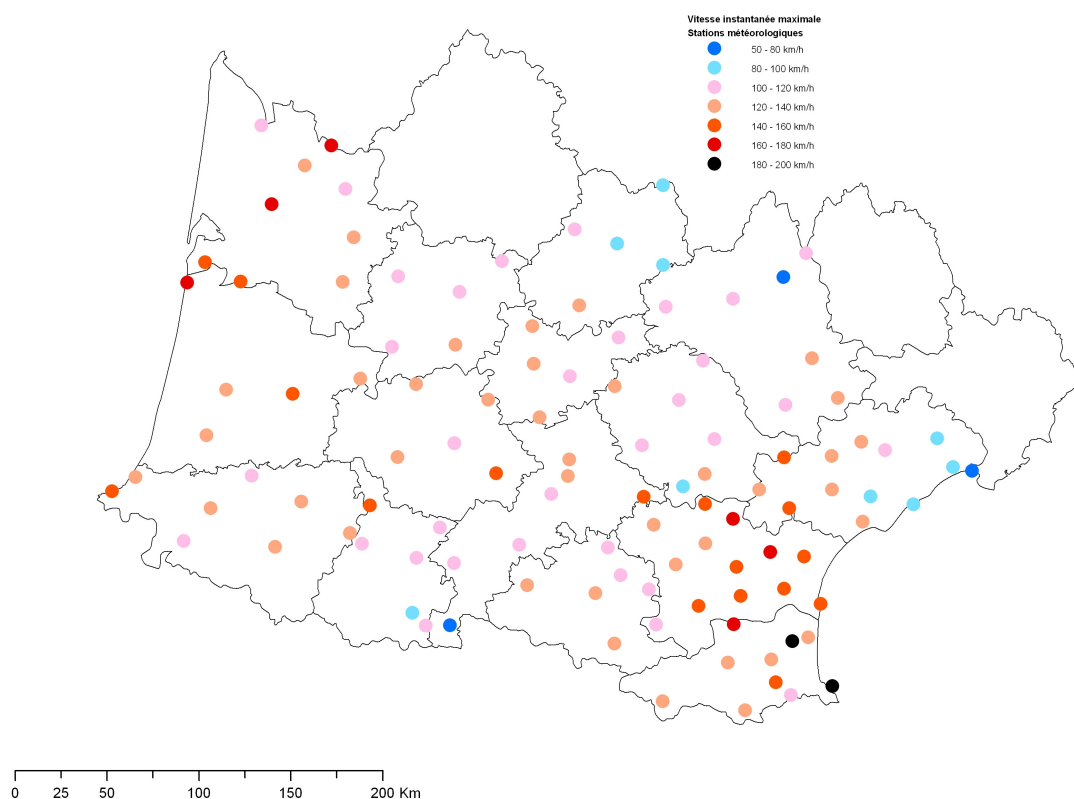
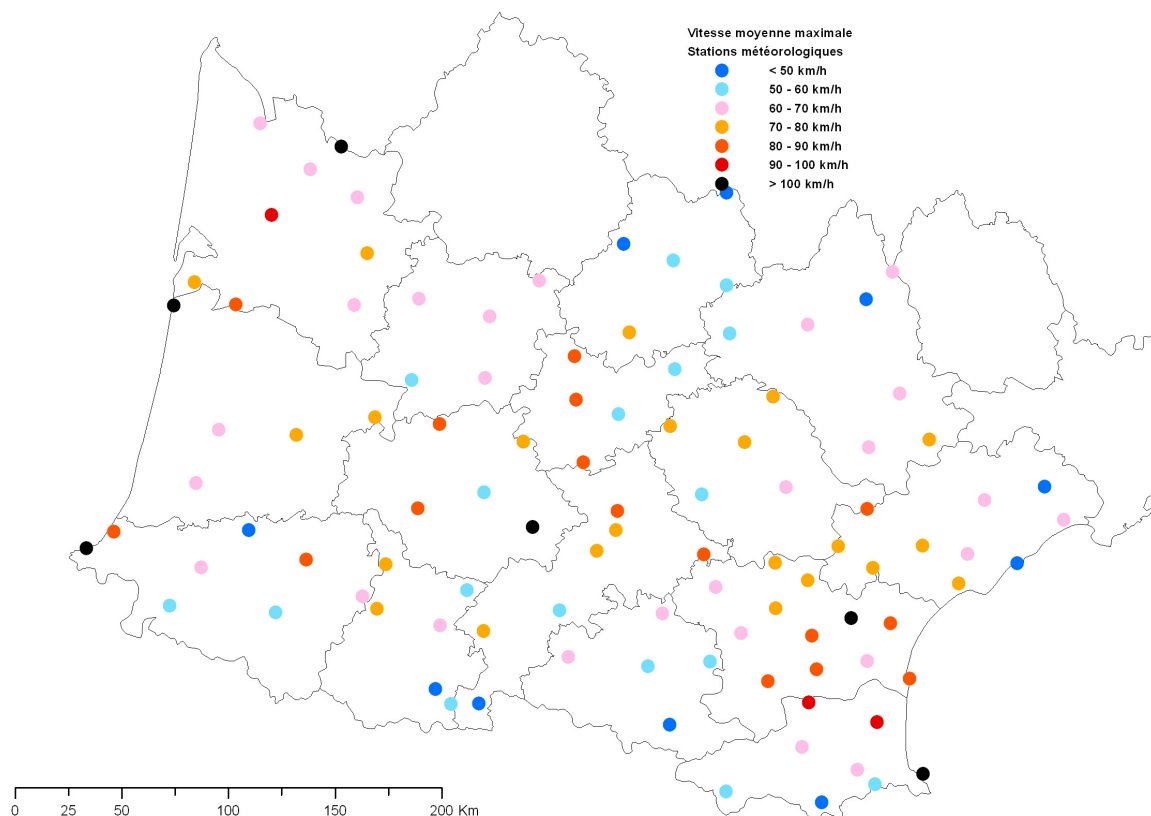


Figure 7 : vitesse moyenne maximale du vent le 24 janvier 2009 mesurée dans les stations météorologiques (sources : Météo France et INRA)



3.3. Données élaborées dans le cadre de l'étude

3.3.1. Dendrométrie

De nombreuses études ont montré que la hauteur des peuplements est un facteur d'instabilité important. Or, il existe différentes hauteurs (hauteurs moyennes, hauteur dominante) et différentes méthodes de calcul à partir des mesures réalisées sur les arbres levés :

- hauteur dominante : hauteur moyenne des cent plus gros arbres à l'hectare (ceux ayant la plus grande circonférence de tronc). Elle n'est pas définie pour les peuplements de moins de cent arbres à l'hectare ;
- hauteurs moyennes :
- Hauteur moyenne arithmétique ;
- Hauteur moyenne de l'arbre de surface terrière moyenne. Sur la courbe circonférence-hauteur, hauteur correspondant à l'arbre de surface terrière moyenne ;
- Hauteur de Lorey : hauteur moyenne de tous les arbres vivants de la placette, pondérée en fonction de leur surface terrière. Cette hauteur de Lorey permet d'éviter de donner trop de poids aux arbres de très faible diamètre (sous-bois) (Pardé et Bouchon, 1988).

La hauteur moyenne du sous-peuplement non dominant a également été calculée ainsi que divers ratios afin de mettre en évidence un éventuel effet de l'étagement de la végétation arborée.

Les hauteurs dominantes et de Lorey du sous-peuplement correspondant à l'essence principale et au pin maritime ont aussi été calculées.

Les calculs réalisés à partir des arbres levés tiennent compte de leur poids statistique qui est lui-même fonction des rayons des sous-placettes de la placette de levé (Figure 2).

D'autres paramètres dendrométriques ont également été déterminés :

- diamètres moyens : diamètre moyen arithmétique, diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne, diamètre moyen de l'arbre dominant ;
- surface terrière totale, surface terrière moyenne, surface terrière de l'arbre dominant ;
- facteurs d'espacement : espacement moyen entre les arbres levés, facteur d'espacement de Hart-Becking ;
- élancement : ratio hauteur/diamètre ;
- coefficients de variation des hauteurs, des diamètres afin de caractériser, là encore, l'étagement de la végétation.

Pour les peuplements de pin maritime enfin, l'indice de fertilité défini par la hauteur dominante atteinte à 40 ans a été retenu. Cette hauteur a été calculée à partir du modèle de croissance de peuplement du pin maritime de Lemoine (Lemoine, 1991).

Le calcul de quelques variables dendrométriques et stationnelles est développé en annexe 10.2.

3.3.2. Données météorologiques

Turbulence du vent

Brunet et al. (2009) ont montré que la turbulence du vent permet également de caractériser l'action du vent sur la végétation. Cette caractéristique permet de connaître l'intensité de la perturbation à laquelle les arbres ont été soumis. Une turbulence élevée signifie que l'arbre a été soumis à des rafales de vent de manière ponctuelle.

Deux indices de turbulence ont été retenus :

- Turbulence 1 : vitesse instantanée maximale/vitesse moyenne maximale

- Turbulence 2 : vitesse instantanée maximale – vitesse moyenne maximale (pour une raison historique, cette différence est, dans ce qui suit, multipliée par 24).

Interpolation spatiale par krigeage

Afin d'obtenir les différentes caractéristiques de vent (vitesses et turbulences) sur les 3217 placettes de levé, les données des stations météorologiques ont été interpolées par la méthode du krigeage. Le krigeage, méthode de statistique spatiale, repose sur l'hypothèse que deux sites proches dans l'espace auront des caractéristiques plus semblables que des sites éloignés entre eux. Le krigeage tient donc compte de la corrélation des variables à courtes distances. La première étape consiste à modéliser cette corrélation en fonction de la distance et, en cas d'anisotropie, de l'orientation. L'interpolation, ou deuxième étape, s'appuie sur le modèle de corrélation (variographie) pour estimer la variable en tout point de l'espace à partir des valeurs observées dans le voisinage (Cressie, 1993 ; Arnaud et al., 2000).

La technique du krigeage a permis d'estimer les vitesses de vent (Figure 8 et Figure 9) et les turbulences sur les placettes IFN. La vitesse instantanée maximale, la vitesse moyenne maximale et les deux indices de turbulence ont donc été estimées pour les 3217 placettes. Chacune des deux vitesses et des deux turbulences ont fait l'objet d'un krigeage spécifique. Malgré la possibilité d'estimer les données de vent en tout point de l'espace de la zone d'étude, il n'en reste pas moins que la précision des résultats reste inféodée à la densité des données de départ. Ainsi, comme le réseau des stations météorologique est assez lâche, il ne permet pas de modéliser la structure spatiale très locale du phénomène (micro-échelle) mais simplement la tendance à méso-échelle.

3.3.3. Caractéristiques du paysage à partir de la cartographie

La notion de « structure du paysage » n'a jamais été prise en compte dans ce type d'étude car elle est difficile à intégrer. Cependant, il est intéressant de connaître l'aspect du paysage en amont de la placette par rapport au vent, afin de savoir si celle-ci est plutôt protégée ou plutôt exposée au vent. Dans le cas de la tempête de 2009, le vent venait de l'Ouest. Une placette ayant une lande, une parcelle agricole ou une coupe rase à l'Ouest était donc plus exposée au vent.

Pratiquement, un transect de 5 km orienté à l'Ouest de chaque placette située dans le Massif des Landes de Gascogne a été construit avec un point tous les 100 mètres, soit 50 points en tout. Cet ensemble de transects a ensuite été croisé avec la cartographie des types de formation végétale et la cartographie des coupes rases réalisées entre 1990 et 2008. La carte des types de peuplement fournit la classe d'âge des peuplements de pin maritime au milieu des années 1990 (moins de 10 ans, de 10 à 40 ans, plus de 40 ans). Trois classes d'âge ont été finalement distinguées en 2009 en intégrant l'information issue de la carte des coupes rases pour les peuplements de pin maritime (moins de 10 ans, de 10 à 17 ans, plus de 17 ans) ; cette information est venue compléter le type de peuplement pour les pinèdes.

En croisant les transects avec ces deux cartes (type de peuplement et coupe rase), une donnée d'étagement sur 5 km à l'Ouest de la placette a été obtenue, donnant une indication sur la structure du paysage (Figure 10). Pour ce faire, une hauteur moyenne et sa variabilité (écart-type) par grand type cartographié ont été déterminées à partir des placettes de levé correspondantes. Les valeurs obtenues sont globalement cohérentes : elles s'échelonnent de 0 m (lande et couverture non forestière, valeur arbitraire) à 23 m pour la « vieille futaie de pin maritime de 17 ans ou plus ». Un profil de hauteur sur le transect de 5 km a ainsi été établi pour chaque placette de levé. La hauteur moyenne de la placette de levé est naturellement celle calculée à partir des mesures sur le terrain et non celle déduite du croisement avec les différentes cartographies.

Figure 8 : vitesse instantanée maximale estimée par krigeage sur l'échantillon de placettes de levé

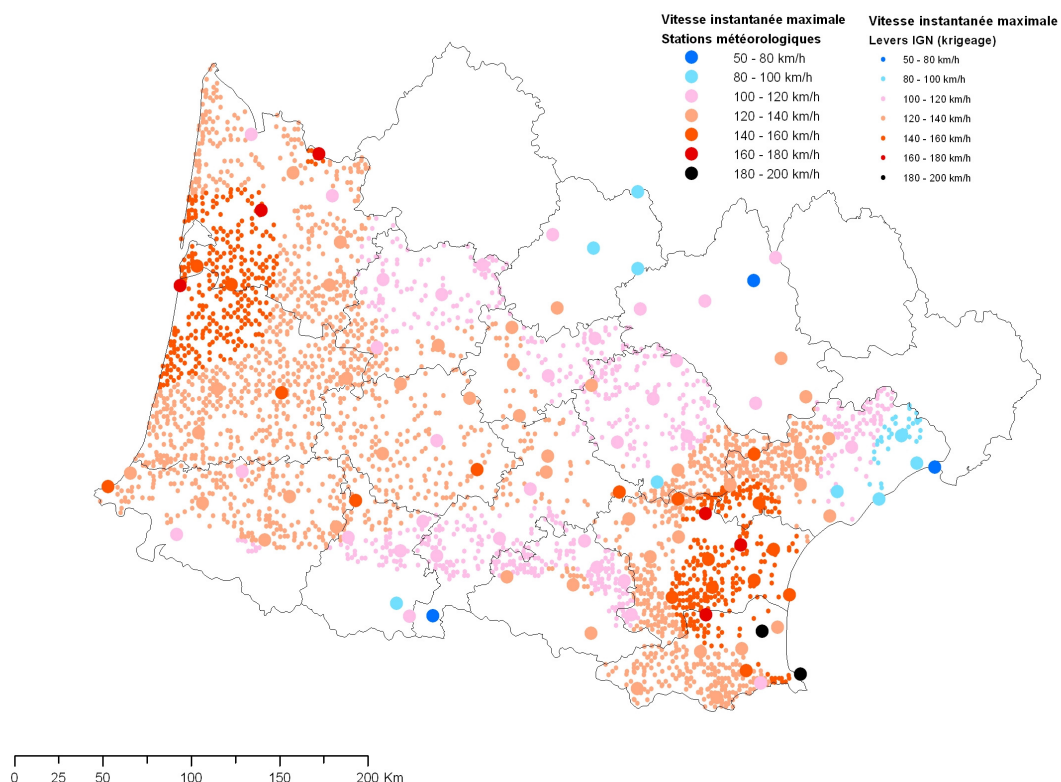


Figure 9 : vitesse moyenne maximale estimée par krigeage sur l'échantillon des placettes de levé

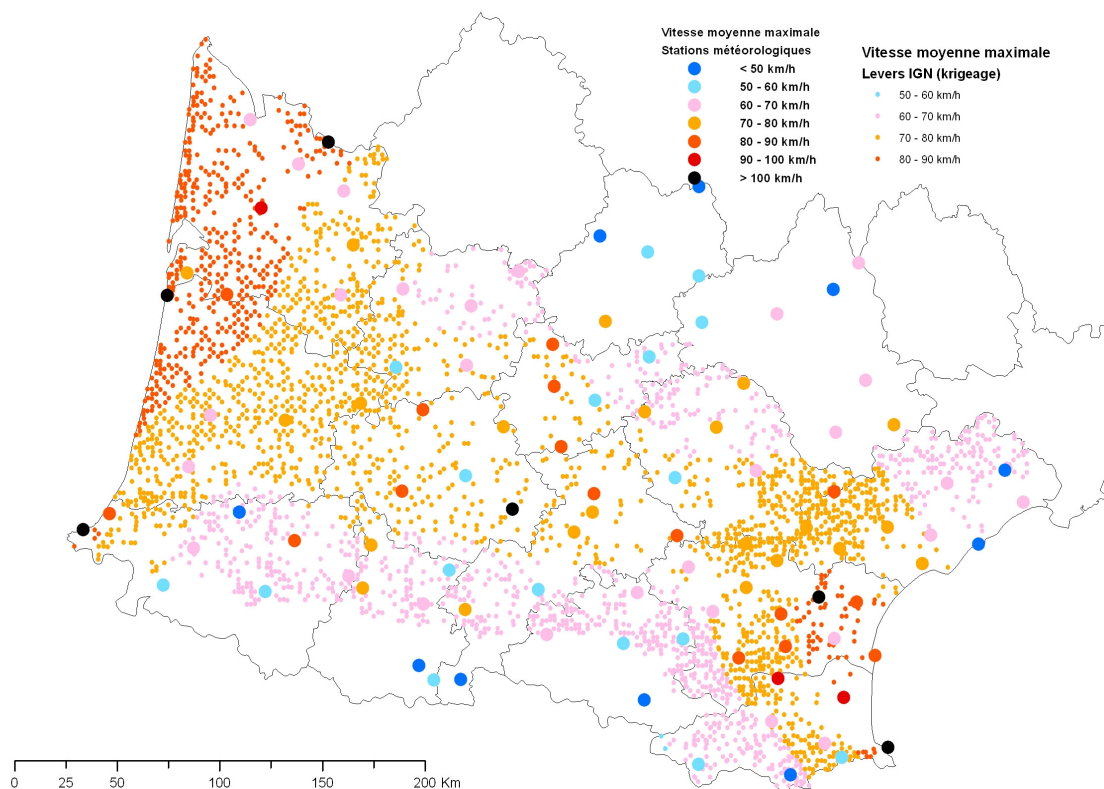
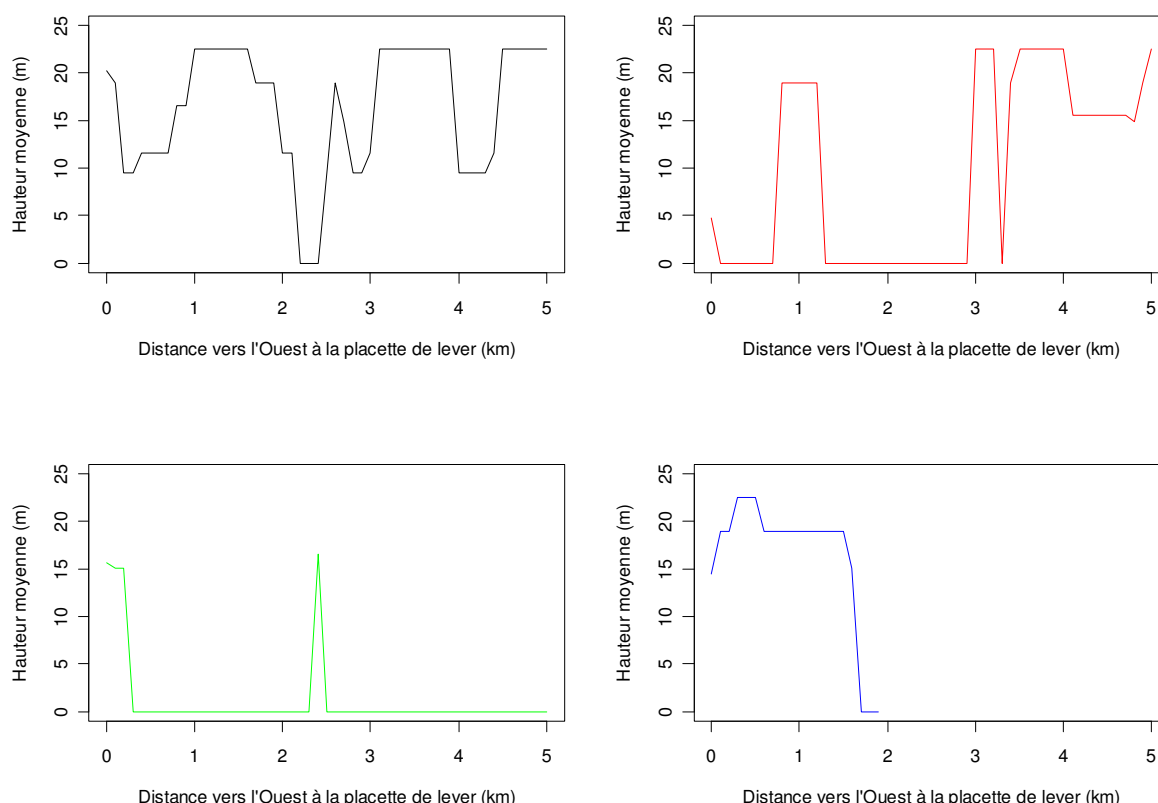


Figure 10 : quatre exemples de profils de hauteurs de différents transects (la placette de levé est au point d'abscisse 0, l'Ouest est à droite)



L'effet d'abri a été caractérisé par une différence entre la moyenne de la hauteur de la couverture à l'ouest et la hauteur moyenne de la placette. Pour ce faire, plusieurs moyennes de la couverture à l'ouest ont été testées : cinq moyennes sur des transects de 1, 2, 3, 4, 5 km, et trois moyennes sur le plus long transect « sans trou » (moyenne arithmétique, moyenne pondérée par l'inverse de la distance à la placette de levé et par l'inverse du carré de la distance à la placette de levé), soit huit indices au total. Il y a un « trou » dès lors qu'il est impossible d'avoir une hauteur estimée sur au moins un des 50 points constituant le transect ; ceci se produit lorsqu'une partie du transect se situe en dehors du domaine cartographié (océan, zone occultée...).

L'effet de rugosité a été caractérisé par l'écart-type des hauteurs à l'ouest, avec ou sans pondération ($1/D$ ou $1/D^2$). Les mêmes transects avec les mêmes pondérations que pour la hauteur moyenne ont été retenus, soit encore huit indices.

Les indices suivants ont également été calculés :

- rapport entre l'écart-type des hauteurs et leur moyenne (« rugosité/abri ») pour les trois paires d'indices du « plus long transect sans trou » ;
- nombre de « marches » ascendantes, descendantes, totales, supérieures à 10 m sur le transect.

Les transects ainsi constitués et les calculs réalisés ne tiennent donc pas compte de l'altitude. Afin de ne pas biaiser l'analyse, les transects ont été arrêtés à la limite de la dune (au sens de la région forestière). A l'inverse, il n'a pas été jugé nécessaire de prendre en compte la topographie sur le plateau landais.

Les placettes de levé ont également été croisées avec la carte des dégâts dans le cadre d'une tentative d'approche dynamique des dommages pour laquelle nous ne connaissons que l'état initial et l'état final, sans avoir d'indication sur les états intermédiaires pendant la tempête.

De manière à prendre en compte l'évolution du paysage au cours de la tempête, deux autres séries d'indices, avec les différentes pondérations retenues, ont ainsi été calculées sur la base des hypothèses suivantes :

- La hauteur de chaque point du transect, excepté la hauteur de la placette de levé qui reste inchangée, est diminuée en proportion du taux de la classe de dégâts (Tableau 2) ;
- La hauteur de chaque point du transect devient nulle si le taux de dégâts cartographiés est supérieur à 60%. La hauteur de la placette de levé reste inchangée (Tableau 2).

Tableau 2 : exemples de hauteurs modifiées pour les deux séries d'indices liés au paysage

Hauteur sur la placette avant tempête Klaus	Classe de dégâts cartographiée	Hauteur modifiée	
		Série 1	Série 2
20 m	40% - 60%	10 m	20 m
20 m	60% - 80%	6 m	0 m

4. Méthodes statistiques

4.1.1. Introduction

Dans le cadre de cette étude, les variables d'intérêt que nous cherchons à expliquer sont : (1) un taux de dégâts compris dans l'intervalle 0% – 100% et (2) une variable binaire comme le taux de dégâts supérieur à un seuil donné. Les hypothèses de la régression linéaire simple ou multiple – variable d'intérêt non bornée, normalité des résidus – ne sont pas adaptées à ces deux types de variables (Saporta, 1990). Aussi, le cadre théorique adapté est celui du modèle linéaire généralisé.

4.1.2. Modèle linéaire généralisé

Un modèle linéaire généralisé permet d'étudier le lien entre une variable d'intérêt Y et des variables explicatives $X_0, X_1, \dots, X_n$ (Venables et al., 2002).

Un modèle linéaire généralisé comprend les éléments suivants :

- la variable de réponse (à expliquer) Y ;
- les variables explicatives $X_0, X_1, \dots, X_n$;
- la fonction de lien g qui caractérise la relation entre une forme linéaire des variables explicatives et l'espérance de Y notée $E(Y)$

$$g[E(Y)] = \sum_i a_i X_i ;$$

- une fonction de variance v et un paramètre de dispersion ϕ tels que :

$$Var(Y) = \phi v[E(Y)].$$

La fonction de lien et la fonction de variance peuvent être choisies indépendamment.

Si l'on choisit comme fonction de variance la fonction constante égale à 1 et comme fonction de lien la fonction identité, on retrouve le modèle linéaire classique.

Certaines fonctions de variance ont une fonction de lien privilégiée. L'association de ces deux fonctions est alors appelée fonction de lien canonique.

4.1.3. Un cas particulier : la régression logistique

Lorsque la fonction de lien est une fonction « logit », le type de modèle linéaire généralisé est alors appelé régression logistique (annexe 10.4) :

$$\text{logit}(p) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right)$$

La régression logistique est une méthode qui généralise la régression à l'étude de variables binaires et de probabilités. Elle est de ce fait très utilisée pour l'étude des dégâts causés par des phénomènes météorologiques (Albrecht et al., 2010 ; Bock et al., 2002 ; Ni Dhubain et al., 2001 ; Piton 2002).

La régression logistique binomiale intervient pour une variable binaire (0 et 1). Le modèle binomial est adapté à une variable du type « taux de dégâts supérieur à un seuil donné ». Dans le cas de la régression logistique binomiale, on a :

$$\text{var}(p) = p(1-p)$$

Le type de modèle choisi pour étudier le taux de dégât continu dans l'intervalle 0% – 100% est un type de régression logistique utilisant la fonction logit, et la famille de quasi-vraisemblance au lieu de la famille binomiale :

$$\text{logit}(p) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right)$$

$$\text{var}(p) = \phi p(1-p)$$

La modélisation a été réalisée avec le logiciel R (Cornillon et al., 2010) en utilisant l'instruction suivante :

```
glm (formula = Taux de dégâts ~ Variables, family = quasi (link = logit,
variance = "mu(1-mu)"))
```

Les arguments de cette fonction sont :

- la famille : quasi (permet d'ajuster le modèle par quasi-vraisemblance) ;
- la fonction de lien : logit ;
- la fonction de variance : $\text{Var}(\mu) = \phi \mu(1-\mu)$.

Les coefficients sont calculés par la méthode des moindres carrés pondérés itérés. ϕ est un indicateur de la variance non expliquée par le modèle ; il est estimé par le modèle. La variance est d'autant plus grande que ϕ est grand.

4.1.4. Choix du modèle

Le Critère d'Information d'Akaike (AIC) permet de comparer deux modèles :

$$\text{AIC} = -2 \log\text{-vraisemblance} + 2p$$

où p est le nombre de paramètres du modèle².

Ce critère AIC est utilisé dans le cadre de la régression logistique d'une variable binomiale³. Toutefois, il est impossible de calculer ce critère dans le cas du modèle de régression

² Pour une variable qualitative, p est le nombre de modalités moins une.

³ La commande *step* sous R utilise ce critère pour déterminer les facteurs significatifs.

logistique avec la famille de quasi-vraisemblance. Dans ce cas particulier, on utilise la déviance :

$$\text{Dev} = -2 (\log\text{-vraisemblance} - \log\text{-vraisemblance du modèle saturé})$$

Dans un modèle, lorsqu'une variable est ajoutée ou retirée, la log-vraisemblance du modèle saturé ne change pas, ce qui permet de comparer directement les déviances en définissant :

$$\text{AICd} = \text{Dev} + 2p$$

Lorsque l'on compare deux modèles, le meilleur sera celui ayant l'AICd le plus faible.

Dans le cas d'une régression linéaire, le coefficient de corrélation R^2 permet d'évaluer la qualité de l'ajustement du modèle. Cela ne s'applique pas aux modèles linéaires généralisés.

Dans cette étude, le rapport de la déviance expliquée à la déviance du modèle nul sera employé :

$$R_L^2 = 1 - \frac{\text{Déviance résiduelle}}{\text{Déviance du modèle nul}}$$

La part de déviance expliquée est d'autant plus grande que R_L^2 est proche de 1.

Dans l'élaboration du modèle, chaque variable explicative a été sélectionnée pas à pas en ajoutant à chaque étape une variable. Les variables retenues sont les variables cohérentes dans le cadre de l'étude, qui apparaissent significatives au seuil de 5 % et font le plus diminuer l'AICd. Il est important de noter que la comparaison de deux modèles doit se faire à échantillon de calibration identique pour ne pas être biaisée. La significativité est vérifiée par le test t, le résultat devant être supérieur à 1,96. Dans le cas de deux variables très corrélées, seule la plus significative est conservée. La sélection du modèle final du taux de dégâts a donc été faite en fonction de la valeur de l'AICd.

5. Analyse statistique

Cette analyse a porté sur toutes les variables, mais on s'attachera surtout à décrire les variables qui sont significatives dans l'analyse quantitative.

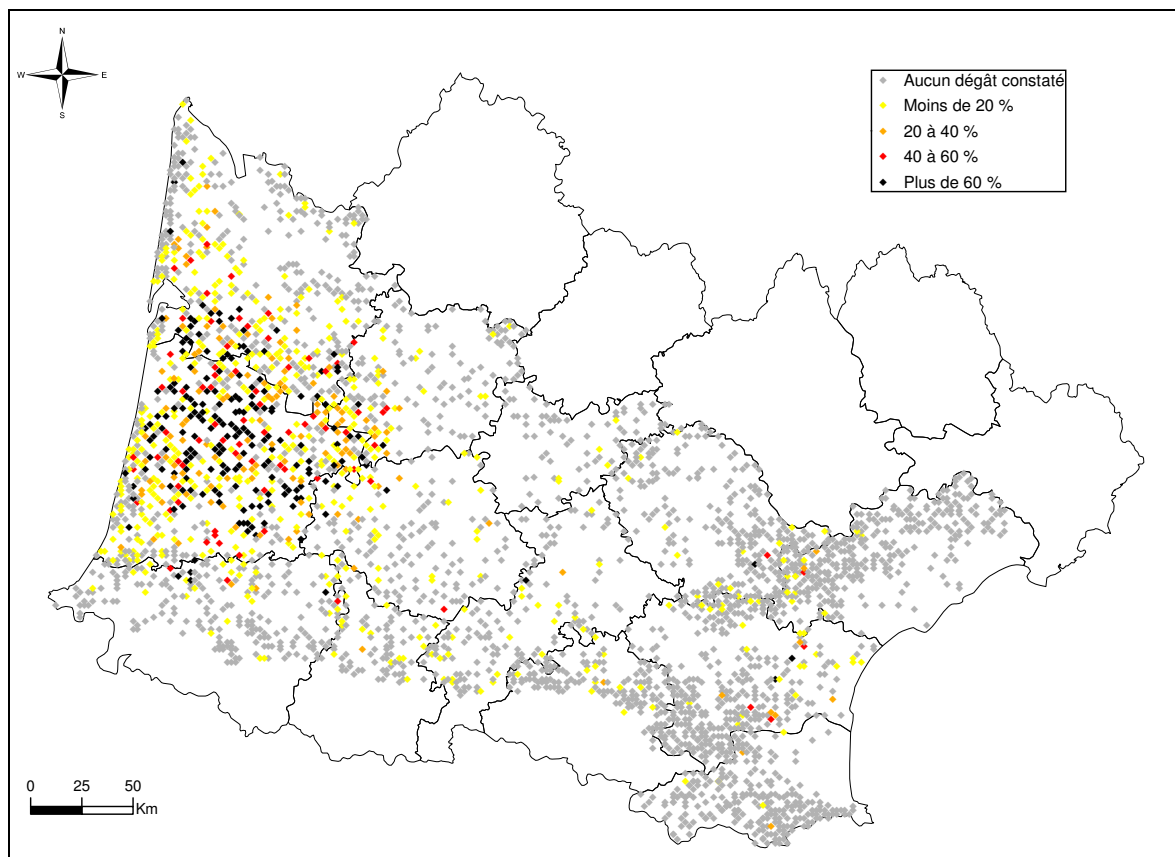
5.1. Analyse qualitative

Une analyse qualitative des classes des taux de dégâts selon les données relatives au vent, à la hauteur dominante, aux caractéristiques de peuplement et de la station (la nomenclature des principales caractéristiques stationnelles est fournie en annexe 10.3), et selon la situation de la placette (lisière, topographie) a été réalisée. L'objectif de cette analyse est double : « visualiser » les données et guider l'analyse statistique.

5.1.1. Ensemble du Sud-Ouest

Dans le Sud-Ouest, les dégâts ont été évalués sur 3217 placettes (Figure 11).

Figure 11 : carte des dégâts en volume bois fort tige de la tempête Klaus calculés grâce aux observations des placettes de levé IGN des campagnes d'inventaire 2005 à 2008



Comme on l'a vu (Figure 8), la distribution de la vitesse du vent instantanée maximale montre que pour la majorité des 3217 placettes cette vitesse est comprise entre 110 et 150 km/h.

En observant le taux de dégâts en volume bois fort tige selon l'essence principale, il ressort clairement que les dégâts ont été beaucoup plus importants pour le pin maritime que pour les autres essences (Figure 12). Pour le sous-échantillon de placettes où l'estimation de la vitesse instantanée maximale est comprise entre 120 et 140 km/h, le chêne pédonculé et le hêtre sont en moyenne plus hauts que le pin maritime, mais ils ont été très peu endommagés. Pour une hauteur dominante moyenne similaire, le taux de dégâts moyen, toutes essences confondues, est deux fois moins important que celui du pin maritime. Les taux de dégâts pour le chêne pédonculé et le hêtre sont également très inférieurs à la moyenne globale (Tableau 3).

On notera par ailleurs les résultats suivants :

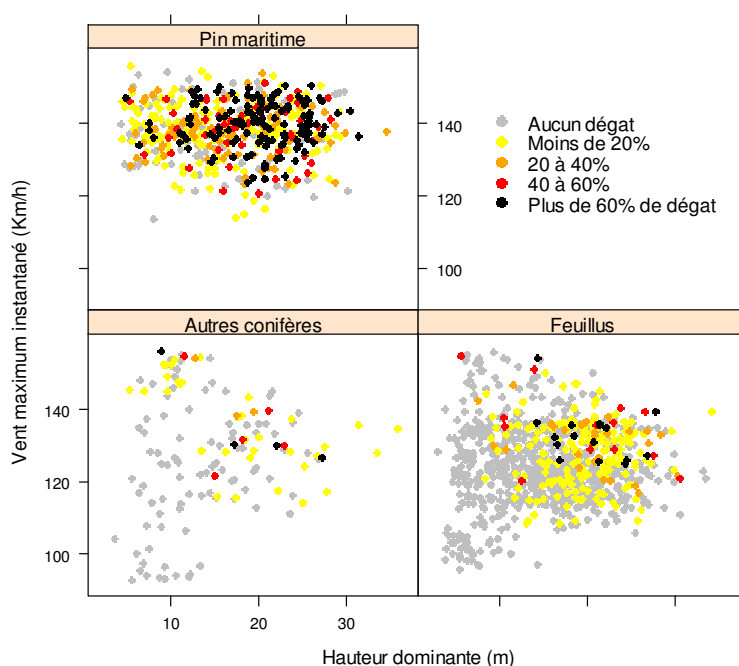
- si les peuplements de pin maritime ont subi beaucoup plus de dégâts que les autres peuplements, ils ont cependant essuyé des vents plus forts (Figure 12) ;
- la diversité des peuplements ne semble pas limiter les dégâts (Figure 13) ;
- lorsque le taux de couvert est plus important, le pin maritime est plus stable. Ceci est cohérent avec le fait que les coupes partielles occasionnent de l'instabilité en augmentant la rugosité du peuplement (Figure 20) ;
- les dégâts sont plus importants sur sols humides : ils augmentent avec les faibles niveaux hydriques bio-indiqués à partir de la flore (qui correspondent en fait à de

forts niveaux hydriques car l'échelle est inversée) et avec l'hydromorphie⁴ (Annexe 10.3).

Cette première analyse qualitative des dégâts confirme la nécessité d'une analyse spécifique pour le pin maritime, distincte de celle des autres résineux et des feuillus. Le pin maritime est globalement localisé en Aquitaine, et plus particulièrement dans le Massif des Landes de Gascogne (Figure 14).

Au niveau des placettes du pin maritime, les rafales de vent ont soufflé majoritairement entre 120 et 150 km/h. A partir d'une hauteur dominante d'environ 12 mètres, un grand nombre de placettes a subi des dégâts supérieurs à 40 % (Figure 12). Pour les autres conifères et les feuillus, les dégâts semblent moins importants.

Figure 12 : taux de dégâts observés selon l'essence principale, la vitesse instantanée maximale et la hauteur dominante suite à la tempête Klaus sur les placettes de levé des campagnes d'inventaire 2005 à 2008



⁴ L'indice d'hydromorphie du sol est déterminé à partir du type de sol (gley, tourbe, stanogley, gley humifère, sol podzolique hydromorphe...), du type d'humus (hydromor, hydromoder, hydromull, tourbe, anmoor), et de la profondeur d'apparition des horizons hydromorphes (pseudogley, gley et taches d'oxydation).

Figure 13 : taux de dégâts observés selon l'essence principale, la pureté du peuplement, la vitesse instantanée maximale et la hauteur dominante suite à la tempête Klaus sur les placettes de levé des campagnes d'inventaire 2005 à 2008

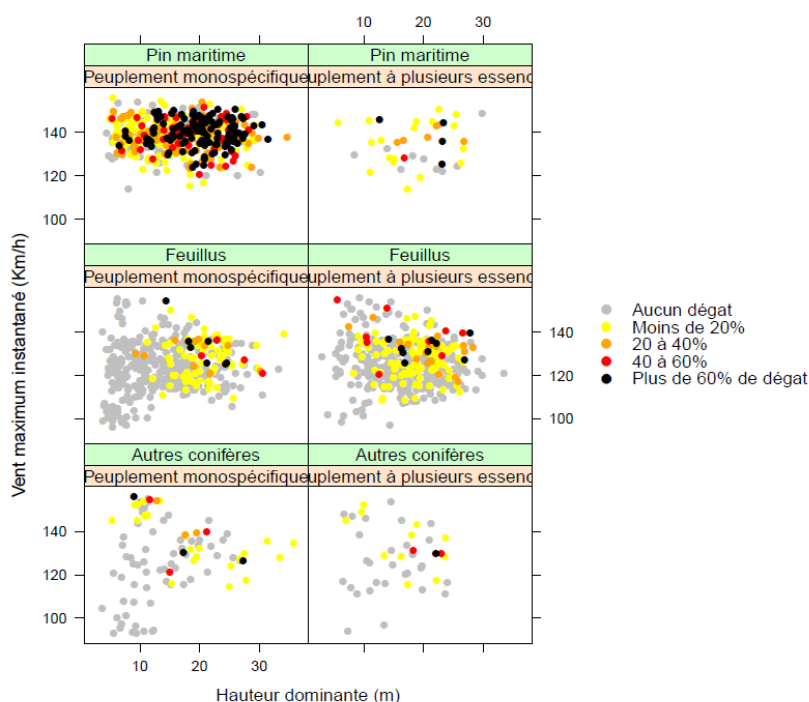
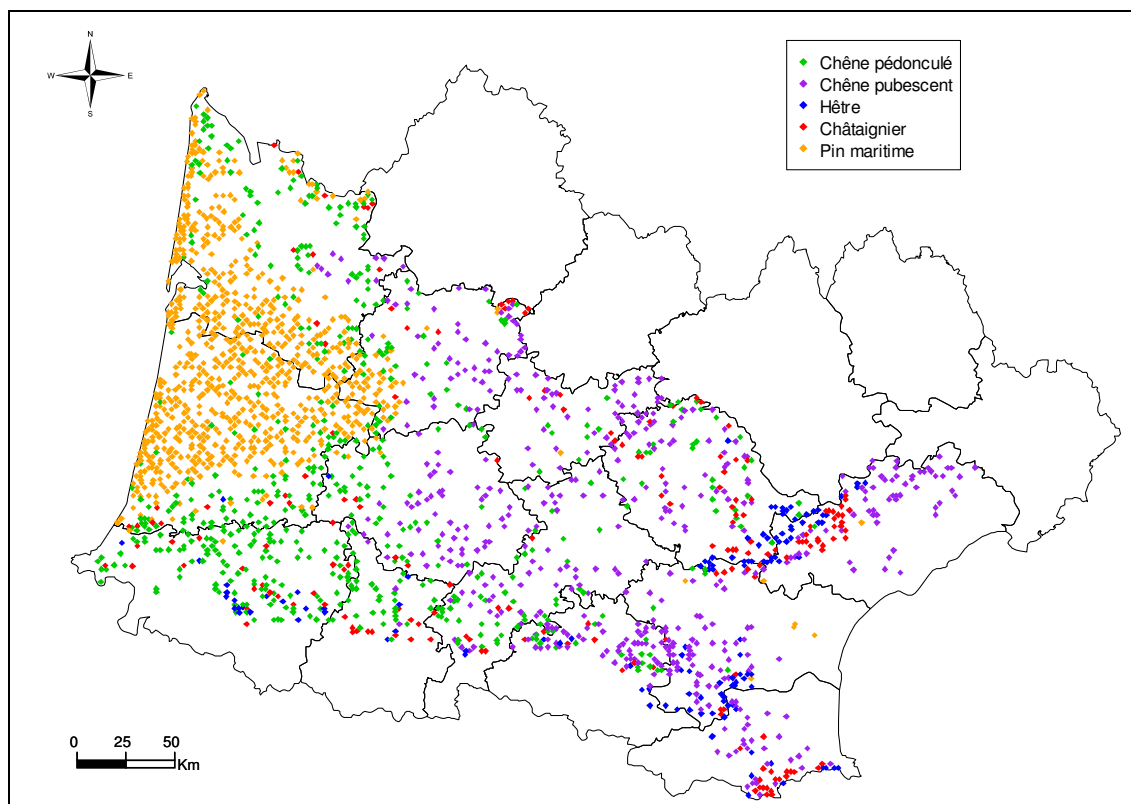


Tableau 3 : quelques données sur les placettes de l'ensemble de la zone de retour IFN après la tempête avec une vitesse instantanée maximale comprise entre 120 et 140 km/h (régions Aquitaine, Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon) selon l'essence principale

Essence principale		Effectif de placettes	Vitesse instantanée maximale (km/h)		Hauteur dominante (m)		Volume à l'ha (m ³ /ha)		Taux de dégâts	
			Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Feuillu	Chêne rouvre ou pédonculé	458	129	5	19,1	5,0	175	109	5%	15%
	Autre chêne	331	129	6	12,3	4,8	99	93	0%	3%
	Hêtre	81	130	6	21,4	6,6	231	192	1%	4%
	Feuillu précieux	76	129	5	19,2	5,0	150	90	2%	8%
	Châtaignier	112	131	5	14,8	4,8	145	101	3%	14%
	Autre feuillu	170	129	5	18,3	5,7	145	115	6%	17%
	Ensemble feuillu	1 228	129	6	16,9	5,9	149	114	3%	12%
Résineux	Indéterminé	2	133	2	8,3		16		0%	0%
	Pin maritime	438	134	5	16,8	6,6	156	121	27%	35%
	Pin sylvestre	30	130	5	11,6	4,5	68	65	0%	2%
	Autre pin	88	129	5	14,9	5,5	190	145	2%	11%
	Sapin-épicéa	82	132	6	20,1	4,3	285	156	2%	10%
	Douglas	37	129	5	22,1	6,6	267	230	4%	15%
	Autre résineux	8	132	4	10,3	3,6	27	30	0%	0%
	Ensemble résineux	685	133	5	17,0	6,6	166	135	18%	31%
Ensemble		1 913	131	6	16,9	6,2	155	123	8%	22%

Figure 14 : répartition des principales essences sur les placettes de levé des campagnes d'inventaire 2005 à 2008 dans le sud-ouest de la France



5.1.2. Peuplements de pin maritime du Massif landais

L'analyse des dégâts du pin maritime a été conduite uniquement pour les placettes qui comportent au moins un pin maritime levé, et en prenant le taux de dégâts spécifique au pin maritime. Ce choix est motivé par la volonté de mieux appréhender un éventuel effet du mélange d'essences. En effet, sélectionner toutes les placettes où le pin maritime est présent permet de prendre en compte les placettes où celui-ci n'est pas l'espèce principale.

Les dégâts les plus importants sont localisés en majorité dans le département des Landes (Figure 16).

Figure 15 : vitesse instantanée maximale (en km/h) interpolée par krigeage ordinaire, lors de la tempête Klaus sur les placettes de pin maritime des campagnes d'inventaire 2005 à 2008

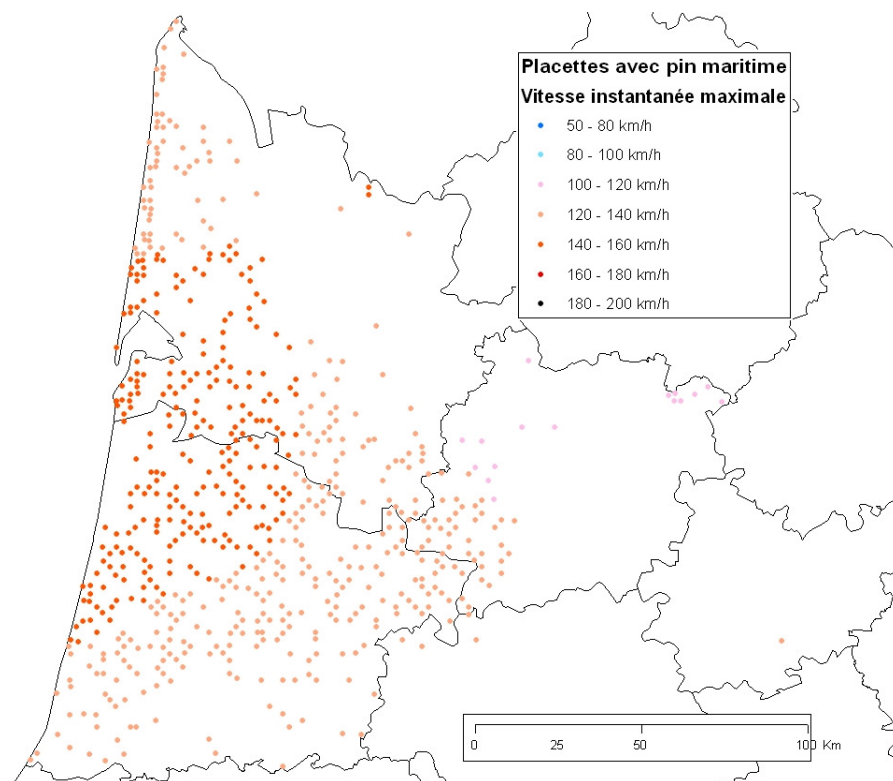
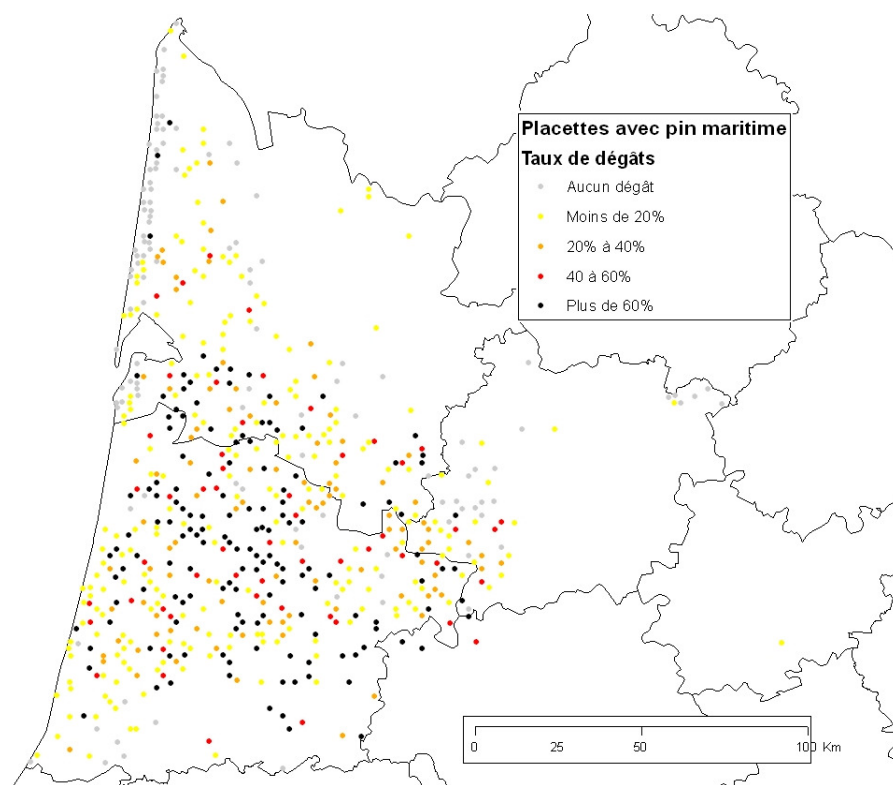


Figure 16 : taux de dégâts suite à la tempête Klaus sur les placettes de pin maritime des campagnes d'inventaire 2005 à 2008



Les principaux points mis en évidence par les analyses qualitatives et statistiques⁵ sont les suivants :

- la transformation des hauteurs selon la fonction logarithme (changement d'échelle), que ce soit la hauteur dominante ou la hauteur de Lorey, permet de mieux faire ressortir les situations avec de forts dégâts (Figure 17 à Figure 24) ;
- les dégâts se concentrent dans le cadran supérieur droit logarithme correspondant aux conditions (hauteur) > 2,5⁶ et turbulence⁷ > 1 400 (Figure 18) ;
- les placettes de la dune (annexe 10.5) se caractérisent par une turbulence plus faible, bien qu'il n'y ait pas de différence en termes de vitesse instantanée maximale entre la dune et les autres régions. Le régime des vents sur la dune est donc différent. Il s'agit là d'une explication de la différence des taux de dégâts entre ce secteur et les autres (Figure 19) ;
- taux de couvert absolu (annexe 10.6) : à hauteur et turbulence égales, les taux de dégâts sont plus élevés pour les taux de couvert absolu moyens (4/10 à 6/10). C'est la raison pour laquelle a été introduite la variable « écart absolu du couvert à 5/10 » (Figure 20) ;
- hydromorphie : la présence d'hydromorphie occasionne plus de dégâts (Figure 21) ;
- niveau hydrique bio-indiqué : l'effet est aussi net que celui de l'hydromorphie même s'il y a plus de dégâts sur les stations à végétation hygrocline (Figure 22) ;
- fertilité : les dégâts augmentent progressivement avec la fertilité (Figure 23) ;
- abri : l'analyse qualitative a porté sur la variable abriK2p2. Cette variable intègre la cartographie des dégâts de la façon suivante : au-delà d'un taux de dégâts de 60%, on considère que la hauteur des peuplements au vent par rapport à la placette de levé est nulle ; en deçà, on considère que la hauteur n'est pas modifiée. Ce traitement ne concerne pas la placette de levé elle-même (Tableau 2). La moyenne des hauteurs des points du transect à l'ouest sont pondérées selon l'inverse du carré de leur distance au point d'inventaire ce qui donne beaucoup de poids aux points les plus proches. Par construction, cette variable n'est pas centrée autour de zéro ; elle est plus souvent négative que positive c'est-à-dire que les peuplements forestiers sont plus souvent exposés qu'abrités. C'est notamment systématiquement le cas pour les peuplements avec une lisière orientée à l'ouest. Il ressort clairement que l'effet d'abri permet de limiter les dommages (Figure 24).

⁵ Les variables citées ici sont les variables sélectionnées lors de l'analyse statistique.

⁶ Soit une hauteur supérieure à 12 m.

⁷ La turbulence dont il est question à partir de maintenant correspond à l'indice 2 c'est-à-dire à la différence entre la vitesse instantanée maximale et la vitesse moyenne maximale.

Figure 17 : taux de dégâts, hauteur dominante et vitesse instantanée maximale

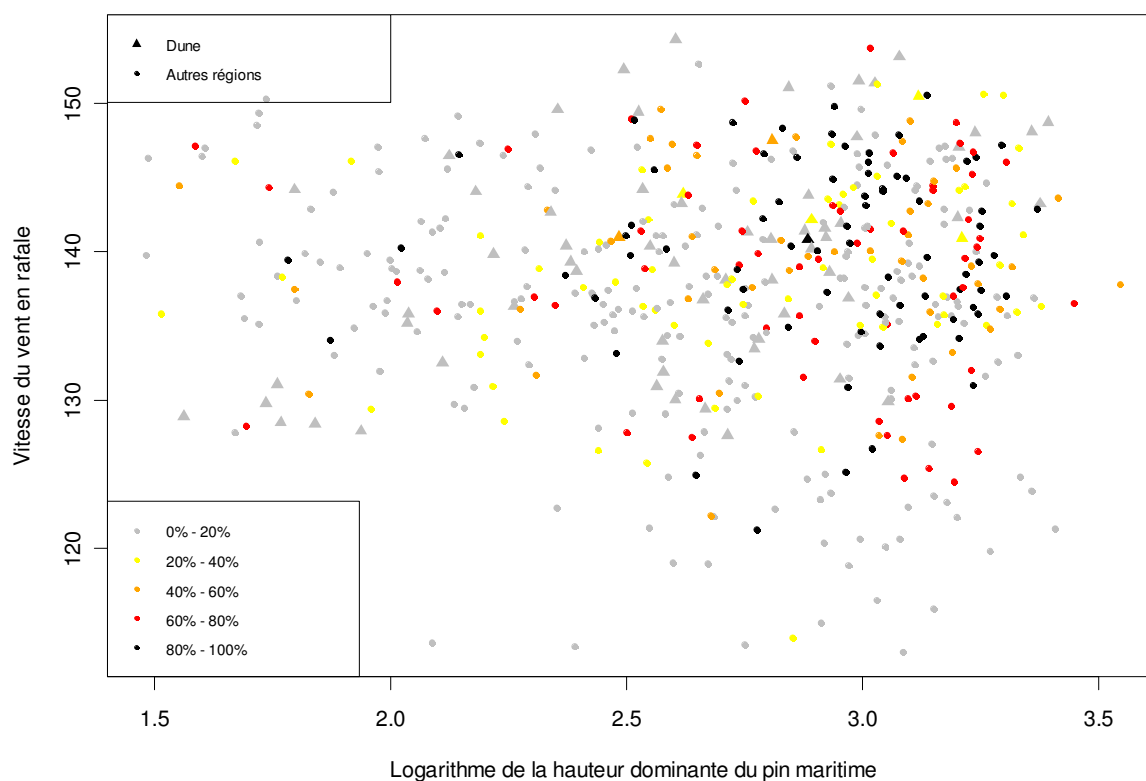


Figure 18 : taux de dégâts, hauteur dominante et turbulence du vent

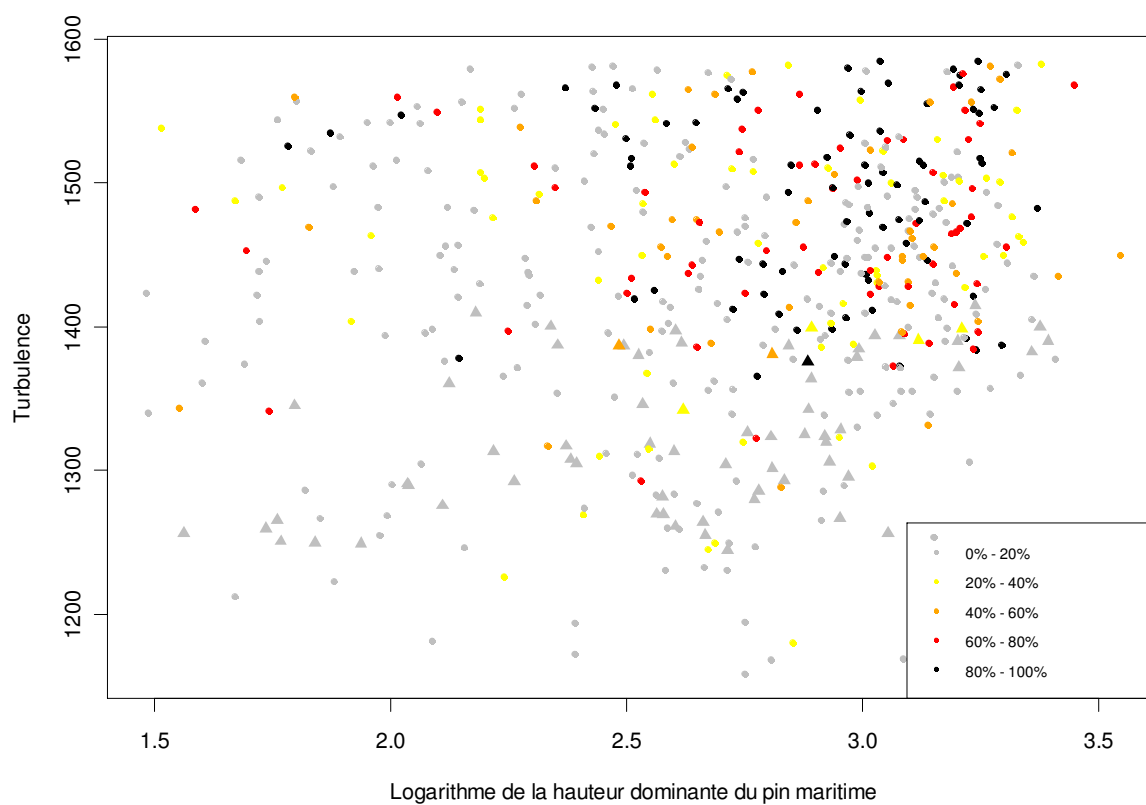


Figure 19 : taux de dégâts, hauteur dominante, turbulence et dune

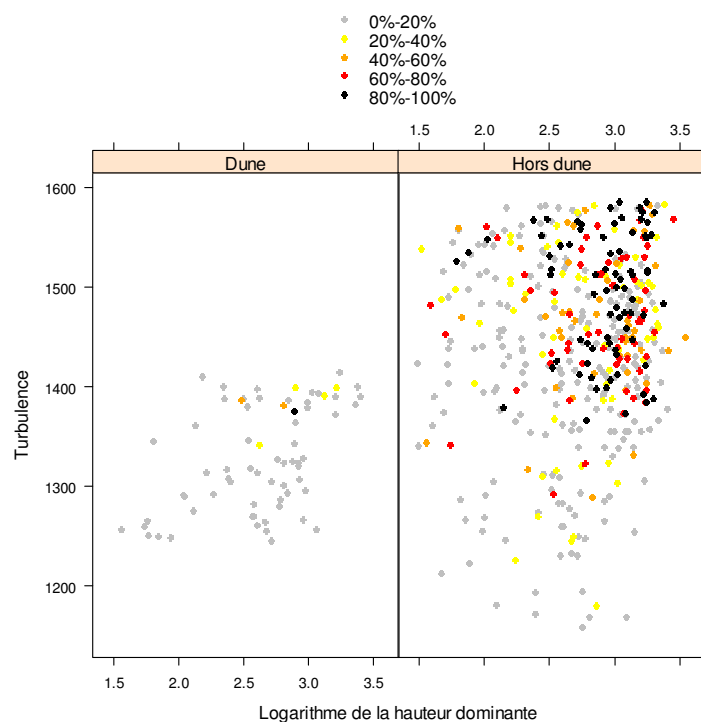


Figure 20 : taux de dégâts, hauteur dominante, turbulence et taux de couvert absolu ($\leq 3/10$: très ouvert ; $4/10$ à $6/10$: couvert intermédiaire ; $\geq 7/10$: fermé)

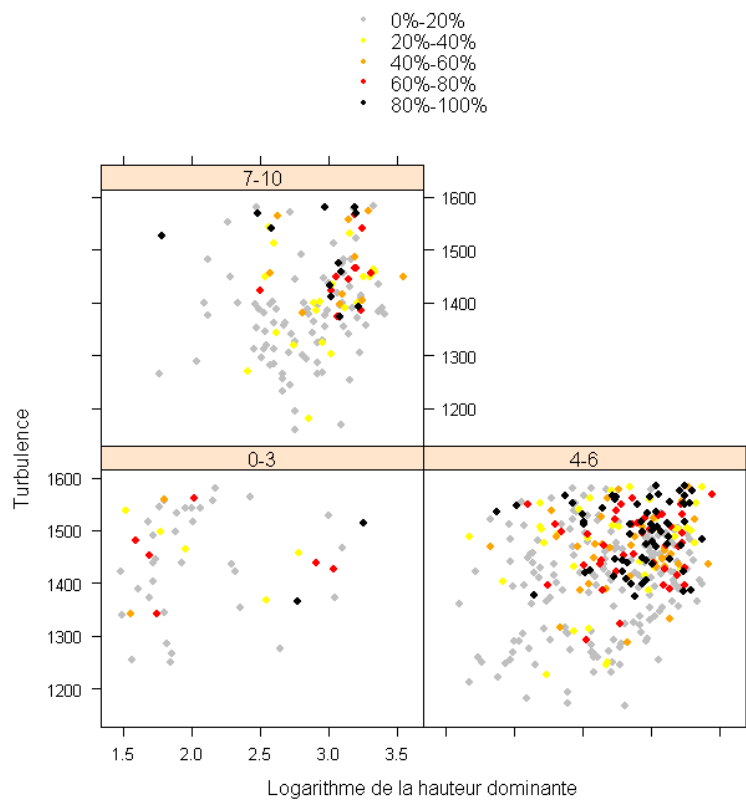


Figure 21 : taux de dégâts, hauteur dominante, turbulence et hydromorphie

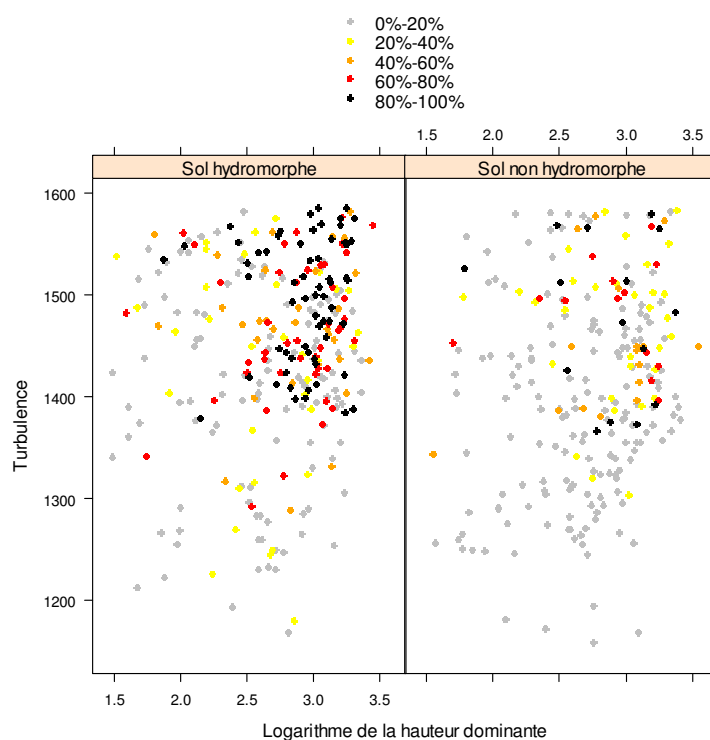


Figure 22 : taux de dégâts, hauteur dominante, turbulence et niveau hydrique bio-indiqué

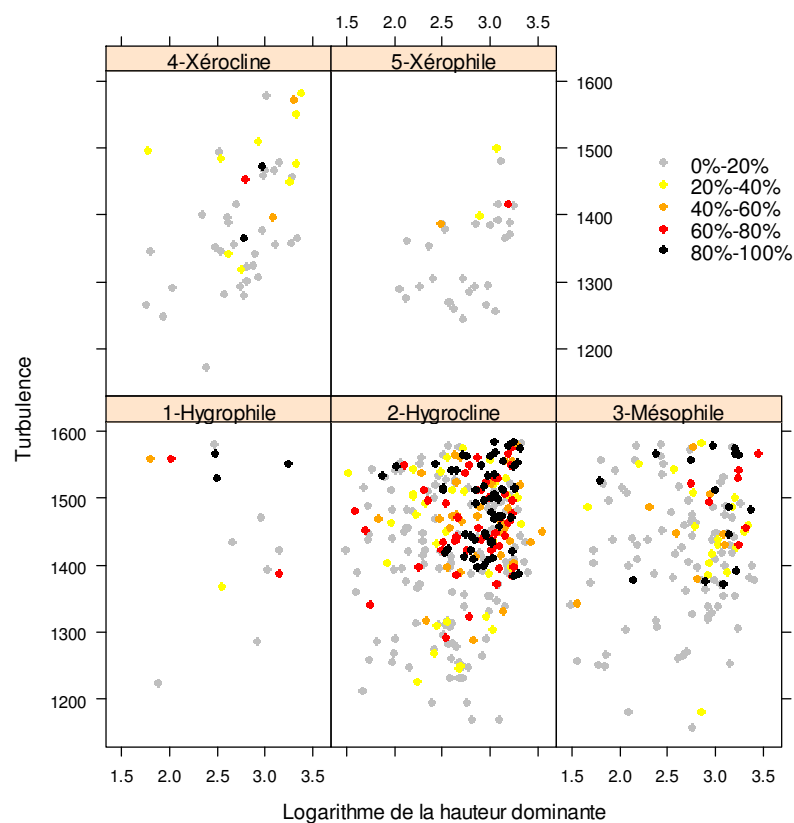
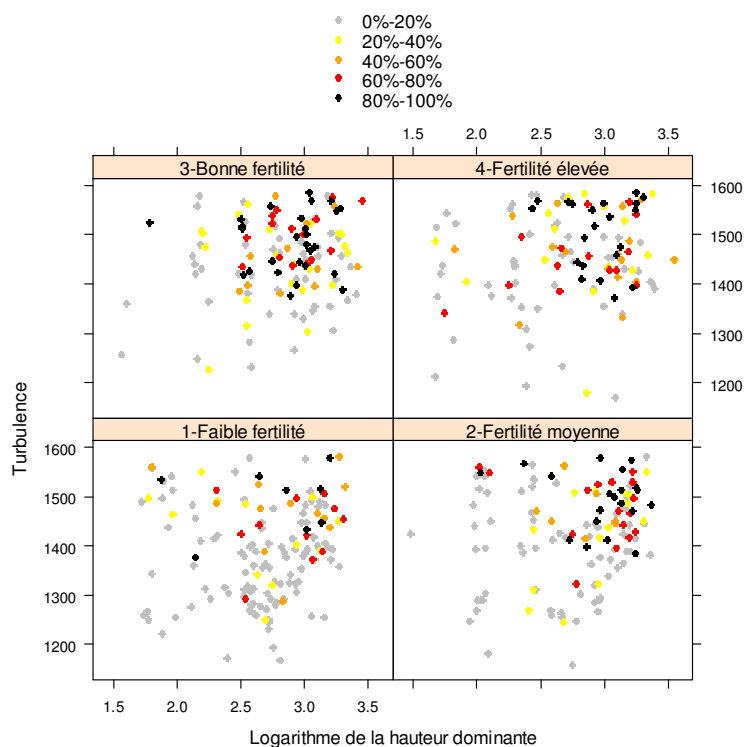
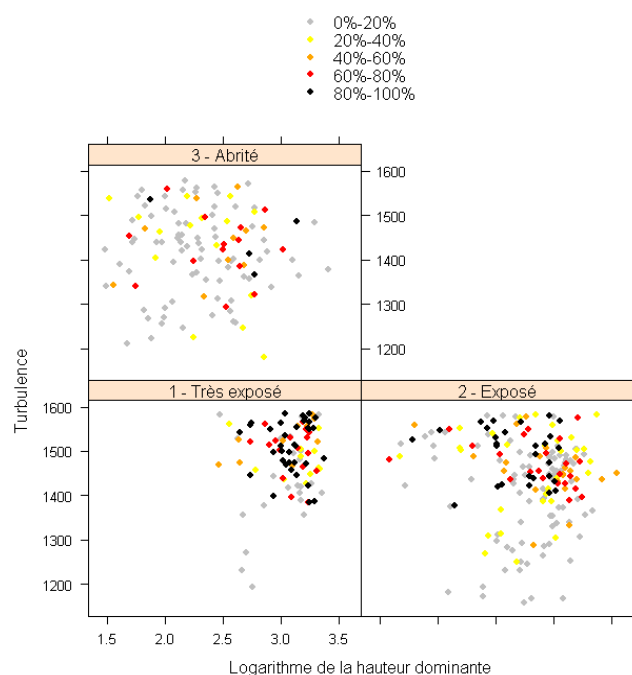


Figure 23 : taux de dégâts, hauteur dominante, turbulence et fertilité (*)



(*) : les classes de fertilité ont été définies à partir de la hauteur dominante à 40 ans. Les seuils ont été fixés de façon à constituer des classes d'effectifs sensiblement égaux : 1 - Faible fertilité : < 20 m ; 2 - Fertilité moyenne : de 20 à 22,5 m ; 3 - Bonne fertilité : de 22,5 m à 25 m ; 4 - Fertilité élevée : > 25 m.

Figure 24 : taux de dégâts, hauteur dominante, turbulence et abri (Abri : 1 - Très exposé : indice < -10 m ; 2 - Exposé : -10 m $<$ indice < 0 m ; 3 - Abrisé : indice > 0 m)



5.2. Prédiction du taux de dégâts de pin maritime

5.2.1. Détermination des facteurs de stabilité

Dans un premier temps, les différentes variables ont été analysées individuellement afin d'étudier un éventuel effet de seuil et une non-linéarité entre le logit du taux de dégâts en fonction de la variable. L'approche consiste à réaliser des modèles simples, avec un seul facteur explicatif du taux de dégât. Lorsque le facteur est une variable quantitative, des classes de même amplitude sont constituées afin d'analyser la linéarité du lien.

De nombreuses variables ressortent comme très significatives, mais cette approche n'est pas définitive car certains facteurs sont significatifs uniquement lorsqu'ils sont intégrés à un modèle à plusieurs facteurs. A l'inverse, d'autres facteurs perdent de leur intérêt lorsque d'autres sont introduits. La corrélation peut en être la cause et sera analysée plus loin.

L'analyse n'a pas permis de mettre en évidence d'éventuels effets de seuil pour les variables quantitatives. Toutes celles-ci seront donc considérées comme des variables continues. Toutefois, dans le cas de la hauteur dominante, la pente du modèle est forte pour les premières classes de hauteur (moins de 15 m) et diminue voire s'annule ensuite. C'est la raison pour laquelle le logarithme de diverses hauteurs a également été testé comme facteur.

Le taux de dégât spécifique au pin maritime a été calculé à partir du rapport entre le volume des pins maritimes avant tempête, et celui estimé après tempête. Ce taux de dégâts est alors une variable continue dans l'intervalle $[0, 1]$. C'est ce taux de dégâts que l'on cherchera à expliquer dans notre modèle de régression logistique.

Les facteurs candidats ont été traités selon un processus itératif et manuel. Ils ont d'abord été traités par domaine (vent, hauteur du peuplement, dendrométrie autre que la hauteur, caractéristiques du peuplement, station, paysage). Après une première sélection opérée par domaine, un nouveau modèle est testé par regroupement des facteurs retenus au cours de ce premier traitement ; il s'ensuit une seconde itération car des facteurs sont alors éliminés en raison de leur corrélation à l'un des facteurs d'un autre groupe. A la fin du traitement, chaque variable a été reconsidérée individuellement pour vérifier qu'elle améliore bien le modèle, ce qui a permis de l'ajuster, en enlevant les facteurs qui ne l'amélioreraient pas de manière significative. Une variable améliore le modèle dès lors que son introduction permet une réduction du critère AICd à échantillon constant. Il y a une amélioration significative dès lors que la diminution de l'AICd est supérieure à 2.

L'analyse de Piton (2002) suite à la tempête Martin avait conclu à une situation spécifique pour les peuplements des dunes, comparativement au plateau landais (très grande stabilité des peuplements des dunes). C'est pourquoi deux modèles ont été testés afin de confirmer ou d'infirmer cette conclusion :

- un modèle en prenant en compte la région forestière de la dune littorale, ce qui représente 641 placettes ;
- un modèle sans prendre en compte la dune littorale soit 425 placettes.

Cette analyse a montré que pour les deux modèles les mêmes variables ont été retenues, avec des valeurs de coefficients non significativement différentes. Les comportements des peuplements des deux régions sont donc comparables vis-à-vis de la tempête au regard des données disponibles pour cette étude ; les niveaux de dégâts différents s'expliquent par les valeurs distinctes des facteurs explicatifs. En fait, les dégâts sont moindres pour les peuplements de la dune littorale car les vents sont nettement moins turbulents même si les rafales de vent y étaient aussi fortes qu'à l'intérieur des terres.

La comparaison entre les placettes de la dune et celles des autres régions n'a pas pu intégrer les facteurs liés au paysage car leur détermination est biaisée pour cette région où

la topographie est importante. L'étude avec les indices liés au paysage s'est donc faite sans la dune. Le modèle de régression logistique s'appuyant uniquement sur les facteurs fortement significatifs est donné dans le Tableau 4.

Tableau 4 : modèle de régression logistique du taux de dégâts en volume du pin maritime, hors dune (modèle établi à partir de 425 placettes.
AICd = 219,88. $R_L^2 = 30,7\%$)

Facteur	Coefficient	Ecart-type	Test t	Proba(> t)
(Intercept)	-12,536	1,682	-7,451	0,0%
Turbulence 2	0,006	0,001	6,353	0,0%
Absence d'hydromorphie	-0,948	0,165	-5,744	0,0%
Indice de fertilité	0,063	0,018	3,430	0,1%
Abri (abriK2p2)	-0,043	0,013	-3,232	0,1%
Ecart absolu du couvert à 5/10	-0,212	0,071	-2,997	0,3%
Logarithme de la hauteur de Lorey du pin maritime	0,696	0,233	2,988	0,3%

Le signe du coefficient indique le sens de variation des dégâts en fonction des variations du facteur considéré, lorsque les autres variables sont constantes. Ainsi, le taux de dégâts augmente avec la turbulence du vent, la fertilité de la station et la hauteur du peuplement et il diminue avec l'abri, l'absence d'hydromorphie et le taux de couvert. Les peuplements très fermés ou très ouverts présentent généralement des taux de dégâts moins importants.

L'indice d'abri permet d'expliquer les dégâts dès lors qu'il intègre l'information portée par la carte des dégâts pour le transect au vent. Le paysage a probablement été trop chamboulé au cours de la tempête et de ce fait les indices d'abri calculés avant tempête sont insuffisamment explicatifs. L'importance de l'effet d'abri est d'autant plus forte que :

- l'effet de la tempête est de type « tout ou rien » (utilisation du seuil de 60% pour calculer les hauteurs du transect) ;
- le poids des placettes proches est plus important (pondération par l'inverse du carré de la distance au point d'inventaire). Le premier kilomètre compte alors pratiquement pour 90% de la moyenne et les 5 premiers hectomètres pour presque 75%. Ce seraient donc vraiment les peuplements proches qui importeraient pour cet effet.

La turbulence apporte une information supplémentaire, qui permet de mieux appréhender le phénomène météorologique. L'indice de turbulence 2 (différence entre les deux vitesses) est plus significatif que l'indice 1 (rapport entre les deux vitesses).

Deux variables stationnelles sont importantes pour expliquer les dégâts : les dégâts sont plus importants sur sol hydromorphe que sur sol non hydromorphe ; un indice de fertilité fort accroît le taux de dégâts.

Trois facteurs permettent d'améliorer le modèle mais de façon moins importante (diminution d'AICd inférieure à 2). Ce sont :

- la vitesse moyenne maximale du vent. Dans le modèle où toutes les placettes sont prises en compte, cette variable est significative. La prise en compte de l'effet d'abri dans le modèle diminue fortement l'importance de cette variable ;
- le volume sur pied à l'hectare : le taux de dégâts diminue lorsque le capital sur pied augmente. Ce facteur est en partie redondant avec le taux de couvert absolu du peuplement (pas de variation du volume pour des valeurs de taux de couvert compris entre 5 à 10) ;
- le niveau hydrique bio-indiqué par la flore : les dégâts sont plus importants sur les stations à végétation hygrocline. Cette information est corrélée à l'hydromorphie mais elle n'est pas totalement redondante (cf. 5.4 Corrélation entre facteurs).

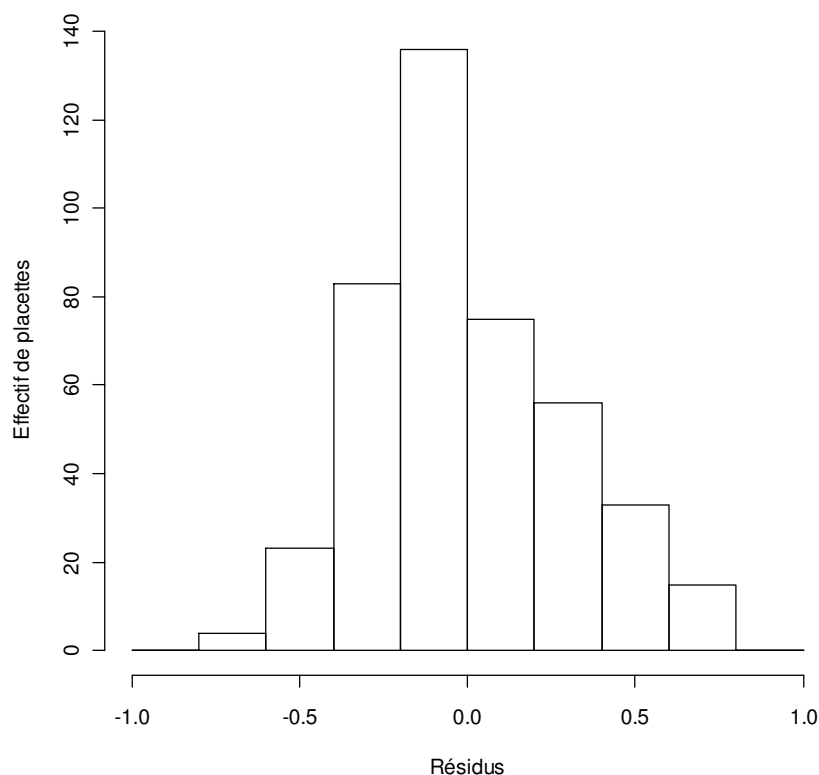
Au final, la part de déviance expliquée n'est pas très élevée avec un $R_L^2 = 31\%$ (34% en prenant également les facteurs moins significatifs). En revanche, les six variables principales ont toutes un effet très significatif.

Après avoir déterminé les facteurs de stabilité statistiquement significatifs, les interactions deux à deux entre ceux-ci ont été testées. Aucune interaction entre les facteurs statistiquement significatifs ne permet d'améliorer le modèle.

5.2.2. Précision du modèle

La grande majorité des résidus se situe dans l'intervalle $[-0,4 ; +0,4]$. L'analyse des résidus indique que le modèle surestime légèrement les dégâts dans nombre de cas (Figure 25). Il s'agit en fait des placettes où les dégâts sont nuls, et où le modèle prédit de légers dégâts par construction. En effet, les cartes des dégâts observés et des dégâts prédits par le modèle montrent que le modèle prédit peu les cas extrêmes. Par définition, le modèle logistique ne prédira jamais 0 % ou 100 % de dégâts.

Figure 25 : résidus du modèle « Taux de dégâts observé - Taux de dégâts modélisé »



Une limite du modèle construit est donc son incapacité à prédire valablement les très forts dégâts. La classe de dégâts 80% - 100% notamment est sous-représentée dans le modèle (Figure 26 et Figure 27). Une autre façon de caractériser la précision du modèle est de comparer les classes des taux de dégâts observés et modélisés ; cinq classes d'une amplitude prise égale à 20% ont été définies (Tableau 5 et Figure 28). Le modèle est d'autant plus précis que les effectifs se concentrent sur la diagonale sud-ouest / nord-est et se raréfient d'autant plus vite qu'on s'éloigne de celle-ci. Or cette diagonale est incurvée vers le bas pour les classes de dégâts les plus élevées confirmant leur sous-estimation par le modèle (Figure 28). Plus précisément, cette table de contingence montre que :

- les cellules aux extrêmes nord-ouest et sud-est de la table sont peu représentées. Le modèle se trompe ainsi rarement de trois ou quatre classes de dégâts ;

- la classe modale selon le modèle des trois premières classes de dégâts – dégâts inférieurs à 60% – correspond bien à la classe des observations ;
- la classe modale selon le modèle des deux dernières classes de dégâts – dégâts supérieurs à 60% – est décalée d'une classe vers le bas (sous-estimation des forts dégâts).

Les facteurs identifiés jusqu'à présent sont, sans conteste, des facteurs qui ont un rôle sur la stabilité des peuplements de pin maritime. Toutefois, certains facteurs doivent encore échapper à l'analyse et l'on peut s'interroger sur la qualité de l'estimation de certaines variables.

Figure 26 : taux de dégâts du pin maritime observés

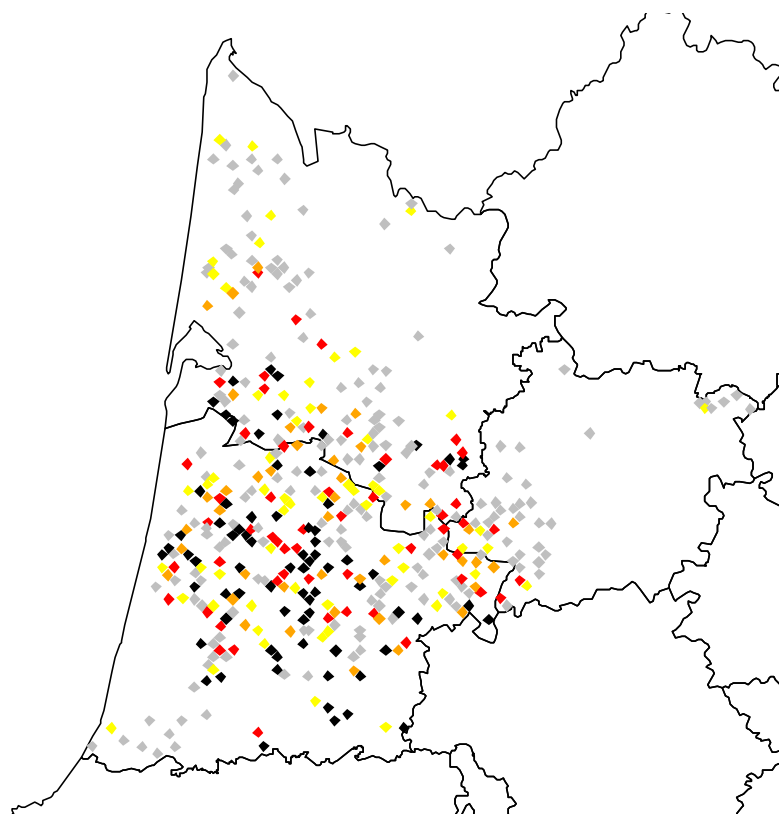


Figure 27 : taux de dégâts du pin maritime modélisés

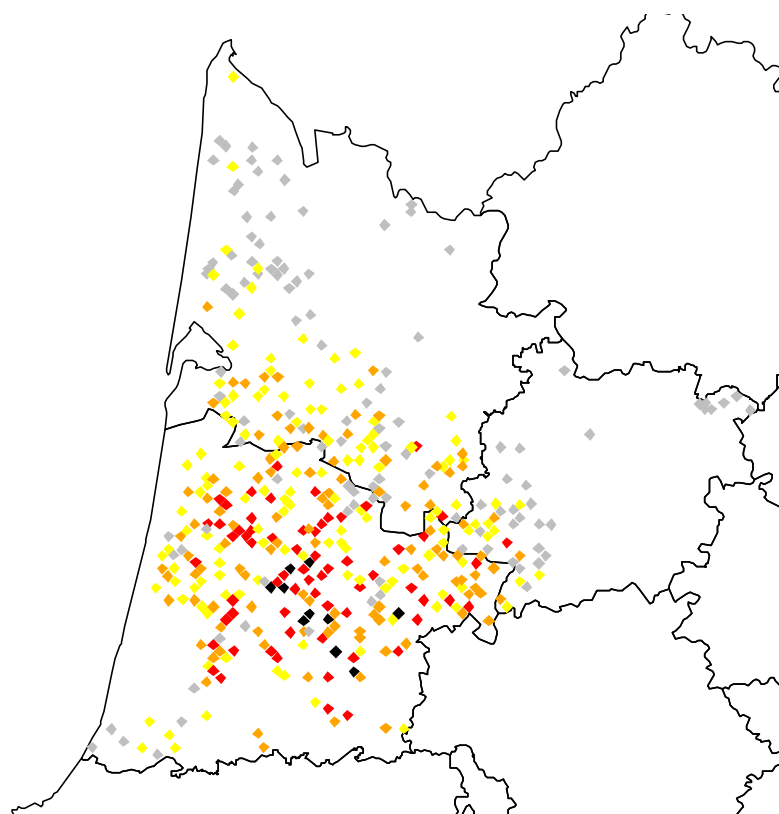
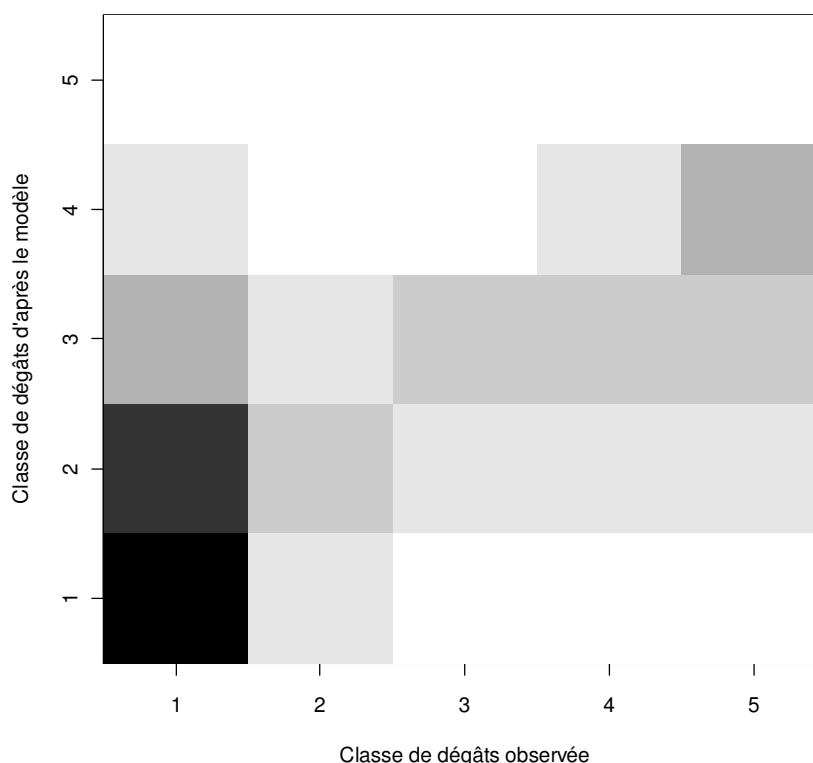


Tableau 5 : table de contingence des classes des taux de dégâts observés et déduites du modèle

		Classe du taux de dégâts modélisé					Total
		0%-20%	20%-40%	40%-60%	60%-80%	80%-100%	
Classe du taux de dégâts observé	0%-20%	89	66	26	11	0	192
	20%-40%	16	23	15	6	0	60
	40%-60%	4	9	22	6	2	43
	60%-80%	4	15	21	14	1	55
	80%-100%	0	16	24	28	7	75
	Total	113	129	108	65	10	

Figure 28 : table de contingence des classes des taux de dégâts observés et déduites du modèle (1 : 0%-20% ; 2 : 20%-40% ; 3 : 40%-60% ; 4 : 60%-80% ; 5 : 80%-100%)



5.3. Prédiction des dégâts majeurs de pin maritime

L'analyse des résidus du modèle logistique du taux de dégâts a montré que les classes de faibles dégâts étaient assez bien estimées alors que les classes de forts dégâts étaient généralement sous-estimées d'une classe. Si l'on réduit la dimension de cette table à deux classes en regroupant les deux premières d'une part (dégâts inférieurs à 40%) et les trois dernières d'autre part (dégâts supérieurs à 40%), on obtient un taux de bon classement intéressant. Suite à ce constat, l'analyse statistique s'est poursuivie en considérant la variable binomiale suivante (variable liée à la placette) :

Taux de dégâts > seuil

La variable observée sur les placettes est alors une variable binaire ; en conséquence, le modèle utilisé est la régression logistique binomiale.

Différents seuils ont été testés, de 0 à 100% par pas de 10%. Le seuil de 0% correspond à la variable binaire « présence de dégâts » tandis que le seuil de 100% correspond à la variable « peuplement complètement détruit ».

L'analyse statistique a porté uniquement sur les facteurs significatifs du modèle linéaire généralisé du taux de dégâts (§ 5.2). Un premier traitement a porté sur les seules variables fortement significatives. Dans un deuxième modèle, on a introduit les variables moins significatives pour étudier leur apport au modèle.

Le seuil qui permet le mieux de discriminer deux groupes se situe entre 40% et 50%. Le seuil de 45% a été testé mais il n'améliore pas véritablement les résultats. Le seuil de 40% a donc été retenu en conformité avec l'analyse précédente. Ce seuil présente en outre l'intérêt d'être largement utilisé par l'administration forestière.

Tous les facteurs s'avérant fortement significatifs dans le cadre de la modélisation du taux de dégâts le sont également dans le cadre de la variable binomiale retenue lorsqu'on ne considère pas les trois facteurs les moins significatifs. Les facteurs agissent naturellement dans le même sens dans les deux modèles.

Les trois facteurs les moins significatifs dans le premier modèle – niveau hydrique bio-indiqué, volume à l'hectare et vitesse moyenne maximale – améliorent également le modèle de régression logistique binomiale, mais réduisent très fortement la significativité d'autres facteurs (indice de fertilité et facteur d'abri en particulier). Une analyse descendante⁸ réalisée à partir des neufs facteurs écarte deux facteurs dans l'ordre suivant : volume à l'hectare puis facteur d'abri. Le modèle finalement retenu s'appuie donc sur les facteurs fortement significatifs du modèle du taux de dégâts, à l'exception donc du facteur d'abri, complété par le niveau hydrique bio-indiqué et la vitesse moyenne maximale (Tableau 6).

Tableau 6 : modèle de régression logistique binomiale « taux de dégâts > 40% » (modèle établi à partir de 485 placettes, AIC = 498,1)

Facteur	Coefficient	Ecart-type	Test t	Proba (> z)
(Intercept)	-29,833	4,459	-6,69	0,0%
Turbulence 2	0,012	0,002	6,61	0,0%
Logarithme de la hauteur de Lorey du pin maritime	1,880	0,296	6,35	0,0%
Niveau hydrique bio-indiqué	-0,381	0,110	-3,45	0,1%
Vitesse moyenne maximale du vent	0,099	0,029	3,37	0,1%
Absence d'hydromorphie	-0,913	0,287	-3,18	0,1%
Indice de fertilité	0,077	0,028	2,75	0,6%
Ecart absolu du couvert à 5/10	-0,287	0,114	-2,52	1,2%

L'introduction du niveau hydrique bio-indiqué et de la vitesse moyenne maximale du vent dans le modèle de régression logistique binomiale diminue la significativité du facteur défini à partir du taux de couvert absolu et de l'indice de fertilité comparativement au modèle du taux de dégâts.

Les deux sous-populations de placettes définies par le seuil de 40% sont relativement bien distinguées par ce modèle (Figure 29). En effet, les boîtes à moustaches ('boxplot') représentent la médiane et les quartiles d'une variable quantitative selon différentes classes. On observe donc immédiatement qu'il y a recouvrement des probabilités prédites pour environ un quart des placettes, que ce soit pour les faibles dégâts (< 40%) ou les forts dégâts (> 40 %) observés. Pour apprécier plus avant la précision du modèle, on peut attribuer une

⁸ Utilisation de la fonction *step* sous R.

classe de dégât à chaque placette à partir de l'estimation de la probabilité d'appartenir à la classe « Taux de dégâts > 40% ». Le seuil le plus naturel est celui de 50% bien sûr (Tableau 7). La table de contingence « observations » vs. « prédictions » a été construite avec le modèle (Tableau 6). Comme pour le modèle du taux de dégâts, la régression logistique binomiale a tendance à sous-estimer les dégâts.

Figure 29 : régression logistique de la variable binaire « taux de dégâts > 40% ». Distribution de la probabilité modélisée selon les deux classes observées

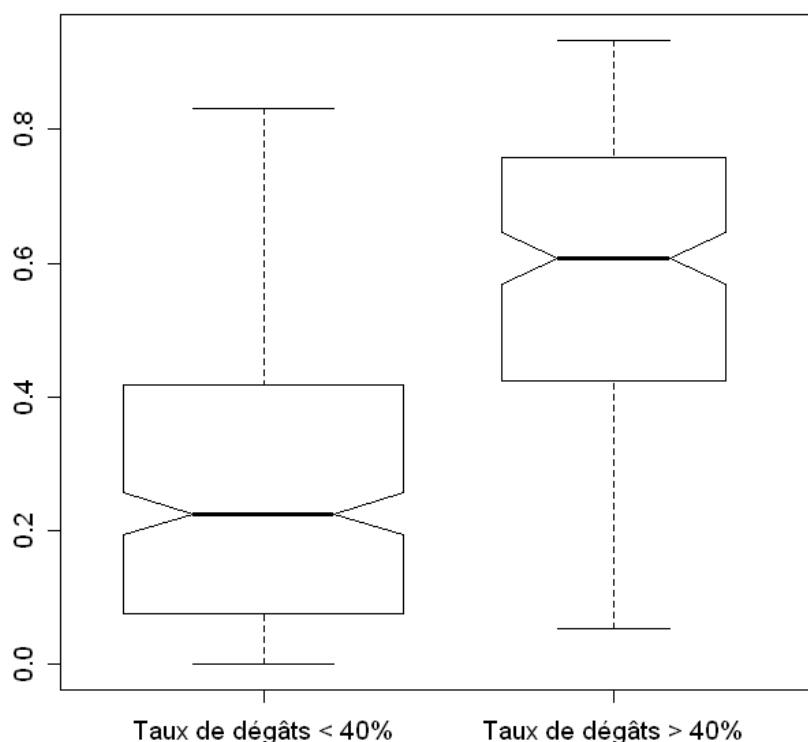


Tableau 7 : classes de dégâts observées et prédites par les modèles de régression binomiale de la variable binaire « taux de dégâts > 40% » et taux de bon classement

Effectif de placettes		Modèle		
		Dégâts < 40%	Dégâts > 40%	Total
Observations	Dégâts < 40%	239	56	295
	Dégâts > 40%	66	124	190
	Total	305	180	485
Taux de classement		Dégâts < 40%	Dégâts > 40%	Total
Observations	Dégâts < 40%	81%	19%	100%
	Dégâts > 40%	35%	65%	100%
	Total			75%

Les Figure 30 et Figure 31 représentent la distribution spatiale des variables binaires observée et modélisée ; le modèle reconstitue bien la structure spatiale des dégâts dans l'ensemble du Massif. Les noyaux de dégâts sont notamment bien reconstitués.

La probabilité que le taux de dégâts soit supérieur au seuil se calcule en inversant la fonction de lien logit :

$$p = \frac{\exp\left(\sum_i a_i X_i\right)}{1 + \exp\left(\sum_i a_i X_i\right)}$$

Les paramètres a_i sont ceux estimés par le modèle (Tableau 6) et le vecteur des facteurs X_i est celui observé sur la placette (l'ordonnée à l'origine correspond à la variable $X_0 = 1$).

Le Tableau 8 fournit l'estimation de la probabilité que le taux de dégâts soit supérieur à 40% pour un certain nombre de situations caractéristiques à partir du modèle du Tableau 6.

Tableau 8 : estimation de la probabilité d'un taux de dégâts supérieur à 40% pour certaines situations caractéristiques

Hauteur de Lorey (m)	Taux de couvert absolu	Hydromorphie (*)	Indice de fertilité (m)	Turbulence 2 (km/h)					
				1300		1400		1500	
				Vitesse moyenne maximale (km/h)					
				75	80	75	80	75	80
15	9/10	Non	20	1%	1%	2%	3%	6%	9%
			25	1%	1%	3%	5%	9%	13%
		Oui	20	5%	7%	14%	20%	33%	45%
			25	7%	11%	19%	27%	42%	55%
	6/10	Non	20	1%	2%	5%	7%	13%	20%
			25	2%	3%	6%	10%	18%	27%
		Oui	20	10%	16%	27%	38%	54%	66%
			25	15%	22%	35%	47%	63%	74%
25	9/10	Non	20	2%	3%	5%	8%	14%	21%
			25	2%	4%	7%	11%	20%	29%
		Oui	20	11%	17%	29%	40%	57%	68%
			25	16%	24%	37%	50%	66%	76%
	6/10	Non	20	4%	6%	11%	17%	28%	39%
			25	5%	9%	15%	23%	37%	49%
		Oui	20	23%	33%	49%	61%	76%	83%
			25	31%	42%	59%	70%	82%	88%

(*) : pour les stations hydromorphes, on a considéré un niveau hydrique bioindiqué correspondant à une flore de station humide, pour les stations non hydromorphes à une flore mésophile sèche. Du fait du lien entre ces deux facteurs, certaines combinaisons sont pratiquement impossibles (sol hydromorphe et flore mésophile sèche par exemple).

Figure 30 : variable binomiale « taux de dégâts > 40% » observée

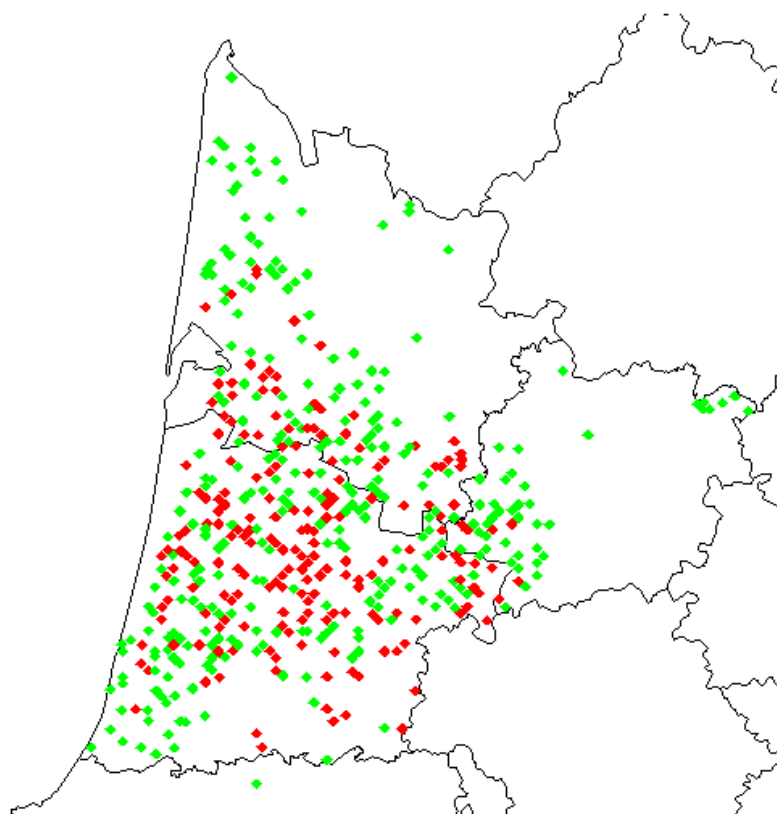
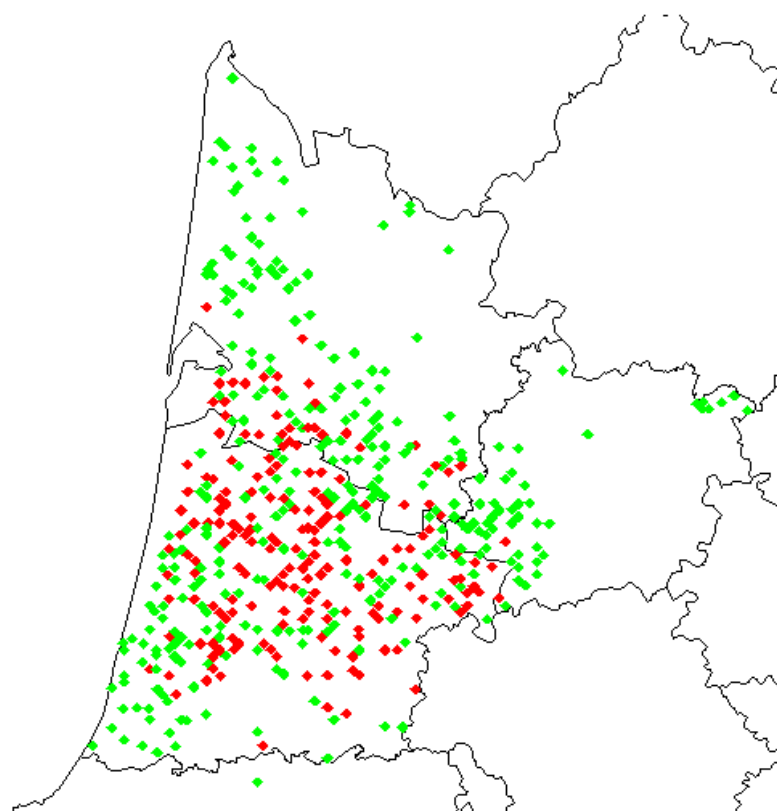


Figure 31 : variable binomiale « taux de dégâts > 40% » modélisée



5.4. Corrélation entre facteurs

Il existe naturellement des liens statistiques (corrélation) entre certaines variables. Lorsque deux variables sont fortement corrélées, il est peu probable que l'ajout de la seconde améliore de façon conséquente le modèle si la première a été retenue. En effet, l'amélioration de la précision du modèle ne peut être apportée que par la part d'information portée par la deuxième variable qui n'est pas redondante avec la première. Il est donc intéressant d'étudier la corrélation entre les différents facteurs de stabilité statistiquement significatifs.

Pour cela, la matrice de corrélation entre variables numériques a été calculée (Tableau 9). Comme, par définition, la matrice des corrélations est symétrique, seule est fournie la partie au-dessus de la diagonale nord-ouest / sud-est. Par ailleurs, la diagonale de cette matrice ne comporte que des 100%, également par définition.

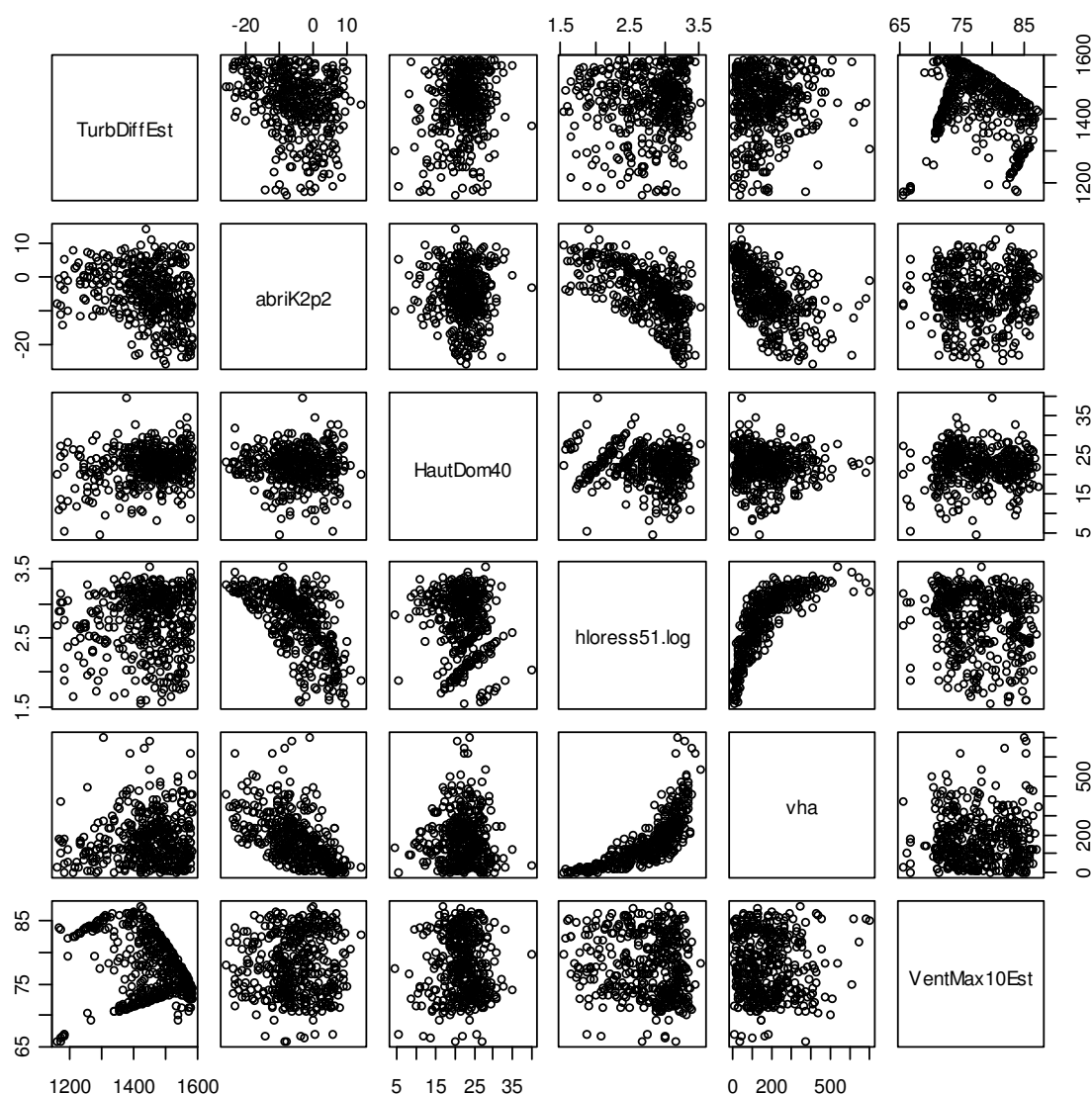
Sans surprise, la corrélation entre le logarithme de la hauteur de Lorey du pin maritime et le volume à l'hectare est très importante (77%). Le lien entre ces deux variables est également très net sur la Figure 32. Ce lien fort peut expliquer le fait que le volume à l'hectare ne soit pas très significatif dans les modèles dès lors que le logarithme de la hauteur de Lorey est intégré.

Le facteur d'abri est logiquement corrélé de façon négative avec les deux variables dendrométriques mentionnées précédemment : plus un peuplement est haut, moins il a de chances d'être abrité (Figure 24). Malgré ce lien, le facteur d'abri ressort tout de même comme significatif ce qui indique que la partie non redondante avec la hauteur est riche d'explication des dégâts. L'indice d'abri est également lié négativement, mais de façon moins importante, à la turbulence. Ceci est certainement lié en partie à la méthode de construction de l'indice d'abri finalement retenu dans le modèle. Celui-ci a été calculé à partir de l'état final – après Klaus – des peuplements à l'ouest de la placette et donc dans son voisinage géographique. Or les dégâts ont été maximaux dans les zones les plus turbulentes, là-même où les peuplements se sont retrouvés les moins abrités.

Tableau 9 : corrélation entre les facteurs numériques significatifs

	Turbulence	Abri	Ind. de fertilité	Ecart abs. du couvert à 5/10	Log. hauteur de Lorey	Volume à l'ha	Niveau hydrique bio-ind.	Vitesse moy. Max.
Turbulence 2	100%	-28%	20%	-11%	8%	9%	0%	-26%
Abri K2p2		100%	-3%	4%	-63%	-55%	6%	5%
Ind. de fertilité			100%	-8%	-14%	0%	-9%	-1%
Ecart abs. du couvert à 5/10				100%	10%	20%	1%	-23%
Log. de la hauteur de Lorey					100%	77%	8%	-14%
Volume à l'ha						100%	9%	-1%
Niveau hydrique bio-ind.							100%	-8%
Vitesse moy. Max.								100%

Figure 32 : représentation deux à deux de tous les facteurs continus et significatifs des modèles explicatifs du taux de dégâts de pin maritime. TurbDiffEst : turbulence 2 ; abriK2p2 : abri après tempête ; HautDom40 : indice de fertilité ; hloress51.log : logarithme de la hauteur de Lorey du pin maritime ; vha : volume à l'ha ; VentMax10Est : vitesse moyenne maximale.



Hormis ces quelques cas, la corrélation entre les facteurs significatifs est faible. En particulier, l'indice de fertilité est relativement indépendant de tous les autres facteurs, y compris les variables dendrométriques (hauteur, volume sur pied). Il en est de même pour la variable définie à partir du taux de couvert absolu qui n'est pas fortement liée à la hauteur mais partiellement corrélée au volume sur pied (Figure 33).

Le niveau hydrique bio-indiqué est, à l'évidence, fortement lié à l'hydromorphie du sol ; les sols hydromorphes correspondent essentiellement à des stations hygrophiles⁹ à

⁹ Par abus de langage, les qualificatifs hygrophile, hygrocline, xérophile, etc. relatifs à la végétation sont également utilisés pour les stations caractérisées par cette végétation.

mésohydroclines alors que les $\frac{3}{4}$ des sols non hydromorphes correspondent à des stations mésohydroclines à xérophiles. Le recouvrement entre les deux classes d'hydromorphie est relativement faible.

Figure 33 : taux de couvert absolu et volume sur pied à l'hectare

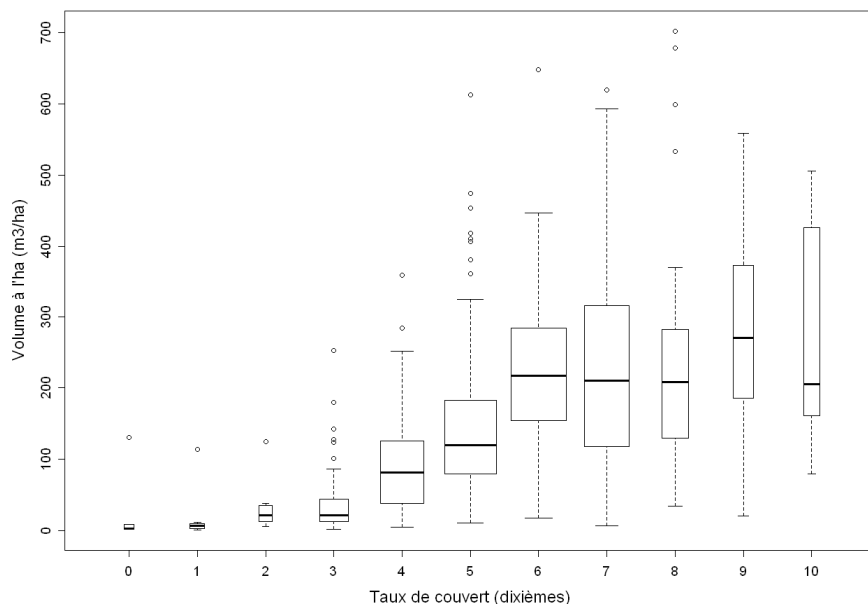
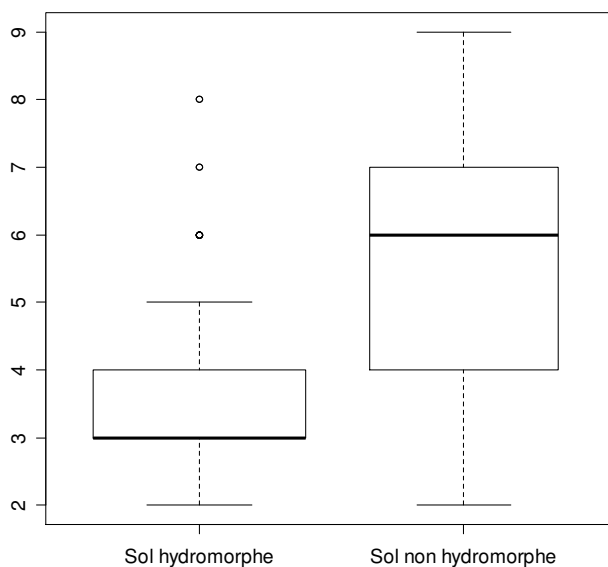


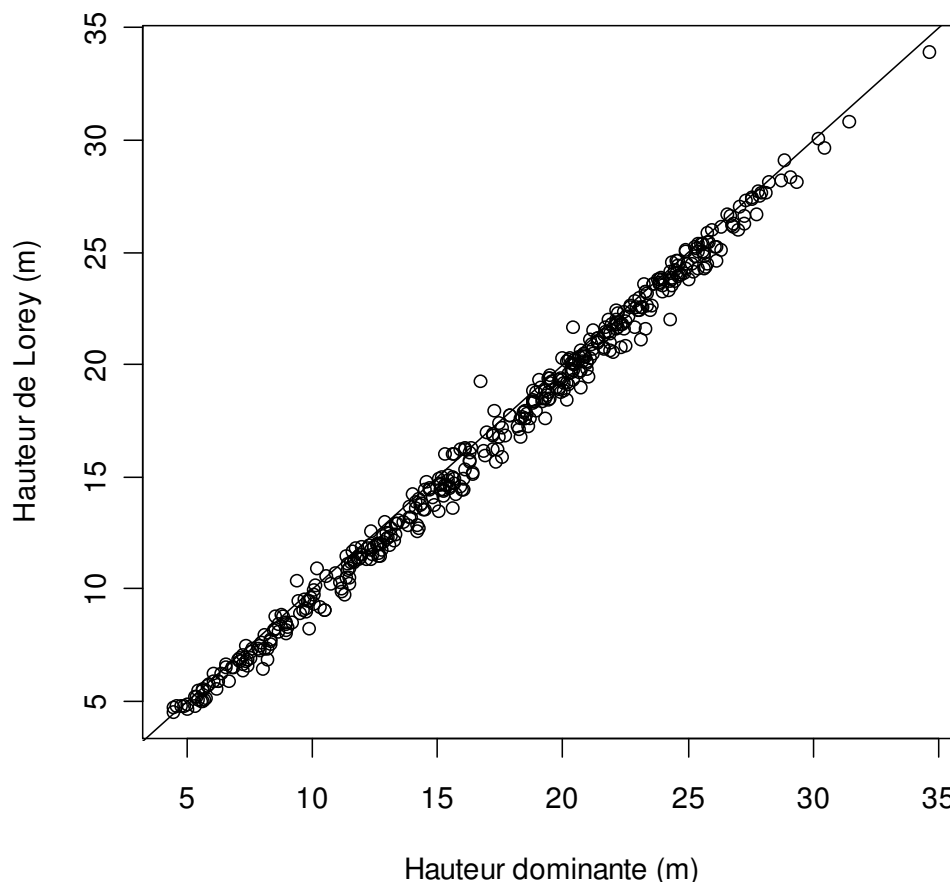
Figure 34 : niveau hydrique bio-indiqué vs. hydromorphie. L'axe du niveau hydrique est gradué du pôle hygrophile (1) au pôle xérophile (9, annexe 10.3).



Concernant les variables de hauteur, il a été décidé de n'en retenir qu'une seule car elles sont très liées entre elles comme la hauteur dominante et la hauteur de Lorey par exemple (Figure 35). En effet, sur cette figure les points s'éloignent très peu de la diagonale $Y = X$. Il est donc possible d'estimer la hauteur de Lorey à partir de la hauteur dominante et vice versa. Il est probable que la hauteur de Lorey soit intégrée au modèle car son estimation sur les placettes d'inventaire forestier de l'IGN, déterminée à partir de l'ensemble des arbres inventoriés, est certainement plus robuste que le calcul de la hauteur dominante qui peut

s'appuyer sur les mesures de quelques arbres seulement. Cette excellente corrélation entre les deux hauteurs pourrait faciliter l'utilisation du modèle pour la gestion, puisque la hauteur dominante est plus facilement déterminée sur le terrain.

Figure 35 : hauteur dominante et hauteur de Lorey du pin maritime des placettes du Massif Landais



6. Analyse des résultats

6.1. Facteurs de stabilité identifiés

La modélisation des dégâts a mis en évidence huit facteurs de stabilité significatifs sur la stabilité des peuplements. Ces facteurs appartiennent à différentes familles démontrant ainsi la complexité des processus mis en jeu :

- caractéristiques météorologiques : turbulence et vitesse moyenne maximale du vent ;
- dendrométrie : hauteur de Lorey du sous-peuplement de pin maritime, taux de couvert absolu ;
- station : hydromorphie, fertilité, niveau hydrique bio-indiqué ;
- paysage : effet d'abri.

Le vent est naturellement un facteur indispensable à prendre en compte dans une étude de stabilité des peuplements lors d'une tempête, car il exerce une force directement sur l'arbre, pouvant engendrer une casse ou un déracinement. Faute d'une densité suffisante de points de mesure, le krigeage sur les différentes placettes est une méthode pertinente pour estimer la vitesse du vent sur celles-ci, avec une précision qui peut être considérée comme acceptable mais qui n'est pas garantie dans tous les cas. En outre, la vitesse instantanée maximale est par définition intermittente ; elle n'indique pas si les rafales de vent ont été brèves ou plus proches de la vitesse moyenne du vent qui a soufflé à un endroit donné.

L'indice de turbulence utilisé dans cette étude permet d'apporter un supplément d'information en ce sens, et se révèle très significatif. Une valeur élevée de cet indice indique que de brusques rafales, bien au-dessus de la vitesse moyenne du vent, ont eu lieu, ce qui est susceptible de fortement augmenter les dégâts. Ce nouveau paramètre mis en évidence n'avait jamais été testé dans ce type de modèle. Il permet de mieux caractériser le facteur vent et mérite d'être considéré à l'avenir dans d'autres études de stabilité, étant donné qu'il varie dans le sens du taux de dégât. C'est notamment cette caractéristique qui permet de distinguer les peuplements des dunes, avec de faibles dégâts, des peuplements du Plateau landais. Si le vent sur la dune a soufflé très fort, il l'a fait de façon plus régulière et soutenue, et la turbulence – au sens où elle a été définie dans cette étude – était en effet moins forte.

Il est à noter que certains aspects relatifs au vent n'ont pas été étudiés dans le cadre de cette étude : écart aux normales saisonnières, qui aurait pu mettre en évidence un phénomène d'acclimatation des peuplements au vent (facteur également favorable pour la dune *a priori*), approche plus élaborée de la turbulence par l'analyse de la série journalière des vitesses instantanées maximales, le jour de la tempête, etc.

La hauteur des peuplements est un facteur de stabilité récurrent dans la majorité des études sur la stabilité, quelle que soit l'essence. Notre étude confirme ces résultats pour le pin maritime. Plus que la hauteur dominante, c'est la hauteur de Lorey qui est ressortie comme facteur significatif de l'étude. Toutefois, comme ces deux grandeurs sont très étroitement liées, ceci est probablement dû à la plus grande robustesse de l'estimation de la hauteur de Lorey liée au protocole de levé de l'IGN. La hauteur de Lorey intégrée dans le modèle nous renseigne de façon directe sur la hauteur dominante (Figure 35). Un peuplement ayant une hauteur dominante plus élevée sera plus vulnérable au vent, et le risque de dégâts sera plus important : l'effet de bras de levier est plus marqué, et le vent est plus fort en hauteur qu'au sol (Colin et al., 2009).

La transformation de la hauteur de Lorey selon la fonction logarithme renseigne sur la non linéarité de l'accroissement des dégâts selon la hauteur. En fait, les dégâts croissent très vite pour les faibles hauteurs (jusqu'à 12 – 15 m) puis se stabilisent rapidement au-delà (Figure 12 et Figure 17). Du point de vue purement statistique, la hauteur dominante du peuplement permettait également d'améliorer le modèle en plus du logarithme de la hauteur de Lorey. Toutefois, cette variable a été écartée pour la clarté de l'exposé. Ceci démontre toutefois le caractère primordial de cette grandeur dans ce type d'analyse.

Le taux de couvert absolu du peuplement – très exactement l'écart absolu au taux de 5/10 – est un facteur important du point de vue sylvicole. En effet, ce paramètre est un des rares sur lequel la sylviculture puisse intervenir. Un couvert absolu plus important – forêt très fermée – et, beaucoup plus accessoirement, un couvert absolu faible – forêt ouverte – favoriseraient la stabilité des peuplements. Un peuplement plus dense et compact résisterait donc mieux au vent. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Cucchi et Bert (2003) sur leur dispositif expérimental à Cestas, ainsi qu'avec les travaux de modélisation de Meredieu et al. (2009).

Les caractéristiques stationnelles apparaissent également d'une importance majeure pour la stabilité des peuplements.

L'hydromorphie indique une saturation régulière en eau dans le sol. D'après le modèle, les dégâts seront plus importants sur sol hydromorphe que sur sol non hydromorphe. Ceci est cohérent avec le fait que l'ancrage serait moins développé sur des sols qui présentent des marques physiques d'une saturation régulière en eau, donc plus vulnérable au vent.

Les dégâts seraient plus importants en station humide qu'en station sèche. On peut avancer l'hypothèse que le niveau hydrique bio-indiqué par la flore peut aussi nous renseigner sur la qualité de l'enracinement. Plus la station est sèche, plus les arbres auront tendance à développer un système racinaire profond. Or, le pin maritime est une espèce qui adapte fortement son architecture racinaire en fonction des vents dominants et de la profondeur du

sol (Danjon et al., 2005). Les peuplements de la dune sont soumis plus régulièrement à des vents forts (13 jours par an en moyenne où le vent dépasse 90km/h en rafale ; source : Météo-France). Ainsi, cette adaptation du système racinaire au vent et à la profondeur du sol plus importante pourrait contribuer à la grande stabilité des peuplements de pin maritime de la dune, grâce à un ancrage solide dans le sol.

Le modèle suggère que les stations les plus fertiles sont des stations ayant un risque plus important de chablis. L'indice de fertilité retenu, correspondant à la hauteur dominante du peuplement à 40 ans, semble donc approprié dans le cas du pin maritime.

Enfin, les peuplements abrités subissent moins de dégâts que les peuplements exposés. Le fait que ce point ressorte après d'autres (turbulence, hauteur, hydromorphie) et uniquement en intégrant la carte des dégâts – et donc l'effet d'abri pendant la tempête – trouve probablement son origine à différents niveaux (ancienneté de la carte forestière, très forte évolution de cette caractéristique au cours de la tempête). Il est probable qu'une approche dynamique améliorerait grandement la caractérisation de son effet sur les dommages.

6.2. Facteurs non significatifs

Les éclaircies ont été identifiées comme un facteur d'instabilité important dans de nombreuses études (Albercht et al., 2010 ; Piton, 2002 ; Renaud et Hervé, 2005 ; Riou-Nivert et al., 2005). D'après Piton (2002), les prélèvements dans les cinq ans précédant la tempête apparaissent très déstabilisants pour le pin maritime. Ce facteur n'est jamais ressorti de manière significative lors de l'analyse, du fait probablement du changement de méthode de l'IFN pour estimer les prélèvements (IFN, 2011). En effet, les données qui se réfèrent à ce facteur dans notre étude, n'étaient pas suffisamment pertinentes (diversité des protocoles et des périodes d'évaluation) pour qu'il soit mis en évidence. Il est possible que la donnée relative au taux de couvert se soit substituée à ce facteur lié à l'éclaircie, celles-ci diminuant de fait le couvert absolu du peuplement.

L'exposition n'est pas apparue lors de l'analyse. Ceci est probablement à attribuer au fait que la région Aquitaine comporte très peu de relief hormis le cas particulier de la dune littorale. Toutefois, l'échantillon de placettes dans cette zone était insuffisant pour mettre en évidence ce facteur.

La profondeur du sol n'a pas non plus été mise en évidence. Dans ce cas, la pertinence de la variable peut être mise en question, puisque la donnée utilisée est la profondeur de sondage à la tarière. Les obstacles qui arrêtent la main de l'homme lors du sondage ne sont pas nécessairement les mêmes que ceux qui stoppent les racines des arbres lorsqu'elles explorent le sol. De plus, Cucchi et al. (2004) n'ont pas montré d'effet de la profondeur d'altos. La hauteur de la nappe d'eau peut aussi être une limite à l'enracinement, et n'être donc pas mesurable par sondage à la tarière. Par ailleurs, nous avons vu que certains facteurs renseignent de façon indirecte sur l'enracinement (hydromorphie, niveau hydrique bio-indiqué).

Le diamètre quadratique moyen du peuplement et le facteur d'élancement (hauteur/diamètre), pourtant réputé lié à la stabilité des peuplements, ne sont jamais ressortis dans l'analyse. Les zones de stabilité de l'IDF définies à partir de la hauteur dominante et du diamètre quadratique moyen du peuplement (Riou-Nivert, 2001) n'ont pas été considérées dans cette étude suite aux conclusions négatives de Piton (2002) lors de la précédente étude.

Dans cette étude, le mélange d'essences n'est pas un facteur significatif de stabilité des peuplements. Cependant, l'effectif de placettes comportant du pin maritime et en situation de mélange est très peu important dans le Massif landais (7% des placettes) pour évaluer cet effet de façon fiable. C'est donc un point sur lequel nous ne pouvons pas conclure.

Différentes données et variables visant à caractériser la structure verticale du peuplement – variabilité des hauteurs, des diamètres, différence et ratio des hauteurs du sous-

peuplement dominant et du sous-peuplement dominé, taux de couvert des ligneux bas, etc. – ont été testées sans succès. Là encore, il est possible que la grande homogénéité et régularité de la structure forestière du Massif landais n'aient pas permis cette analyse. A titre d'exemple, la médiane du coefficient de variation des hauteurs des arbres recensables sur les placettes avec du pin maritime n'est que de 7% et son troisième quartile de 13%.

Les peuplements en lisière¹⁰ ne présentent pas plus de dégâts que les autres peuplements alors qu'ils sont plus exposés. Ceci est compatible avec une adaptation de l'enracinement aux conditions de vent. Cucchi et al. (2004) ont en effet montré que des pins maritimes situés sur des lisières ouest étaient plus résistants à l'arrachage que des pins plus à l'abri dans le massif. N'étaient considérés dans leur étude que des pins bien exposés aux vents dominants, et tels que toute parcelle proche située plus à l'ouest ne comportait pas de pin de hauteur supérieure à la mi-hauteur des pins de la parcelle de mesure. Malgré une plus grande exposition au vent, ils peuvent ainsi ne pas présenter plus de dégâts. Il convient de noter ici que les lisières considérées dans la présente étude sont des lisières situées entre la forêt et une couverture du sol non forestière ; en particulier, les peuplements en bordure d'une coupe rase n'ont pas été considérés en lisière alors qu'ils sont probablement plus sensibles que les peuplements en lisière de façon permanente. A l'inverse, cette situation a bien été prise en compte dans les indices caractérisant l'abri.

7. Evaluation du modèle

Initialement, deux phases, une d'évaluation et une de représentation cartographique, devaient suivre la phase de calibration du modèle à l'aide des données de placettes IGN.

7.1. Évaluation du modèle sur des données indépendantes

Pour la phase d'évaluation, le modèle ou les modèles établis devaient être testés sur les données recueillies dans les dispositifs d'expérimentation ou d'observation des réseaux régionaux qui avaient fait l'objet de mesures post-tempête, notamment :

- réseau du GIS Coopérative nationale de données (responsable Inra : C. Meredieu) ;
- réseau du GIS Pin maritime du futur (responsable Inra : P. Pastuszka) ;
- réseau européen de suivi des dommages forestiers géré par le DSF : une quarantaine de placettes caractérisées au niveau stationnel et proches de points IFN.

Outre l'objectif d'une évaluation sur des jeux de données indépendants, un second objectif était de mettre en évidence les facteurs qui ne sont accessibles que dans les réseaux expérimentaux (type d'installation, fertilisation, niveau d'amélioration) et de confirmer ou non la prise en compte de variables liées à la gestion grâce à la gamme de sylvicultures couvertes dans ces réseaux.

La première étape était de calculer les variables indépendantes mises en évidence grâce aux données IGN, puis de comparer la prévision du taux de dégâts au taux de dégâts réellement constaté. Le temps imparti à ce projet après la calibration initiale des modèles n'a pas été suffisant et les variables mises en évidence n'ont pu être calculées sur les placettes de ces réseaux.

La méthodologie aurait pu être la suivante pour les dispositifs du GIS Coopérative de données.

¹⁰ Au sens de l'IGN, une lisière sépare une formation de couverture du sol « forêt » d'une formation de couverture du sol « non forêt », sur une largeur supérieure ou égale à 20 m. Un cas particulier est décrit lorsque la placette intercepte une route ou une rivière de plus de 5 m et de moins de 20 m de large.

Chaque placette a fait l'objet de mesures après la tempête : l'état individuel de chaque arbre a été noté, et un taux de dégât a été calculé sur la base du nombre de tiges renversées ou cassées. Pour permettre une comparaison avec le taux de dégât de la présente étude, il aurait été nécessaire de calculer un taux de dégâts en volume avec le tarif de cubage utilisé par l'IGN.

Chaque dispositif a été localisé sur carte grâce à ses coordonnées géographiques : à partir de la technique de krigeage utilisée, les deux variables de vitesse de vent pouvaient être attribuées à toutes les placettes appartenant à un dispositif. Compte-tenu de la précision de ces estimations, ces vitesses auraient été considérées comme uniformes à l'échelle de toutes les placettes d'un même dispositif.

Les deux variables liées à la hauteur dominante, hauteur de Lorey et fertilité du peuplement, sont les plus aisées à calculer pour ce réseau. La hauteur de Lorey peut être théoriquement calculée à partir des mesures réalisées sur les placettes sous réserve d'une actualisation des dimensions du peuplement. En effet, les mesures en circonférence sont réalisées tous les trois ans au minimum et les mesures de hauteur tous les six ans. Il est donc nécessaire d'actualiser les valeurs de circonférence et les hauteurs à la date de la tempête grâce au modèle de croissance. La hauteur est particulièrement sensible dans le modèle de dégâts établi car elle intervient directement via la hauteur de Lorey et indirectement dans l'établissement de l'indice de fertilité. Compte tenu de la forme des modèles de fertilité employés, la précision dans le jeune âge est primordiale pour l'estimation de la valeur actualisée. Plus le peuplement est jeune, plus l'indice de fertilité peut être biaisé.

La variable relative au taux de couvert est une variable non mesurée dans les placettes de ce réseau. La méthodologie décrite dans ce document et l'importance que cette variable revêt nous incite à vouloir en tester la mesure dans notre réseau. Une analyse doit être menée pour mettre en relation cette variable et les variables habituellement mesurées ou calculées.

Le niveau d'hydromorphie et le niveau hydrique bio-indiqué ne sont pas mesurés dans les placettes de ce réseau. Sur une partie d'entre elles, la flore du sous-bois a été mesurée en termes de présence/absence, de recouvrement et de hauteur. L'algorithme de définition des niveaux hydriques utilisé par l'IGN nécessite un codage particulier des espèces identifiées. Le protocole de mesure de la présence d'hydromorphie doit également être mis en relation avec le protocole de sondage de sol utilisé dans ce réseau.

Enfin, la variable d'abri nécessite un travail cartographique important et un accès à des informations non disponibles en routine.

Les deux autres réseaux n'ont pas été examinés mais les réserves d'adaptation énoncées pour le réseau du GIS Coopérative de données doivent être de nature similaire.

Ces réseaux d'essais sont complémentaires et indispensables pour évaluer le modèle établi sur la base des placettes IGN. Ces dernières sont nombreuses mais moins riches en informations que les essais. Notamment, les scénarios sylvicoles sont connus depuis la plantation et sont très hétérogènes. Il est donc possible que deux scénarios différents (éclaircies précoces ou non, densités initiales différentes...) aboutissent par exemple à un même taux de couvert mais à des taux de dégâts différents. L'hétérogénéité des taux de dégâts au sein des placettes d'un dispositif pourrait ainsi éclairer des variables non prises en compte dans le modèle. On peut penser que certaines variables non mises en évidence ici pourraient alors le devenir : par exemple, la variable « éclaircie récente ». Enfin, l'évaluation grâce aux réseaux d'essais pourrait permettre d'affiner voire d'affirmer des conseils de gestion.

7.2. Cartographie

Des cartes de comparaison « taux de dégâts observés » vs. « taux de dégâts prédits » sont fournies dans ce rapport sur la base des points IGN. En revanche, contrairement à ce qui

avait été annoncé, ce travail n'a pu être fait pour les dégâts de 1999 car les variables indépendantes du modèle n'étaient pas toutes disponibles, en particulier les vitesses de vent.

Enfin, les calculs pour établir une carte de sensibilité pour les peuplements restants après la tempête n'ont pas été faits car la qualité du modèle établi ne nous permet pas de diffuser une information robuste à cette échelle.

8. Conclusion : limites et perspectives

L'étude statistique qui vient d'être présentée a permis de dégager un ensemble de variables significatives, apparaissant comme autant de facteurs de stabilité des peuplements de pin maritime dans le contexte du massif des Landes de Gascogne. Les résultats, obtenus grâce à la prise en compte dans l'analyse statistique d'un grand nombre de facteurs (145 variables ont été testées), s'avèrent intéressants à plusieurs titres :

- les huit variables retenues couvrent un large spectre de facteurs puisqu'elles sont associées à des caractéristiques dendrométriques, stationnelles, météorologiques et paysagères ;
- ce résultat montre bien la diversité des facteurs de stabilité, qu'on ne peut réduire à une ou deux variables clés ;
- le travail réalisé met en évidence certains facteurs classiques déjà ressortis dans des études précédentes : vitesse du vent (mais c'est la vitesse instantanée, plus que la vitesse moyenne, qui est ressortie ici), hauteur des arbres (de Lorey, en l'occurrence), densité du peuplement (taux de couvert), humidité du sol ;
- il met également en lumière deux nouveaux facteurs, l'un lié à la turbulence atmosphérique (l'écart entre vitesse instantanée et vitesse moyenne est liée à l'intermittence de l'écoulement et à la propension de ce dernier à être le siège de rafales de vent), et l'autre à l'environnement de la parcelle (la structure du paysage amont) alors que jusqu'à présent seuls étaient considérés des facteurs locaux.

Le modèle élaboré, pour autant, n'a rien de définitif. Même s'il s'avère fournir une bonne prédiction des dégâts lorsque deux populations sont considérées (dégâts inférieurs et supérieurs à 40%), sa valeur explicative reste largement perfectible. En particulier, on a vu au paragraphe 5.2.2 qu'il n'est pas assez discriminant : il tend à sur-prédire les dégâts moyens et à sous-prédire les cas extrêmes (faibles et forts dégâts). Ensuite, il repose sur des données météorologiques d'entrée trop imprécises : on a vu par exemple que seules trois stations météorologiques sont représentatives du cœur du massif forestier, dans le département des Landes ; on sait que les résultats de la technique du krigeage dépendent fortement de la localisation des points de mesure, dont l'hétérogénéité spatiale peut entraîner de fortes erreurs par endroits. Enfin, il s'avère que certaines des variables explicatives sont corrélées entre elles, que certaines présentent une faible qualité d'estimation, et que leurs éventuelles interactions n'ont été testées qu'*a posteriori* ; la définition des variables elles-mêmes et du modèle statistique peut être repensée à la lumière des résultats obtenus.

Loin de remettre en cause le présent travail, ces limitations en dessinent des perspectives claires.

Si la présente étude a tiré le meilleur parti des mesures de vitesse de vent réalisées sur la zone, leur rareté (14 postes en Gironde et Landes, 3 seulement au cœur du massif landais) fait qu'aucune amélioration des données de vent n'est envisageable sur la base du réseau existant. Une solution performante pourrait venir de la simulation atmosphérique. Les progrès récents de la modélisation à fine échelle font qu'il devient en effet possible de simuler les champs de vent instantanés sur une zone telle que la région Aquitaine, avec une résolution d'ordre kilométrique au sol, tout en assimilant les données mesurées pendant la période considérée qui peut couvrir un événement de type tempête. Une réflexion sur le sujet est en cours entre Météo-France et Inra, et pourrait déboucher à court terme sur une

reconstitution des champs de vent à fine échelle pendant la tempête Klaus. Une telle base de données permettrait de reprendre la présente étude dans de bien meilleures conditions.

Une partie des incertitudes inhérentes au présent travail provient de l'incomplétude des données dendrométriques (circonférence, hauteur, etc.) : les données utilisées ont en effet été acquises lors des passages de l'IFN sur le terrain, entre 2005 et 2009, sans actualisation à la date de la tempête. Cette actualisation a été effectuée par la suite à l'aide d'un modèle de croissance (Colin et al., 2010), permettant une bonne estimation des variables dendrométriques à cette date qui, là encore, permettrait d'affiner la présente étude. Par ailleurs, la prise en compte de l'environnement paysager doit reposer lui aussi, pour être sérieux, sur la connaissance des hauteurs d'arbres sur plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres, le long d'un transect amont (vers l'ouest). Une actualisation des données utilisées à la date de la tempête serait à son tour bénéfique ; l'utilisation d'un lidar aéroporté pourrait être dans l'avenir un atout considérable.

Comme on l'a vu, un grand nombre de facteurs ont été testés dans l'analyse statistique. S'il était logique et souhaitable dans un premier temps de « ratisser large », sans doute pourrions-nous dans une phase ultérieure chercher à définir des variables plus élaborées. En ce qui concerne le vent en particulier, il semble pertinent de revenir aux fondamentaux, sur la base d'une approche mécaniste des interactions entre vent et canopée. On peut ainsi songer à bâtir une nouvelle variable représentant la force exercée sur le houppier, plutôt que la vitesse elle-même ; cette force est proportionnelle au carré de la vitesse, à la surface foliaire par unité de volume et au coefficient de traînée. Ces dernières variables peuvent théoriquement être exprimées en fonction de caractéristiques dendrométriques et stationnelles telles que densité du peuplement, hauteur des arbres et taux de couvert. De manière générale, la recherche et la prise en compte de relations générales entre variables dendrométriques et variables ayant une signification physique directe est souhaitable. Elle permettrait de définir des facteurs peut-être plus pertinents, de limiter les corrélations entre variables, et d'ouvrir la porte à des possibilités d'estimation de variables à partir de mesures de télédétection, et donc à des cartographies de variables d'entrée du modèle.

Compte tenu des défauts du modèle actuel dans les classes de faibles et de forts dégâts, ainsi que de l'impossibilité dans le présent travail de réaliser une évaluation du modèle sur un jeu de données indépendant (voir partie 7 du rapport), nous n'avons pas jugé pertinent de dresser des cartes de risque. On pourra s'appuyer en revanche sur le Tableau 8, et notamment sur ses cases grisées : comme le modèle a tendance à sous-estimer les forts dégâts, les cas à risque mis en évidence peuvent être considérés comme avérés.

Enfin, parmi les huit facteurs identifiés par la modélisation statistique, certains sont sous la dépendance des opérations sylvicoles et les résultats obtenus dans ce travail peuvent donner des indications en ce sens. On ne reviendra pas ici sur cet aspect déjà abordé en partie 6. En revanche on notera que le facteur « abri » met en jeu une échelle supérieure à celle de la parcelle, car il dépend de la structure du paysage et de l'hétérogénéité des hauteurs de peuplement en amont de la parcelle considérée. La mise en évidence du facteur « turbulence » renforce ce résultat, car il semble bien que la turbulence dépende dans une certaine mesure de cette fragmentation du paysage, comme tend à le montrer d'ailleurs la corrélation négative trouvée ici entre effet d'abri et turbulence. Ces résultats, s'ils se confirment par la suite, ouvrent des questions nouvelles pour la gestion forestière de demain, qui aura à prendre en compte une dimension territoriale et non plus seulement parcellaire. C'est une piste que la recherche se doit d'explorer.

9. Bibliographie

Albrecht A., Hanewinkel M., Bauhus J. & Kohnle U. (2010) How does silviculture affect storm damage in forests of south-western Germany? Results from empirical modeling based on long-term observations. *Eur J Forest Res.*

Arnaud M., Emery X. (2000) Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et méthodes géostatistiques. Editions Hermes Science, 221 p.

Becquey J. (2000) Peuplements mélangés et stabilité. In Expertise collective sur les tempêtes, la sensibilité des forêts et sur leur reconstitution (eds S. Drouineau, O. Laroussinie, Y. Birot, D. Terrasson, T. Formery, B. Roman-Amat), pp. 135-139. Dossier de l'environnement de l'INRA n°20, INRA-ME&S, Paris.

Bélouard T., Riou-Nivert P., Renaud J.-P., Hervé J.-C., Paillassa E. (2005) Evaluation des facteurs de résistance au vent à l'aide des données de l'IFN – Application aux diagnostics de stabilité régionaux – Partie II : études régionales. Rapport final d'étude (appel d'offres « Forêt, vent et risques » coordonné par le GIP Ecofor); décembre 2005, 32 p.

Bélouard, T., Vidal, C., Hervé, J.-C., Robert N. (2005) Le nouvel inventaire forestier de l'IFN – Un sondage systématique et annuel. Colloque « De l'observation des écosystèmes forestiers à l'information sur la forêt », pp. 14 – 25. Paris 2 et 3 février 2005. Accès décembre 2009 <http://www.symposcience.org/exl-doc/colloque/ART-00002046.pdf>

Bessemoulin P. (2009) Les tempêtes exceptionnelles de 1999 : caractérisation météorologique et lien éventuel avec le changement climatique. In La forêt face aux tempêtes (eds Y. Birot, G. Landmann, I. Bonhême), pp. 37-43. Editions Quae, Versailles.

Bock J., Duplat P., Renaud J.P., Vinkler I. (2002) Influence des paramètres sylvicoles et stationnels sur l'intensité des dégâts provoqués par la tempête du 26 décembre 1999 dans les hêtraies du quart Nord-Est de la France. Rapport de convention de recherche ECOFOR/ONF (ECOFOR n°2000-39), ONF Nancy, 72p

Boureau, J.-G. (2008). Manuel d'interprétation des photographies aériennes infrarouges – Applications aux milieux forestiers et naturels. Inventaire forestier national, Nogent-sur-Vernisson.

Brunet Y., Dupont S., Sellier D., Fourcaud T. (2009) Les interactions vent-arbre, de l'échelle locale à celle du paysage : vers des approches déterministes. In La forêt face aux tempêtes (eds Y. Birot, G. Landmann, I. Bonhême), pp. 229-259. Editions Quae, Versailles

Colin F., Vinkler I., Riou-Nivert P., Renaud J.-P., Hervé J.-C., Bock J., Piton B. (2009) Facteurs de risques de chablis dans les peuplements forestiers : les leçons tirées des tempêtes de 1999. In La forêt face aux tempêtes (eds Y. Birot, G. Landmann, I. Bonhême), pp. 177-228. Editions Quae, Versailles

Colin A., Meredieu C., Labbé T., Bélouard T. (2010) Étude rétrospective et mise à jour de la ressource pin maritime du massif des Landes de Gascogne après la tempête Klaus. Convention MAAP / IFN n° E18 /2010, 39 p.

Cornillon P.A., Guyader A., Husson F., Jégou N., Josse J., Kloareg M., Matzner-Løber E., Rouvière L. (2010) Statistiques avec R, 2e édition augmentée. Pratique de la statistique. Editions Presses universitaires de Rennes, 274 p.

Cressie, N. (1993) Statistics for spatial data. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, United States of America.

Cucchi V., Bert D. (2003) Wind-firmness in *Pinus pinaster* Ait. Stands in Southwest France: influence of stand density, fertilisation and breeding in two experimental stands damaged during the 1999 storm. *Annals of Forest Science* 60, 209-226.

Cucchi V., Meredieu C., Stokes A., Berthier S., Bert D., Najjar M., Denis A., Lastennet R. (2004) Root anchorage of inner and edge trees in stands of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) growing in different podzolic soil conditions. *Trees-Structure and function* 18, 460-466.

Cucchi V., Meredieu C., Stokes A., de Coligny F., Suarez J. & Gardiner B. A. (2005) Modelling the windthrow risk for simulated forest stands of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecology and Management* 213, 184-196.

Danjon F., Fourcaud T., Bert D. (2005) Root architecture and wind-firmness of mature *Pinus pinaster*. *New Phytologist* 168, 387-400.

Doll D. (1988) Les catastrophes météorologiques en forêt. Thèse de doctorat en géographie, aménagement et urbanisme. Université Lumière Lyon II, 676p.

Dupont S. & Brunet Y. (2006) Simulation of turbulent flow in an urban forested park damaged by a windstorm. *Boundary-Layer Meteorology* 120, 133-161.

Dupont S. & Brunet Y. (2008) Edge flow and canopy structure: a large-eddy simulation study. *Boundary-Layer Meteorology* 126, 51-71.

Gardiner B.A., Peltola H., Kellomäki S. (2000) Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecological Modelling* 129, 1-23.

Gardiner B., Blennow K., Carnus J-M, Fleischer P., Ingemarson F., Landmann G., Lindner M., Marzano M., Nicoll B., Orazio C., Peyron J-L., Reviron M-P., Schelhaas M-J., Schuck A., Spielmann M., Usbeck T. (2010) Destructive Storms in European Forests: Past and Forthcoming Impacts. European Forest Institute, Final Report to European Commission - DG Environment, 134 p. <http://ec.europa.eu/environment/forests/fprotection.htm>

IFN (2003) Les tempêtes de décembre 1999 : bilan national et enseignements. IF, 2, 8p. Accès août 2012 http://www.ifn.fr/spip/IMG/pdf/L_IF_no02_tempetes.pdf

IFN (2008) Nouvelle cartographie forestière : de la production à l'utilisation. IF n° 20. Accès août 2010 http://www.ifn.fr/spip/IMG/pdf/IF20_carto.pdf

IFN (2009a) Protocole pour l'évaluation des dégâts de la tempête 2009 dans le sud-ouest. Document interne, 13 p.

IFN (2009b) Tempête Klaus du 24 janvier 2009 : 234 000 hectares de forêts affectés à plus de 40 % 42,5 mètres cubes de dégât. IF n° 21, 12p. Accès août 2012 http://www.ifn.fr/spip/IMG/pdf/IF21_internet.pdf

IFN (2010) L'image proche infrarouge : une information essentielle. IF n° 25. Accès août 2010 http://www.ifn.fr/spip/IMG/pdf/IF_25_proche_infrarouge_2.pdf

IFN (2011) Prélèvements de bois en forêt et production biologique : des estimations directes et compatibles. IF n° 28. Accès août 2012 http://www.ifn.fr/spip/IMG/pdf/IF_prel-prod_web2.pdf

Inra (2009) Sylviculture, forêts et tempêtes – Actes du colloque du 30 juin 2009. Carrefours de l'innovation agronomique. 119 p.

Lemoine B. (1991) Croissance et production du pin maritime. Recherche d'un modèle et d'une méthode. *Annals of Forest Science* 39, 321-354.

Lesgourgues Y. et al. (2009) Tempête du 24 janvier 2009 : éléments de réflexion pour aborder la reconstitution forestière du Massif des Landes de Gascogne, CRPF Aquitaine.

Mayer P., Brang P., Dobbertin M., Hallenbarter D., Renaud J.P., Walthert L. & Zimmermann S. (2005) Forest storm damage is more frequent on acidific soils. *Annals of Forest Science* 62, 303-311.

Meredieu C., Stokes A., Cucchi V. (2009) L'apport de la modélisation à la prédiction de la stabilité des peuplements. Le cas du pin maritime dans les Landes de Gascogne. In *La forêt face aux tempêtes* (eds Y. Birot, G. Landmann, I. Bonhême), pp. 267-272. Editions Quae, Versailles.

Météo-France. Les vents violents. Accès août 2012

http://comprendre.meteofrance.com/pedagogique/dossiers/phenomenes/Les%20vents%20violents?page_id=13741

Najar M., Cremière L., Fraysse J.Y., et al. (2002) Sylviculture et résistance au vent des peuplements de pin maritime. Rapport final Projet ZE12. GIP ECOFOR-Région Aquitaine. AFOCEL Station territoriale Sud-Ouest. Les Vaseix. 80 p.

Ni Dhubhain A., Walshe J., Bulfin M., Keane M., Mills P. (2001) The initial development of a windthrow risk model for Sitka spruce in Ireland. *Forestry* 74 (2), 161-170.

Pardé J. & Bouchon J. (1988) *Dendrométrie* 2e édition. Edition Engref, Nancy, 328 p.

Peltola H., Kellomäki S., Väisänen H. & Ikonen V.-P. (1999) A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway Spruce and birch. *Canadian Journal of Forest Research* 29, 647-66.

Piton B. (2002) Facteurs de la sensibilité au vent des peuplements. Mémoire de fin d'études. Fif-Engref. 131p + annexes.

Renaud J.P. (2002) Première évaluation de la sensibilité des peuplements forestiers aux tempêtes à partir des dommages subis par le réseau européen. *Les cahiers du DSF* 1, 81-84.

Renaud J.P., Hervé J.C. (2005) Contribution à l'étude de l'effet « mélange » et « structure » des peuplements sur la sensibilité aux chablis. Note interne IFN Nancy, 21p.

Riou-Nivert P. (2001) Facteurs de stabilité des peuplements et gestion de l'équilibre. *Forêt Entreprise* 139, 17-25.

Riou-Nivert P., Hervé J.C., Belouard T., Renaud J.P., Paillassa E., Rosa J., Piton B., Mathevet A. (2005) Evaluation des facteurs de résistance au vent à l'aide des données de l'IFN. Application aux diagnostics de stabilité régionaux. Rapport final d'étude financée par le GIP ECOFOR (convention 2001.45 et avenant 2004.55) juillet 2005. 58 p.

Rosa J. (2004) Stabilité des peuplements réguliers résineux. *La sylviculture : 2e partie. Forêt-Entreprise* 157, 54-57.

Saporta G. (1990) La régression multiple et le modèle linéaire général. In *Probabilités, analyses des données et statistique* (ed G. Saporta), pp. 375-402. Editions Technip, Paris.

Schelhaas M.J., Nabuurs G.-J. & Schuck A. (2003) Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology* 9(11), 1620-1633.

Schmidt M., Hanewinkel M., Kändler G., Kublin E. & Kohnle U. (2010) An inventory-based approach for modeling single-tree storm damage – experiences with the winter storm 1999 in southwestern Germany. *Canadian Journal of Forest Research*, 40, 1636-1652.

Stach, N., Deshayes, M., Durrieu, S. (2005) Mapping clear-cutting in French forests by satellite remote sensing. Proceedings of ForestSat 2005, pp. 118-125. Accès février 2012 <http://shop.skogsstyrelsen.se/shop/9098/art94/4646094-fe1bbc-1742-1.pdf>

Stach, N, Deshayes, M. (2006) Les tempêtes : aléa, dommages aux forêts et impact sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers. Estimation des dégâts de tempête : l'œil, l'avion et le satellite in La forêt face aux tempêtes. Editions Quæ, Versailles.

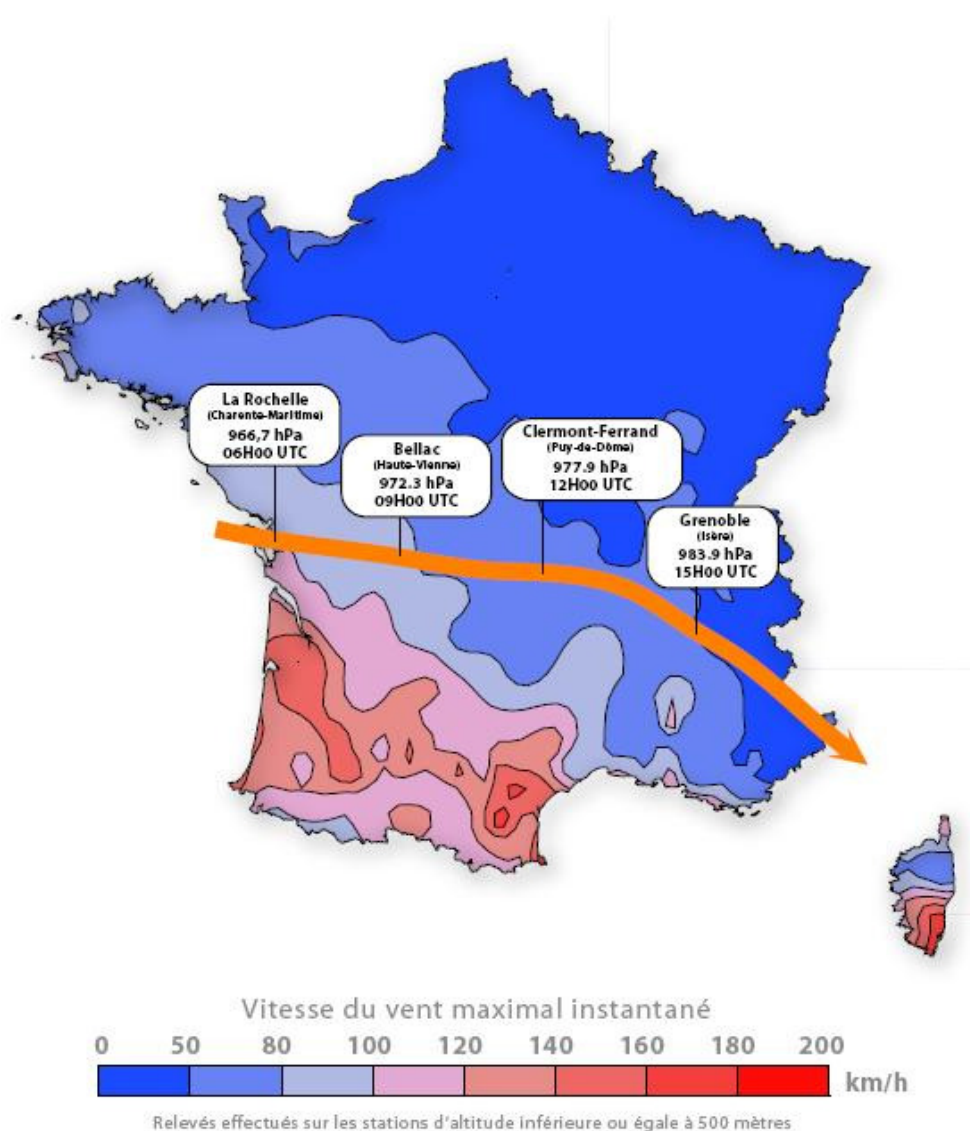
Venables W.N.& Ripley B.D. (2002) Modern Applied Statistics with S, fourth edition. Editions Springer, 495 p.

10. Annexes

10.1. Trajectoire du centre de la dépression de la tempête Klaus

Tempête du 24 janvier 2009

Trajectoire du centre de la dépression



10.2. Calcul de quelques données dendrométriques et stationnelles

$$\text{Diamètre quadratique moyen} = 2 \times \sqrt{\frac{\text{surface terrière moyenne}}{\Pi}}$$

$$\text{Espacement moyen} = \sqrt{\frac{20\,000}{\text{Nombre de tiges à l'hectare} \times \sqrt{3}}}$$

$$\text{Facteur d'élancement} = \frac{\text{hauteur moyenne}}{\text{diamètre quadratique moyen}}$$

$$\text{Hauteur de Lorey} = \frac{\sum_i (g_i \cdot p_i \cdot h_i)}{\sum_i (g_i \cdot p_i)}$$

avec

- g_i : surface terrière du i^{e} individu de la placette
- p_i : poids statistique du i^{e} individu
- h_i : hauteur du i^{e} individu.

$$\text{Hauteur du peuplement non dominant} = \frac{(NT \times H_m - 100 \times H_{\text{dom}})}{(NT - 100)}$$

avec

- NT : densité de tiges à l'ha
- H_m : hauteur moyenne arithmétique
- H_{dom} : hauteur dominante.

Ce calcul est possible dès lors que $NT > 100$ c'est-à-dire à chaque fois que l'on a pu calculer une hauteur dominante.

$$\text{Réserve utile (mm)} = (10 - \text{CAILLOUX}) \times [\text{PROF1} \times \text{CTEXT1} + (\text{PROF2} - \text{PROF1}) \times \text{CTEXT2}]$$

où CTEXT1 et CTEXT2 sont les coefficients de rétention en eau des deux horizons relevés et de profondeurs respectives PROF1 et PROF2 associés aux différentes textures. CAILLOUX correspond au pourcentage d'éléments grossiers dans le sol (1 pour 10%, 2 pour 20%...).

10.3. Nomenclature de quelques données écologiques et stationnelles

Niveau hydrique	
1	HYGROPHILE
2	MESOHYGROPHILE
3	HYGROCLINE
4	MESOHYGROCLINE
5	MESOPHILE FRAIS
6	MESOPHILE SEC
7	XEROCLINE
8	MESOXEROPHILE
9	XEROPHILE
10	HYPERXEROPHILE

Indice d'hydromorphie	
1	HYDROMORPHIE FORTE EN SURFACE
2	FORTE < 35 CM
3	FORTE ENTRE 35-64CM
4	FAIBLE OU HYDRO. FORTE >= 65 CM
5	NON HYDROMORPHE

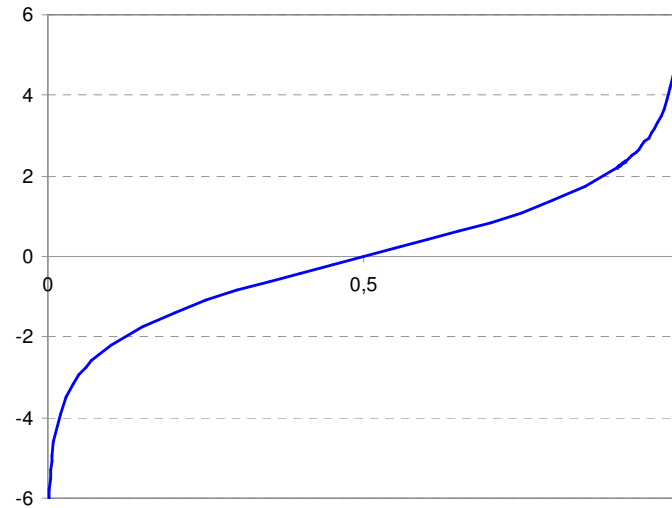
Indice d'acidité	
1	SOL CALCAIRE < 15 CM
2	SOL CALCAIRE 15-44 CM
3	SOL CALCAIRE >= 45 CM
4	ROCHE CALCAIRE < 65 CM
5	ROCHE CALCAIRE >= 65 CM
6	NON CALCAIRE - ARGILEUX
7	NON CALCAIRE - LIMONEUX
8	NON CALCAIRE - SABLEUX

Niveau trophique	
1	HYPERACIDIPHILE OU TRES ACIDIPHILE
2	ACIDIPHILE
3	FAIBLEMENT ACIDIPHILE (NIVEAU INTERMEDIAIRE)
4	MESOACIDIPHILE
5	ACIDICLINE
6	NEUTROACIDICLINE
7	MESONEUTROPHILE
8	NEUTROPHILE
9	NEUTROCALCICOLE (NIVEAU INTERMEDIAIRE)
10	CALCICOLE
11	CALCARICOLE

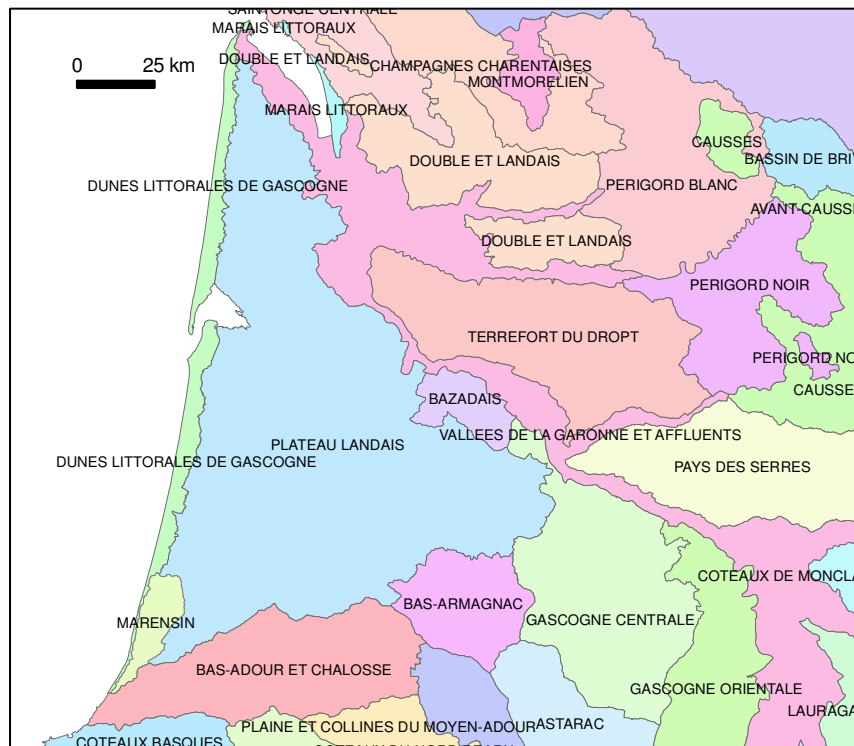
Type de sol (simplifié)	
1	SOL JEUNE
2	SOL CARBONATE
3	SOL CALCIQUE
4	SOL BRUNIFIE
5	SOL LESSIVE
6	SOL PODZOLISE
7	SOL FERSIALLITIQUE
8	SOL HYDROMORPHE
9	ABSENCE OU AUTRE

10.4. *Fonction logit*

$$\text{logit}(p) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) \text{ avec } p \in]0;1[$$



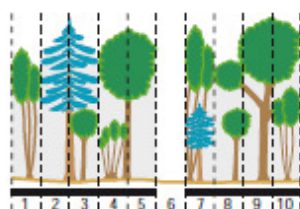
10.5. *Régions forestières en Aquitaine*



10.6. Couverts et taux de couvert

Couverts absolu, libre, relatif et libre relatif

Le taux de couvert est un des critères permettant de caractériser un peuplement. Il permet de décrire la composition* d'un peuplement (proportion de feuillus ou conifères, ou d'une essence). Le couvert représente la projection verticale des houppiers au sol et donne l'importance relative des espèces arborées d'un peuplement. L'évaluation du couvert est effectuée sur une placette de 20 ares (25 m de rayon) en ne s'intéressant qu'aux arbres recensables*.



Le taux de couvert absolu est ici de 90 % (9/10).

Le taux de **couvert absolu** d'un peuplement est égal à la somme des couverts des arbres recensables qui le composent rapportée à la superficie du site (toujours égale à dix).



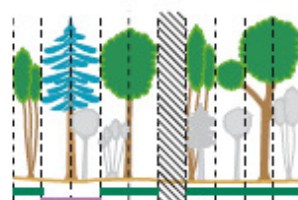
Le taux de couvert libre des feuillus est de 70 % (7/10), celui des conifères de 20 % (2/10).

Le taux de **couvert libre** d'un peuplement est égal à la somme des couverts des houppiers des arbres recensables qui ont accès à la lumière rapportée à la



Le sous-peuplement considéré correspond aux feuillus. Le taux de couvert relatif des feuillus est de 89 % (8/9).

Le taux de **couvert relatif** d'un sous-peuplement⁽⁴⁾ est égal à la somme des couverts absolus du sous-peuplement rapportée au couvert absolu de tout le peuplement.



Le taux de couvert libre relatif des feuillus est de 78 % (7/9).

Le taux de **couvert libre relatif** d'un sous-peuplement est égal à la somme des couverts libres du sous-peuplement rapportée au couvert absolu de tout le peuplement.

* Un arbre recensable est un arbre dont la circonférence à 1,30 m est supérieure ou égale à 23,5 cm.

10.7. Liste des facteurs analysés dans l'étude

Variable	Nature	Type	Description	Unité
age	Dendrométrie	Quantitative	Âge moyen du peuplement	années
cac	Dendrométrie	Ordinale	Classe d'âge	
clvh	Dendrométrie	Ordinale	Classe de volume à l'ha	
cvd	Dendrométrie	Quantitative	Coefficient de variation des diamètres	%
cvh	Dendrométrie	Quantitative	Coefficient de variation des hauteurs	%
ddom	Dendrométrie	Quantitative	Diamètre dominant	m
ddom2	Dendrométrie	Quantitative	Diamètre dominant du pin maritime	m
Diffhdom2.Hnondom2	Dendrométrie	Quantitative	Différence entre la hauteur dominante et la hauteur du peuplement non dominant pour le pin maritime	m
DiffHdomHlor	Dendrométrie	Quantitative	Différence entre la hauteur dominante et la hauteur de Lorey	m
DiffHdomHnondom	Dendrométrie	Quantitative	Différence entre la hauteur dominante et la hauteur du peuplement non dominant	m
dma	Dendrométrie	Quantitative	Diamètre moyen	m
dqm	Dendrométrie	Quantitative	Diamètre quadratique moyen	m
eldom	Dendrométrie	Quantitative	Facteur d'élancement du peuplement dominant	
eldom2	Dendrométrie	Quantitative	Facteur d'élancement du peuplement dominant du pin maritime	
els	Dendrométrie	Quantitative	Facteur d'élancement	
elsimp	Dendrométrie	Quantitative	Facteur d'élancement simplifié	
em	Dendrométrie	Quantitative	Espacement moyen des tiges	%
gdom	Dendrométrie	Quantitative	Surface terrière à l'hectare du peuplement dominant	m ² /ha
gdom2	Dendrométrie	Quantitative	Surface terrière à l'hectare du peuplement dominant du pin maritime	m ² /ha
gha	Dendrométrie	Quantitative	Surface terrière à l'hectare	m ² /ha
gm	Dendrométrie	Quantitative	Surface terrière moyenne	m ²
hdom	Dendrométrie	Quantitative	Hauteur dominante	m
hdom2	Dendrométrie	Quantitative	Hauteur dominante de l'essence principale	m
hdom2.log	Dendrométrie	Quantitative	Logarithme de la hauteur dominante de l'essence principale	
hdom51	Dendrométrie	Quantitative	Hauteur dominante du pin maritime	m
hdom51.log	Dendrométrie	Quantitative	Logarithme de la hauteur dominante du pin maritime	
hdomg	Dendrométrie	Quantitative	Hauteur dominante pondérée par la surface terrière	m
hdomg2	Dendrométrie	Quantitative	Hauteur dominante l'essence principale pondérée par la surface terrière	m
hlor	Dendrométrie	Quantitative	Hauteur de Lorey	m

hloress51	Dendrométrie	Quantitative	Hauteur de Lorey du pin maritime	m
hloress51.log	Dendrométrie	Quantitative	Logarithme de la hauteur de Lorey du pin maritime	
hloresspre	Dendrométrie	Quantitative	Logarithme de la hauteur de Lorey de l'essence principale	m
hlorLog	Dendrométrie	Quantitative	Logarithme de la hauteur de Lorey	
hm	Dendrométrie	Quantitative	Hauteur moyenne de l'arbre de surface terrière moyenne	m
hma	Dendrométrie	Quantitative	Hauteur moyenne	m
hnondom	Dendrométrie	Quantitative	Hauteur du peuplement non dominant	m
hnondom2	Dendrométrie	Quantitative	Hauteur du peuplement non dominant de l'essence principale	m
hnondomg	Dendrométrie	Quantitative	Hauteur du peuplement non dominant pondéré par la surface terrière	m
hnondomg2	Dendrométrie	Quantitative	Hauteur du peuplement non dominant du pin maritime pondéré par la surface terrière	m
lign1	Dendrométrie	Quantitative	Taux de couvert des ligneux bas	dixièmes
lign2	Dendrométrie	Quantitative	Taux de couvert des ligneux hauts	dixièmes
ntigha	Dendrométrie	Quantitative	Nombre de tiges à l'hectare	1/ha
ProportionVolnonpm	Dendrométrie	Quantitative	Proportion de volume autre que pin maritime	%
RapportHdomHlor	Dendrométrie	Quantitative	Rapport entre la hauteur dominante et la hauteur de Lorey	1
Ratiohdom2.Hnondom2	Dendrométrie	Quantitative	Rapport entre la hauteur dominante et la hauteur du peuplement non dominant pour l'essence principale	1
RatioHdomHnondom	Dendrométrie	Quantitative	Rapport entre la hauteur dominante et la hauteur du peuplement non dominant	1
s	Dendrométrie	Quantitative	Facteur d'espacement de Hart-Becking	%
tcar	Dendrométrie	Quantitative	Taux de couvert absolu du peuplement recensable (Annexe 10.6)	dixièmes
tcar.dist5	Dendrométrie	Quantitative	Ecart absolu au taux de couvert de 5/10 (5 - 5 - tcar)	dixièmes
vha	Dendrométrie	Quantitative	Volume à l'ha	m3/ha
vhanonpm	Dendrométrie	Quantitative	Volume des essences autres que pin maritime à l'ha	m3/ha
dep	Localisation	Qualitative	Département administratif	
regn	Localisation	Qualitative	Région forestière	
TurbDiffEst	Météorologique	Quantitative	Indice de turbulence 2 calculé à partir de la différence entre les deux vitesses de vent	km/h
TurbEst	Météorologique	Quantitative	Indice de turbulence 1 calculé à partir du rapport entre les deux vitesses de vent	1
VentMax10Est	Météorologique	Quantitative	Maximum de la vitesse moyenne du vent sur 10 min	km/h
VentMaxEst	Météorologique	Quantitative	Vitesse de vent instantanée maximum	km/h
abri	Paysage	Quantitative	Différence entre la hauteur moyenne des peuplements au vent et la hauteur moyenne sur la placette. Calcul effectué sur la base du transect le plus long sans trou à l'ouest de la placette de levé.	m

abri1	Paysage	Quantitative	Différence entre la hauteur moyenne des peuplements au vent et la hauteur moyenne sur la placette. Calcul effectué sur la base d'un transect de 1 km à l'ouest de la placette de levé.	m
abri2	Paysage	Quantitative	Différence entre la hauteur moyenne des peuplements au vent et la hauteur moyenne sur la placette. Calcul effectué sur la base d'un transect de 2 km à l'ouest de la placette de levé.	m
abri3	Paysage	Quantitative	Différence entre la hauteur moyenne des peuplements au vent et la hauteur moyenne sur la placette. Calcul effectué sur la base d'un transect de 3 km à l'ouest de la placette de levé.	m
abri4	Paysage	Quantitative	Différence entre la hauteur moyenne des peuplements au vent et la hauteur moyenne sur la placette. Calcul effectué sur la base d'un transect de 4 km à l'ouest de la placette de levé.	m
abri5	Paysage	Quantitative	Différence entre la hauteur moyenne des peuplements au vent et la hauteur moyenne sur la placette. Calcul effectué sur la base d'un transect de 5 km à l'ouest de la placette de levé.	m
abriK1	Paysage	Quantitative	Différence entre la hauteur moyenne des peuplements au vent après la tempête Klaus et la hauteur moyenne sur la placette. Calcul effectué sur la base du transect le plus long sans trou à l'ouest de la placette de levé. Prise en compte de la tempête Klaus : hauteur des peuplements au vent diminuée du taux de dégâts médian de la classe	m
abriK1p1	Paysage	Quantitative	Différence entre la hauteur moyenne des peuplements au vent après la tempête Klaus et la hauteur moyenne sur la placette. Calcul effectué sur la base du transect le plus long sans trou à l'ouest de la placette de levé. Prise en compte de la tempête Klaus : hauteur des peuplements au vent diminuée du taux de dégâts médian de la classe. Pondération des points par l'inverse de la distance.	m
abriK1p2	Paysage	Quantitative	Différence entre la hauteur moyenne des peuplements au vent après la tempête Klaus et la hauteur moyenne sur la placette. Calcul effectué sur la base du transect le plus long sans trou à l'ouest de la placette de levé. Prise en compte de la tempête Klaus : hauteur des peuplements au vent diminuée du taux de dégâts médian de la classe. Pondération des points par l'inverse du carré de la distance.	m
abriK2	Paysage	Quantitative	Différence entre la hauteur moyenne des peuplements au vent après la tempête Klaus et la hauteur moyenne sur la placette. Calcul effectué sur la base du transect le plus long sans trou à l'ouest de la placette de levé. Prise en compte de la tempête Klaus : hauteur des peuplements au vent nulle si taux de dégâts > 60%	m

abriK2p1	Paysage	Quantitative	Différence entre la hauteur moyenne des peuplements au vent après la tempête Klaus et la hauteur moyenne sur la placette. Calcul effectué sur la base du transect le plus long sans trou à l'ouest de la placette de levé. Prise en compte de la tempête Klaus : hauteur des peuplements au vent nulle si taux de dégâts > 60%. Pondération des points par l'inverse de la distance.	m
abriK2p2	Paysage	Quantitative	Différence entre la hauteur moyenne des peuplements au vent après la tempête Klaus et la hauteur moyenne sur la placette. Calcul effectué sur la base du transect le plus long sans trou à l'ouest de la placette de levé. Prise en compte de la tempête Klaus : hauteur des peuplements au vent nulle si taux de dégâts > 60%. Pondération des points par l'inverse du carré de la distance.	m
abrip1	Paysage	Quantitative	Différence entre la hauteur moyenne des peuplements au vent et la hauteur moyenne sur la placette. Calcul effectué sur la base du transect le plus long sans trou à l'ouest de la placette de levé. Pondération des points par l'inverse de la distance.	m
abrip2	Paysage	Quantitative	Différence entre la hauteur moyenne des peuplements au vent et la hauteur moyenne sur la placette. Calcul effectué sur la base du transect le plus long sans trou à l'ouest de la placette de levé. Pondération des points par le carré de l'inverse de la distance.	m
marche	Paysage	Quantitative	Nombre de marches de plus de 10 m sur le transect au vent (à l'ouest) le plus long sans trou (longueur maximale : 5 km)	1
marcheK1	Paysage	Quantitative	Nombre de marches de plus de 10 m sur le transect au vent (à l'ouest) le plus long sans trou (longueur maximale : 5 km). Situation après tempête : hauteur diminué de la médiane de la classe de dégâts.	1
marcheK2	Paysage	Quantitative	Nombre de marches de plus de 10 m sur le transect au vent (à l'ouest) le plus long sans trou (longueur maximale : 5 km). Situation après tempête : hauteur nulle si dégâts > 60%	1
marchen	Paysage	Quantitative	Nombre de marches négatives de plus de 10 m sur le transect au vent (à l'ouest) le plus long sans trou (longueur maximale : 5 km)	1
marchenK1	Paysage	Quantitative	Nombre de marches négatives de plus de 10 m sur le transect au vent (à l'ouest) le plus long sans trou (longueur maximale : 5 km). Situation après tempête : hauteur diminué de la médiane de la classe de dégâts.	1
marchenK2	Paysage	Quantitative	Nombre de marches négatives de plus de 10 m sur le transect au vent (à l'ouest) le plus long sans trou (longueur maximale : 5 km). Situation après tempête : hauteur nulle si dégâts > 60%	1
marchep	Paysage	Quantitative	Nombre de marches positives de plus de 10 m sur le transect au vent (à l'ouest) le plus long sans trou (longueur maximale : 5 km)	1

marchepK1	Paysage	Quantitative	Nombre de marches positives de plus de 10 m sur le transect au vent (à l'ouest) le plus long sans trou (longueur maximale : 5 km). Situation après tempête : hauteur diminué de la médiane de la classe de dégâts.	1
marchepK2	Paysage	Quantitative	Nombre de marches positives de plus de 10 m sur le transect au vent (à l'ouest) le plus long sans trou (longueur maximale : 5 km). Situation après tempête : hauteur nulle si dégâts > 60%	1
paysage	Paysage	Quantitative	rugosité/abri	1
paysage1	Paysage	Quantitative	rugosité1/abri1	1
paysage2	Paysage	Quantitative	rugosité2/abri2	1
paysage3	Paysage	Quantitative	rugosité3/abri3	1
paysage4	Paysage	Quantitative	rugosité4/abri4	1
paysage5	Paysage	Quantitative	rugosité5/abri5	1
paysageK1	Paysage	Quantitative	rugositéK1/abriK1	1
paysageK1p1	Paysage	Quantitative	rugositéK1p1/abriK1p1	1
paysageK1p2	Paysage	Quantitative	rugositéK1p2/abriK1p2	1
paysageK2	Paysage	Quantitative	rugositéK2/abriK2	1
paysageK2p1	Paysage	Quantitative	rugositéK2p1/abriK2p1	1
paysageK2p2	Paysage	Quantitative	rugositéK2p2/abriK2p2	1
paysagep1	Paysage	Quantitative	rugositép1/abrip1	1
paysagep2	Paysage	Quantitative	rugositép2/abrip2	1
rugosité	Paysage	Quantitative	Ecart-type des hauteurs moyennes des peuplements au vent. Calcul effectué sur la base du transect le plus long sans trou à l'ouest de la placette de levé.	m
rugosité1	Paysage	Quantitative	Ecart-type des hauteurs moyennes des peuplements au vent. Calcul effectué sur la base d'un transect de 1 km à l'ouest de la placette de levé.	m
rugosité2	Paysage	Quantitative	Ecart-type des hauteurs moyennes des peuplements au vent. Calcul effectué sur la base d'un transect de 2 km à l'ouest de la placette de levé.	m
rugosité3	Paysage	Quantitative	Ecart-type des hauteurs moyennes des peuplements au vent. Calcul effectué sur la base d'un transect de 3 km à l'ouest de la placette de levé.	m
rugosité4	Paysage	Quantitative	Ecart-type des hauteurs moyennes des peuplements au vent. Calcul effectué sur la base d'un transect de 4 km à l'ouest de la placette de levé.	m
rugosité5	Paysage	Quantitative	Ecart-type des hauteurs moyennes des peuplements au vent. Calcul effectué sur la base d'un transect de 5 km à l'ouest de la placette de levé.	m

rugositéK1	Paysage	Quantitative	Ecart-type des hauteurs moyennes des peuplements au vent. Calcul effectué sur la base du transect le plus long sans trou à l'ouest de la placette de levé. Prise en compte de la tempête Klaus : hauteur des peuplements au vent diminuée du taux de dégâts médian de la classe	m
rugositéK1p1	Paysage	Quantitative	Ecart-type des hauteurs moyennes des peuplements au vent. Calcul effectué sur la base du transect le plus long sans trou à l'ouest de la placette de levé. Prise en compte de la tempête Klaus : hauteur des peuplements au vent diminuée du taux de dégâts médian de la classe. Pondération des points par l'inverse de la distance.	m
rugositéK1p2	Paysage	Quantitative	Ecart-type des hauteurs moyennes des peuplements au vent. Calcul effectué sur la base du transect le plus long sans trou à l'ouest de la placette de levé. Prise en compte de la tempête Klaus : hauteur des peuplements au vent diminuée du taux de dégâts médian de la classe. Pondération des points par l'inverse du carré de la distance.	m
rugositéK2	Paysage	Quantitative	Ecart-type des hauteurs moyennes des peuplements au vent. Calcul effectué sur la base du transect le plus long sans trou à l'ouest de la placette de levé. Prise en compte de la tempête Klaus : hauteur des peuplements au vent nulle si taux de dégâts > 60%	m
rugositéK2p1	Paysage	Quantitative	Ecart-type des hauteurs moyennes des peuplements au vent. Calcul effectué sur la base du transect le plus long sans trou à l'ouest de la placette de levé. Prise en compte de la tempête Klaus : hauteur des peuplements au vent nulle si taux de dégâts > 60%. Pondération des points par l'inverse de la distance.	m
rugositéK2p2	Paysage	Quantitative	Ecart-type des hauteurs moyennes des peuplements au vent. Calcul effectué sur la base du transect le plus long sans trou à l'ouest de la placette de levé. Prise en compte de la tempête Klaus : hauteur des peuplements au vent nulle si taux de dégâts > 60%. Pondération des points par l'inverse du carré de la distance.	m
rugositép1	Paysage	Quantitative	Ecart-type des hauteurs moyennes des peuplements au vent. Calcul effectué sur la base du transect le plus long sans trou à l'ouest de la placette de levé. Pondération des points par l'inverse de la distance.	m
rugositép2	Paysage	Quantitative	Ecart-type des hauteurs moyennes des peuplements au vent. Calcul effectué sur la base du transect le plus long sans trou à l'ouest de la placette de levé. Pondération des points par le carré de l'inverse de la distance.	m
comp2	Peuplement	Qualitative	Composition du peuplement	
comp3	Peuplement	Qualitative	Composition du peuplement	
comp3_r	Peuplement	Qualitative	Composition du peuplement	
compsimp_r	Peuplement	Qualitative	Composition du peuplement	
coupe	Peuplement	Qualitative	Indicateur de coupe	

csa	Peuplement	Qualitative	Couverture du sol	
csli	Peuplement	Qualitative	Couverture du sol au-delà de la lisière	
dc2	Peuplement	Qualitative	Type de coupe (pas de coupe, coupe rase, autre coupe)	
div_rg1	Peuplement	Qualitative	Diversité du peuplement (1 essence, 2, 3 et plus de 3)	
diversite	Peuplement	Binaire	Peuplement pur ou mélangé	
eli	Peuplement	Quantitative	Exposition de la lisière	
esspre	Peuplement	Qualitative	Essence principale	
esspre_fr	Peuplement	Qualitative	Groupe de l'essence principale (feuillu vs. résineux)	
esspregpe3	Peuplement	Qualitative	Groupe de l'essence principale	
pli	Peuplement	Binaire	Présence ou non d'une lisière	
sfo_nm	Peuplement	Qualitative	Structure du peuplement (taillis, futaie régulière, futaie irrégulière, mélange, pas de structure)	
tplantf	Peuplement	Qualitative	Type de plantation (en bande, régulière, pas de plantation, sous abri)	
volcoupe	Peuplement	Quantitative	Volume coupé à l'ha (estimation entre les levés et les retours en 2009)	m3/ha
CsN	Station	Quantitative	Rapport C/N bio-indiqué	
expo	Station	Quantitative	Exposition de la placette	
HautDom40	Station	Quantitative	Fertilité basée sur la hauteur dominante atteinte à 40 ans	m
hydr	Station	Qualitative	Niveau hydrique bio-indiqué par la flore pris en valeur continue	
hydr2	Station	Qualitative	Niveau hydrique bio-indiqué par la flore	
hydromorphie	Station	Binaire	Sol hydromorphe ou non	
indic_acid	Station	Qualitative	Indice d'acidité	
indic_hydro	Station	Qualitative	Indice d'hydromorphie	
pent2	Station	Quantitative	Pente	%
Pente	Station	Binaire	Placette en pente ou sur terrain plat	
pH	Station	Quantitative	pH bio-indiqué de la placette	1
prof2	Station	Quantitative	Profondeur de sondage à la tarière	dm
reserutile	Station	Quantitative	Réserve utile	mm
SatSol	Station	Quantitative	Taux de saturation du sol bio-indiqué	1
topo	Station	Qualitative	Topographie	
topog1	Station	Qualitative	Topographie (nomenclature regroupée)	
troph	Station	Qualitative	Niveau trophique bio-indiqué par la flore	
tsol	Station	Qualitative	Type de sol	
tsolg1	Station	Qualitative	Type de sol	

10.8. *Script SQL d'extraction et de calcul des données issues de la base de données de l'inventaire forestier IGN*

```
-- Etude stabilité : extraction des données IFN
-- Thierry Bélouard, février 2011, modifié en avril 2011, octobre 2011,
-- juin et juillet 2012
-- Dans cette version, le facteur de répétition (REP) n'a pas été pris en
-- compte pour les variables peuplement

-- 1 - Placettes disposant d'informations relatives à la tempête Klaus
-- (terrain et/ou PI ponctuelle) avec leur localisation

create temporary table placette0 as
select P1.npp, N.incref, N.dep, P2.regn, P1.xl as xln, P1.yl as yln, N.zp
as zpn,
case when N.zp >= '0' and N.zp <='100' then '1' when N.zp > '100' and N.zp
<= '200' then '2' when N.zp > '200' and N.zp <= '300' then '3'
when N.zp > '300' and N.zp <= '400' then '4' when N.zp > '400' and N.zp <=
'500' then '5' when N.zp > '500' and N.zp <= '600' then '6'
when N.zp > '600' and N.zp <= '700' then '7' when N.zp > '700' and N.zp <=
'800' then '8' when N.zp > '800' and N.zp <= '900' then '9'
when N.zp > '900' and N.zp <= '1000' then '10' when N.zp > '1000' then '11'
else N.zp end as czpn, /*coordonnées du noeud et altitude*/
P2.datepoint,
P2.zonek, P2.zonek2, F.revisk, infok, levek, qdegats, qdegats_t,
qdegats_pi, arbrek, odeg, degatk
from inv_exp_nm.elnoeud as N
inner join inv_exp_nm.elpoint as P1 /*point de phase 1*/ on N.nppg =
P1.nppg
inner join inv_exp_nm.e2point as P2 on P1.npp = P2.npp
inner join inv_exp_nm.g3foret as F on P2.npp = F.npp
where P2.zonek = '1' /*Zone de retour tempête*/ and F.revisk = '1' and
F.infok in ('1', '2', '3');

-- 2 - Données des placettes

create temporary table placette as
select P.*, /*identifiant de la placette, sa localisation et les données
tempête Klaus*/ P2.csa,
-- Structure, composition, essence principale, diversité du peuplement
F.sfo_nm, GpeComp2.gmode as comp2, GpeComp3.gmode as comp3, F.comp3_r,
F.compsimp_r, F.esspre_fr, GpeEssPre.gmode as EssPreGpe3, F.esspre,
F.esparpre, F.div_rgl, F.div_r, F.tplantf,
F.cac, case when F.cac in ('NR', 'AA') then null else round(classe +
etendue/2, 0) end as AgeMedian,
F.qage, F.ess_age_1,
-- Couvert absolu du peuplement, couvert des ligneux haut et bas
F.tcar, E.lign1, E.lign2,
-- Coupe
/*F.dc, */case when F.dc is null then '0' when F.dc in ('1', '2', '3', '4')
then 'R' when F.dc in ('5', '8', '9') then 'A' else F.dc end as dc2,
/*détail de coupe*/
-- lisière
--F.ell, F.utla, F.csla, F.plisi, F.cslisi, F.elisi,
case when F.ell is not null then '1' when F.plisi in ('1', '2') then '1'
else '0' end as pli,
case when F.ell is null then F.elisi else F.ell end as eli,
```

```

case when F.csla = '8' then '9' when F.csla = '7' then 'SV' when F.csla in
('A','B','C','D') then '6' when F.csla = '4' then '4' when F.cslisi in ('7',
'8') then 'SV' else F.cslisi end as csli,
F.hlor as hlor0, F.clvh,
-- Données écologiques : exposition, topographie, hydromorphie, type de
sol, profondeur de sondage, réserve utile
E.expo, E.topogl, E.topo, E.pent2, E.indic_hydro, E.tsolgl, E.tsol,
E.prof2, E.rut, E.reserutile, E.troph, E.indic_acid, E.hydr
from placette0 as P
inner join inv_exp_nm.e2point as P2 on P.npp = P2.npp
inner join inv_exp_nm.g3foret as F on P2.npp = F.npp
inner join metaifn.abmode as MA on MA.unite = 'CAC' and MA.mode = F.cac
left join metaifn.abgroupe as GpeComp2 on GpeComp2.gunite = 'COMPD1' and
GpeComp2.unite = 'COMP' and F.comp3_r = GpeComp2.mode
left join metaifn.abgroupe as GpeComp3 on GpeComp3.gunite = 'COMPD0' and
GpeComp3.unite = 'COMP' and F.comp3_r = GpeComp3.mode
left join metaifn.abgroupe as GpeEssPre on GpeEssPre.gunite = 'ESSD3' and
GpeEssPre.unite = 'ESS' and F.esspre = GpeEssPre.mode
inner join inv_exp_nm.g3ecologie as E on F.npp = E.npp;

-- 3 - Dendrométrie : calcul à partir des arbres levés

-- 3.1 - Arbres de toutes essences

create temporary table dendro0 as
select P.npp,
sum(A.w*A.vdeg/A.rep)/sum(A.w*A.vak/A.rep) as TauxDegat,
sum(A.w*A.gdeg/A.rep)/sum(A.w*A.gak/A.rep) as TauxDegatG,
count(*) as NbA, sum(A.w) as NTigHa, sqrt(20000 / ( sum(A.w)* sqrt(3))) as
EM,
sum(w*gak) as GHa, sum(w*vak) as VHa, /*surface terrière et volume sur pied
avant Klaus*/
-- Dimensions moyennes
sum(w*htot/A.rep)/sum(w/A.rep) as HMA,
sum(w*gak*htot/A.rep)/sum(w*gak/A.rep) as Hlor,
sum(w*d13/A.rep)/sum(w/A.rep) as DMA, sum(w*gak/A.rep)/sum(w/A.rep) as GM,
-- Diamètre quadratique moyen
2*sqrt((sum(w*gak/A.rep)/sum(w/A.rep))/pi()) as DQM,
-- Variance des diamètres et covariance des diamètres et hauteurs à un
facteur près, la densité de tiges
sum(w*d13*d13/A.rep) -
sum(w/A.rep)*(sum(w*d13/A.rep)/sum(w/A.rep))*(sum(w*d13/A.rep)/sum(w/A.rep)
) as SDD,
sum(w*d13*htot/A.rep) -
sum(w/A.rep)*(sum(w*d13/A.rep)/sum(w/A.rep))*(sum(w*htot/A.rep)/sum(w/A.rep)
) as SDH,
sum(w*htot*htot/A.rep) -
sum(w/A.rep)*(sum(w*htot/A.rep)/sum(w/A.rep))*(sum(w*htot/A.rep)/sum(w/A.re
p)) as SHH
-- , sum(w*d13*d13)/sum(w) - (sum(w*d13)/sum(w))*(sum(w*d13)/sum(w)) as SDD

from placette as P
inner join inv_exp_nm.g3foret as F on P.npp = F.npp
inner join inv_exp_nm.g3arbre as A on F.npp = A.npp
where P.arbrek = '1' and degati <> '2'
group by P.npp;

create temporary table dendro as
select *,
case when sdd > 0 then hma + (sdh/sdd)*(dqm - dma) else hma end as hm,

```

```
case when sdd > 0 then hma + (sdh/sdd)*(dqm - dma) else hma end/dqm as els,
hma/dqm as elsimp
```

```
from dendro0;
```

```
-- 3.2 - taux de dégâts et hauteur de Lorey pour les arbres de l'essence
principale (avril 2011, juillet 2012)
```

```
create temporary table dendroEssPre as
select P.npp,
sum(w*gak*htot/A.rep)/sum(w*gak/A.rep) as HlorEssPre,
sum(A.w*A.vdeg/A.rep)/sum(A.w*A.vak/A.rep) as TauxDegatEssPre,
sum(A.w*A.gdeg/A.rep)/sum(A.w*A.gak/A.rep) as TauxDegatEssPreG
from placette as P
inner join inv_exp_nm.g3foret as F on P.npp = F.npp
inner join inv_exp_nm.g3arbre as A on F.npp = A.npp
where P.arbrek = '1' and degati <> '2' and F.esspre = A.ess
group by P.npp;
```

```
-- 3.3 - taux de dégâts et hauteur de Lorey pour le pin maritime (octobre
2011, juillet 2012)
```

```
create temporary table dendroEss51 as
select P.npp,
sum(w*gak*htot/A.rep)/sum(w*gak/A.rep) as HlorEss51,
sum(A.w*A.vdeg/A.rep)/sum(A.w*A.vak/A.rep) as TauxDegatEss51,
sum(A.w*A.gdeg/A.rep)/sum(A.w*A.gak/A.rep) as TauxDegatEss51G
from placette as P
inner join inv_exp_nm.g3foret as F on P.npp = F.npp
inner join inv_exp_nm.g3arbre as A on F.npp = A.npp
where P.arbrek = '1' and degati <> '2' and A.ess = '51'
group by P.npp;
```

```
-- 3.4 - Placettes avec au moins un pin maritime levé
```

```
create temporary table PMpresent as
select P.npp as nppPM
from placette as P
inner join inv_exp_nm.g3foret as F on P.npp = F.npp
inner join inv_exp_nm.g3arbre as A on F.npp = A.npp
where P.arbrek = '1' and degati <> '2' and A.ess = '51'
group by P.npp;
```

```
-- 3.5 - Volume des non Pin maritime
```

```
create temporary table VolNonPM as
select P.npp, sum(w*vak) as VHaNonPM
from placette as P
inner join inv_exp_nm.g3foret as F on P.npp = F.npp
inner join inv_exp_nm.g3arbre as A on F.npp = A.npp
where P.arbrek = '1' and degati <> '2' and F.esspre = A.ess and A.ess <>
'51'
group by P.npp;
```

```
-- 4 - Hauteur dominante
```

```
-- 4.1 - Détermination à partir de toutes les essences
```

```

-- Données des arbres vifs levés
create temporary table arbre as
select P.npp, A.a, A.w/A.rep as w, A.c13, A.gak, a.htot          /*Pas de
prise en compte du facteur de répétition rep car calcul d'une donnée
peuplement*/
from placette as P
inner join inv_exp_nm.g3arbre as A on P.npp = A.npp
where P.arbrek = '1' and A.degati <> '2';

-- calcul de la hauteur dominante
create temporary table HDom as
select a.npp, a.a, a.w, a.c13, a.gak, a.htot, count(*) as NbA, sum(b.w) as
wc,
sum(b.w * b.gak) + (100 - sum(b.w)) * a.gak as gdom,
(sum(b.w * b.htot) + (100 - sum(b.w)) * a.htot) / 100 as hdom,
(sum(b.w * b.gak * b.htot) + (100 - sum(b.w)) * a.gak * a.htot) / (sum(b.w
* b.gak) + (100 - sum(b.w)) * a.gak) as hdomg
from arbre as a
inner join arbre as b on (a.npp = b.npp and (a.c13 < b.c13 or (a.c13 =
b.c13 and a.a < b.a)))
group by a.npp, a.a, a.w, a.c13, a.gak, a.htot
having (sum(b.w) < 100) and ((a.w + sum(b.w)) >= 100);

-- 4.2 - Détermination à partir de l'essence principale

-- Données des arbres vifs levés
create temporary table arbre2 as
select P.npp, A.a, A.w/A.rep as w, A.c13, A.gak, A.htot          /*Pas de
prise en compte du facteur de répétition rep car calcul d'une donnée
peuplement*/
from placette as P
inner join inv_exp_nm.g3foret as F on P.npp = F.npp
inner join inv_exp_nm.g3arbre as A on P.npp = A.npp
where P.arbrek = '1' and A.degati <> '2' and F.esspre = A.ess;

-- calcul de la hauteur dominante
create temporary table HDom2 as
select a.npp, a.a, a.w, a.c13, a.gak, a.htot, count(*) as NbA, sum(b.w) as
wc,
sum(b.w * b.gak) + (100 - sum(b.w)) * a.gak as gdom,
(sum(b.w * b.htot) + (100 - sum(b.w)) * a.htot) / 100 as hdom,
(sum(b.w * b.gak * b.htot) + (100 - sum(b.w)) * a.gak * a.htot) / (sum(b.w
* b.gak) + (100 - sum(b.w)) * a.gak) as hdomg
from arbre2 as a
inner join arbre2 as b on (a.npp = b.npp and (a.c13 < b.c13 or (a.c13 =
b.c13 and a.a < b.a)))
group by a.npp, a.a, a.w, a.c13, a.gak, a.htot
having (sum(b.w) < 100) and ((a.w + sum(b.w)) >= 100);

-- 4.3 - Détermination pour le pin maritime

-- Données des arbres vifs levés
create temporary table arbre51 as
select P.npp, A.a, A.w/A.rep as w, A.c13, A.gak, A.htot          /*Pas de
prise en compte du facteur de répétition rep car calcul d'une donnée
peuplement*/

```

```

from placette as P
inner join inv_exp_nm.g3foret as F on P.npp = F.npp
inner join inv_exp_nm.g3arbre as A on P.npp = A.npp
where P.arbrek = '1' and A.degati <> '2' and A.ess = '51';

-- calcul de la hauteur dominante
create temporary table HDom51 as
select a.npp, a.a, a.w, a.c13, a.gak, a.htot, count(*) as NbA, sum(b.w) as
wc,
sum(b.w * b.gak) + (100 - sum(b.w)) * a.gak as gdom,
(sum(b.w * b.htot) + (100 - sum(b.w)) * a.htot) / 100 as hdom,
(sum(b.w * b.gak * b.htot) + (100 - sum(b.w)) * a.gak * a.htot) / (sum(b.w
* b.gak) + (100 - sum(b.w)) * a.gak) as hdomg
from arbre51 as a
inner join arbre51 as b on (a.npp = b.npp and (a.c13 < b.c13 or (a.c13 =
b.c13 and a.a < b.a)))
group by a.npp, a.a, a.w, a.c13, a.gak, a.htot
having (sum(b.w) < 100) and ((a.w + sum(b.w)) >= 100);

-- 5 - Volume coupé entre les levés et la tempête Klaus

create temporary table coupe as
select P.npp, sum(A.w*A.v) as VolCoupe
from placette as P
inner join inv_exp_nm.g3arbre as A on P.npp = A.npp
where P.arbrek = '1' and degati = '2'
group by P.npp;

-- Requête récapitulative

select P.*, D.*, DEP.HLorEssPre, DE51.HLorEss51, DEP.TauxDegatEssPre,
DEP.TauxDegatEssPreG, DE51.TauxDegatEss51, DE51.TauxDegatEss51G,
sqrt(4*HDom.gdom/(100*pi())) as Ddom, sqrt(4*HDom2.gdom/(100*pi())) as
Ddom2,
HDom.gdom, HDom2.gdom as gdom2, HDom.hdom, HDom.hdomg, HDom2.hdom as hdom2,
HDom2.hdomg as hdomg2, HDom51.HDom as HDom51,
(D.gha*D.hlor - HDom.gdom*HDom.hdom)/(D.gha - HDom.gdom) as hnondomg,
(D.gha*D.hlor - HDom2.gdom*HDom2.hdom)/(D.gha - HDom2.gdom) as hnondomg2,
VNPM.VHaNonPM, PMp.nppPM,
case when sdd < 0 then 0 else sqrt(sdd/NTigHa) end/dma as cvd, case when
shh < 0 then 0 else sqrt(shh/NTigHa) end/hma as cvh, C.VolCoupe,
HDom.hdom/sqrt(4*HDom.gdom/(100*pi())) as eldom,
HDom2.hdom/sqrt(4*HDom2.gdom/(100*pi())) as eldom2
from placette as P
left join dendro as D on P.npp = D.npp
left join dendroEssPre as DEP on P.npp = DEP.npp
left join dendroEss51 as DE51 on P.npp = DE51.npp
left join PMpresent as PMp on P.npp = PMp.nppPM
left join VolNonPM as VNPM on P.npp = VNPM.npp
left join coupe as C on P.npp = C.npp
left join HDom on P.npp = HDom.npp
left join HDom2 on P.npp = HDom2.npp
left join HDom51 on P.npp = HDom51.npp;

```