



HAL
open science

Outils de simulation et d'évaluation des risques tempêtes pour les forêts : les progrès acquis dans les différentes disciplines

Céline Meredieu, Yves Brunet, Frederic F. Danjon, Pauline P. Defossez, Sylvain Dupont, Kana Kamimura, Barry Gardiner

► To cite this version:

Céline Meredieu, Yves Brunet, Frederic F. Danjon, Pauline P. Defossez, Sylvain Dupont, et al.. Outils de simulation et d'évaluation des risques tempêtes pour les forêts : les progrès acquis dans les différentes disciplines. *Innovations Agronomiques*, 2014, 41, pp.43-56. hal-02629752

HAL Id: hal-02629752

<https://hal.inrae.fr/hal-02629752>

Submitted on 27 May 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Outils de simulation et d'évaluation des risques tempêtes pour les forêts : les progrès acquis dans les différentes disciplines

Meredieu C.^{1,2}, Brunet Y.^{3,4}, Danjon F.^{1,2}, Défossez P.^{3,4}, Dupont S.^{3,4}, Kamimura K.^{3,4},
Gardiner B.^{3,4}

¹ INRA, UMR1202 BIOGECO, 69 route d'Arcachon, F-33612 Cestas cedex

² Univ. Bordeaux, BIOGECO, UMR 1202, F-33615 Pessac

³ INRA, UMR1391 ISPA, F-33882 Villenave d'Ornon cedex

⁴ Bordeaux Sciences Agro, UMR 1391 ISPA, F-33170 Gradignan

Correspondance : Celine.Meredieu@pierroton.inra.fr

Résumé

Les tempêtes Martin (1999) et Klaus (2009) ont durement touché la forêt landaise et mis en difficulté toute la filière forêt-bois régionale. La nécessaire réévaluation et adaptation du secteur forestier à la menace que constituent les tempêtes a mobilisé la recherche pour construire les bases des connaissances sur la stabilité des arbres et des peuplements forestiers. Tout d'abord une des voies de recherche est la prise en compte de la turbulence dans des contextes hétérogènes plus larges. Les outils de simulation atmosphérique ont permis de modéliser les interactions vent-arbre dans des contextes plus réalistes. Par ailleurs, la modélisation mécanique de l'ancrage des arbres a progressé, permettant de simuler la chronologie des endommagements de racines lors d'un chablis. Ces modèles utilisent des architectures de systèmes racinaires obtenues lors d'études expérimentales d'analyse de la stabilité des arbres. Dans ce domaine, l'effort porte sur la compréhension de la mise en place des systèmes racinaires selon les pratiques sylvicoles. Enfin, les modèles statistiques tout comme les modèles mécanistes hybrides nécessaires à l'évaluation des risques bénéficient à la fois de toutes ces avancées concernant les mécanismes des interactions entre vent, canopée et sol, et de meilleures données de description des peuplements ou des massifs.

Mots-clés : ancrage racinaire, stabilité de peuplement, écoulement atmosphérique, vent, *Pinus pinaster* Ait., GALES

Abstract: Simulation and decision-making tools for forest wind risk: the latest scientific progresses in different disciplines

Storms Martin (1999) and Klaus (2009) caused catastrophic damages to forests in the Landes area of Aquitaine, and disrupted the forest-based sector in the region. Therefore, it is urgent and important to re-evaluate the forest storm risk and analyze the adaptation of trees and forests to severe storm conditions by increasing our knowledge of tree and forest stability. There are three parts to our ongoing work. First, turbulence over heterogeneous landscape was analyzed at a large scale and a detailed airflow model was used to examine the mechanistic interaction between airflow and tree motion. Second, a tree anchorage mechanistic model was created in order to simulate sequential patterns of root damage caused by windthrow. The model particularly focuses on root architecture using results from field measurement. In this research area, the effort focuses on understanding the development of root systems due to different silvicultural practices. Third, a damage statistical model and a hybrid mechanistic/empirical wind damage assessment model benefit from the scientific advances on the interaction between wind, canopy and soil and are used to analyze wind damage risk at the stand and landscape levels.

Keywords: root anchorage, stand stability, airflow, wind, *Pinus pinaster* Ait., GALES

Introduction

Une revue de la littérature européenne entre 1950 et 2000 montre que le volume annuel moyen de bois détruit est de 35 millions de m³ avec la répartition suivante : 53% liés aux tempêtes, 16% au feu, 8% aux scolytes et 8% aux autres facteurs biotiques (Schelhaas, 2008). Les tempêtes hivernales sont donc un phénomène répandu en Europe et sont considérées comme un facteur majeur de perturbation. Dans le Sud-Ouest de la France, deux grandes tempêtes ont récemment causé en moins de dix ans d'énormes pertes de bois. Les 27 et 28 décembre 1999, la tempête Martin a occasionné environ 28 millions de m³ de dégâts en Aquitaine mais aussi dans une large moitié sud de la France. Elle avait été précédée, quelques heures auparavant, par une autre tempête (Lothar) qui a entraîné des dégâts considérables dans le nord de la France. Ensemble, les tempêtes Lothar et Martin ont causé directement environ 176 millions de m³ de dégâts sur l'ensemble de la France, aggravés par des attaques ultérieures de scolytes dans les forêts touchées. Au moment où les forêts d'Aquitaine se remettaient de la tempête Martin, une deuxième tempête, encore plus violente, est arrivée le 24 Janvier 2009. Klaus a infligé plus de 43 millions de m³ de dommages directs aux forêts d'Aquitaine, suivis d'une perte de 4 millions de m³ due à la pullulation induite d'insectes xylophages.

L'importance des pertes économiques et les questions posées concernant l'avenir d'un massif cultivé comme celui des Landes de Gascogne ont permis de mobiliser la recherche. En 2009, un ouvrage collectif (Biro et al., 2009) a synthétisé l'état des connaissances acquises, complété par un colloque du CIAg la même année.

La susceptibilité des arbres et des peuplements forestiers au vent, ainsi que les mécanismes d'endommagement sont contrôlés d'une part par le vent (par exemple vitesse, durée, intensité de la turbulence), par les caractéristiques des arbres et des peuplements (par exemple espèce, ancrage racinaire, hauteur, homogénéité des arbres), par les caractéristiques de sol (texture, profil pédologique, taux d'humidité) et enfin par les caractéristiques du paysage et de la structure forestière (par exemple topographie, taille des parcelles, fragmentation du paysage) (Figure 1). De plus, la sylviculture peut également moduler la susceptibilité des peuplements (mode d'installation, fertilisation, espacement, éclaircie, coupe rase). Dans cet article, nous nous proposons de faire le bilan des avancées scientifiques obtenues depuis 2009 dans l'étude des mécanismes liés aux dégâts de vent et acquises grâce à la modélisation pour l'aide à la gestion et à la planification des risques.

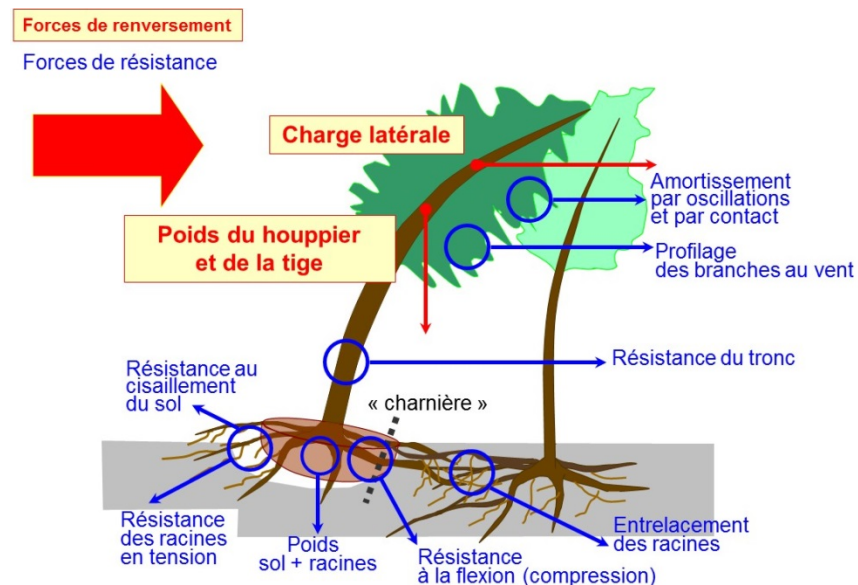


Figure 1 : Facteurs influençant la vulnérabilité des arbres au vent (Cucchi, 2004)

1. La turbulence et les écoulements en forêt

Lors du CIAg de 2009 consacré au thème « Sylviculture, forêts et tempêtes » avaient été présentés un ensemble de résultats récents sur les caractéristiques de l'écoulement atmosphérique dans les canopées forestières (Brunet et Dupont, 2009). On y abordait en particulier les cas des régions de lisière et des forêts sur relief ; on y évoquait le rôle possible de la fragmentation du paysage sur les niveaux de turbulence ; on y présentait les dernières avancées en matière de modélisation de ces écoulements. Le bilan de ces recherches (voir aussi Brunet et al., 2009) témoignait de l'orientation des travaux vers les contextes hétérogènes, notamment ceux de plus grande étendue que l'échelle stationnelle (discontinuités, topographie, mosaïque du paysage), et du passage d'un contexte purement sylvicole de ces recherches vers une appréhension des problématiques de l'aménagement du paysage. La période écoulée depuis ce dernier CIAg a vu cette tendance se confirmer et les modèles se complexifier, permettant maintenant des simulations réalistes de la propagation des dégâts d'une tempête dans un massif forestier. Schématiquement, on peut regrouper les recherches menées pendant cette période selon trois thèmes que nous aborderons successivement : les transitions de surface (progression de l'écoulement dans une parcelle de pin maritime à partir de la lisière), la fragmentation du paysage (effet du « mitage » de la forêt sur les niveaux de turbulence) et les interactions entre vent et mouvement des arbres (à partir d'une modélisation couplant les dynamiques du vent et des arbres).

Les études précédentes sur les écoulements de lisière (par exemple Dupont et Brunet, 2009) avaient un caractère générique qui ne rendait pas nécessairement compte des processus à l'œuvre dans le cas particulier d'une parcelle de pin maritime, caractérisée par une strate foliaire haut perchée, ne s'étendant approximativement que sur le tiers supérieur du volume occupé par les arbres. Une campagne d'observation sur le terrain, couplée à un exercice de modélisation, a permis de décrire et mieux comprendre ce cas de figure (Dupont et al., 2011 et 2012). Il a été montré en particulier (1) que le développement de la turbulence au-dessus de la forêt se produit plus près de la lisière que dans les canopées plus homogènes ; (2) que dans l'espace des troncs se développe un courant « jet » relativement rapide ; (3) que le cisaillement créé par ce jet génère des structures turbulentes juste sous la strate foliée ; (4) que l'on n'observe pas de zone de forte intermittence dans la canopée, contrairement aux cas plus homogènes ; (5) enfin que l'influence de la lisière se fait sentir jusqu'à une distance horizontale relativement grande, de l'ordre de 10 à 15 fois la hauteur du couvert h . Bien que ces résultats ne soient pas immédiatement traduisibles en termes de comportement d'une parcelle de pin maritime en condition de tempête, ils contribuent néanmoins à notre connaissance des interactions entre vent et forêt et ont permis de poursuivre la validation du code de calcul utilisé pour l'occasion, qui repose sur la technique dite LES (simulation des grandes échelles).

L'impact de la fragmentation (ou « mitage ») de la forêt sur les propriétés du vent à l'échelle du massif, et par voie de conséquence sur les sollicitations mécaniques que le vent impose aux arbres en retour, fait l'objet de recherches actives. En paysage fragmenté, la multiplicité des lisières, qui jouent chacune un rôle particulier sur l'écoulement atmosphérique en contribuant à générer de la turbulence, est en effet susceptible d'avoir des effets cumulatifs perceptibles à l'échelle régionale, qui pourraient contribuer de manière significative à la fragilité du massif face à une tempête. Par ailleurs, un paysage fragmenté laisse exposées bon nombre de lisières, qui ne peuvent alors bénéficier de l'« abri » relatif offert par les peuplements situés en amont. Cela a été bien montré par une étude statistique post-Klaus décrite plus loin, qui a fait ressortir une variable d'abri parmi les huit variables significatives. Ce problème de la fragmentation du paysage est actuellement abordé dans un travail de thèse (Poëtte et al., 2014) mettant en jeu une campagne de mesures en soufflerie et un programme de simulations LES, qui visent à étudier le comportement de l'écoulement sur des paysages forestiers présentant divers degrés de fragmentation (présence, dans un couvert par ailleurs homogène, de clairières de différentes tailles). Les premiers résultats montrent que lorsque la taille de la clairière est inférieure à environ $8h$ on observe un effet d'abri d'une parcelle sur la suivante, alors que dans le cas contraire les parcelles se comportent

comme des couverts isolés. L'étude est en cours et devrait générer de nombreux résultats dans l'année à venir. L'appui de la modélisation est majeur dans cette approche : les modèles existants sont capables d'une grande finesse de détails sur des domaines hétérogènes (Figure 3), et ils permettent de produire des informations transposables dans les modèles de risque décrits plus loin.

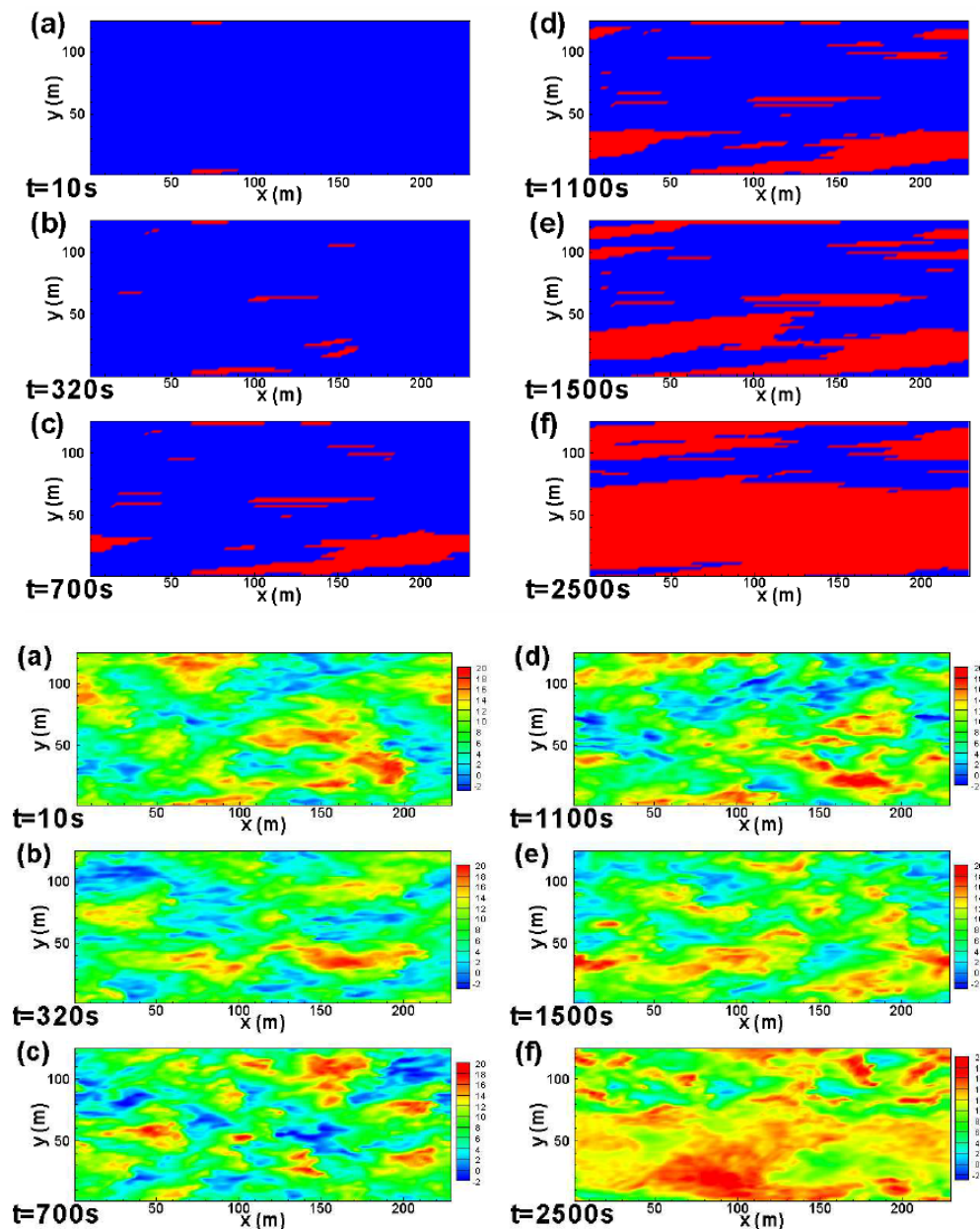


Figure 2 : Prédications, à l'aide du modèle ARPS couplé à un modèle de dynamique des arbres, de la progression des dégâts pendant une tempête (en haut, les zones dévastées figurant en rouge), et des champs de vent instantanés aux mêmes moments (en bas), soit à 10 s, 320 s, 700 s, 1100 s, 1500 s et 2500 s après le début de la simulation. Le vent souffle de gauche à droite sur une parcelle de 230 m de long. D'après Pivato (2014).

La modélisation du couplage vent-arbre a connu d'importants progrès ces dernières années. Elle a consisté essentiellement à rajouter à l'ensemble des équations atmosphériques une équation pour le mouvement des plantes, considérées comme des tiges flexibles dotées d'un certain nombre de propriétés mécaniques. Ce développement a été mené pour une culture (Dupont et al., 2010) puis pour une forêt (Pivato et al., 2014). Le modèle permet ainsi une simulation couplée, et interactive, des mouvements turbulents et des mouvements de la végétation considérée. Il a été testé avec succès

dans plusieurs cas de figure, à partir de données disponibles et de résultats de modèles plus complexes. Les développements réalisés sur l'arbre permettent de simuler de grandes déflexions telles que peuvent les générer un vent de tempête, ainsi que la rupture de l'arbre lorsque la tension calculée dans la tige atteint un seuil critique représentatif de l'espèce considérée. Lors de la thèse de Pivato (2014), ce modèle a permis pour la première fois de simuler la progression des dégâts dans une parcelle forestière pendant une tempête (Figure 2) : des survitesses locales (rafales de vent dues à des structures turbulentes particulièrement énergiques) parviennent à faire tomber un premier arbre ; l'espace ainsi créé augmente la probabilité qu'une nouvelle rafale de forte intensité atteigne le même endroit, et le vent génère ainsi progressivement des trouées, allongées dans le sens de l'écoulement moyen (de gauche à droite sur la Figure 2). On voit qu'au bout d'un temps de simulation de 2500 s une majeure partie de la forêt a été dévastée, sous la forme de trois principales trouées. Les champs de vent figurant dans la partie basse de la Figure 2 montrent que les trouées générées sont pour la plupart associées à des vitesses instantanées plus élevées qu'ailleurs ; ceci est particulièrement visible aux temps 1500 et 2500 s. Ces résultats peuvent donner une explication aux constatations parfois faites sur le terrain de dommages « en couloir ». Ils demandent à être repris dans une étude de plus grande envergure, offrant différentes conditions de simulation et permettant une analyse fine des processus à l'œuvre. Ce type de simulation pourra ensuite être généralisé à tout type de situation (lisière, paysage fragmenté, relief...). Dans l'état actuel des choses, tous les arbres sont considérés comme semblables, et sans racines (encastrement parfait des tiges). Dans l'avenir, une approche mécaniste du comportement racinaire devra être prise en compte, ainsi qu'une description des variations de structure éventuelles au sein des peuplements, en fonction notamment de la distance à la lisière pour les couverts exposés de longue date.

2. Une composante essentielle de la stabilité : le système racinaire et le sol

La stabilité des arbres est conditionnée par la qualité de leur ancrage dans le sol. Les connaissances actuelles sur l'ancrage découlent principalement de deux fronts de recherche : (i) des études expérimentales d'analyse de la stabilité des arbres en fonction des caractéristiques des systèmes racinaires, et (ii) la modélisation mécanique de l'ancrage des arbres dans le sol. Ces deux voies de recherche contribuent à identifier les paramètres clés de l'ancrage d'un arbre et les facteurs qui le font varier (génétiques, climatiques, pédologiques, anthropiques).

La modélisation de la mécanique d'un arbre a montré le rôle prépondérant joué par la géométrie des plantes (branches, ramifications...) sur la résistance mécanique de l'ensemble (Rodriguez et al., 2008 ; Sellier et Fourcaud, 2009). Par analogie, l'architecture du système racinaire est considérée comme étant le principal déterminant de l'ancrage d'un arbre. Elle varie suivant les espèces, provenances et géotypes (Köstler et al., 1968 ; Danjon et al., 2009). Les systèmes racinaires vont se distinguer par l'importance relative du pivot, des racines traçantes, des pivots secondaires insérés sur ces traçantes, des racines horizontales à profondeur intermédiaire, des racines obliques insérées sur la souche et des racines profondes. Le pin maritime en sol sableux forme, par exemple, très peu de racines obliques ou à profondeur intermédiaire quelle que soit sa provenance (Danjon et al., 2009) et son mode de multiplication (Khuder et al., 2007). Les espèces se distinguent aussi par leur capacité à former des fourches (réitérations) et à développer de nouvelles racines sur une armature de racines anciennes (développement retardé). Le pin maritime fourche très peu si les racines ne sont pas blessées et ne produit pas de développement retardé (Danjon et al., 2005).

Bien que largement sous dépendance génétique, l'architecture racinaire est très fortement influencée par le sol qui est un milieu beaucoup plus hétérogène et contraignant que l'air dans lequel se développent les parties aériennes. Les techniques d'installation artificielle des arbres peuvent aussi fortement perturber le développement du système racinaire, avec une miniaturisation du système

racinaire dans le conteneur, suivie par des réorientations imposées des racines au moment de la plantation.

Les systèmes racinaires montrent également une très forte acclimatation aux stimuli mécaniques, même faibles (Stokes et al., 1998). Cette acclimatation est sélective et se réalise dans le cadre du schéma architectural de l'espèce (Danjon et al., 2013). Ainsi, des pins maritimes âgés de 50 ans et ayant résisté à la tempête concentrent 60% de la biomasse de racine dans les secteurs orientés au vent et sous le vent contre 40% dans les secteurs perpendiculaires au vent (Danjon et al., 2005).

Actuellement, les techniques non destructives de mesure d'architecture racinaire ne sont pas opérationnelles in situ. Les systèmes non invasifs fonctionnent seulement dans des pots (scanner à rayons X (Mooney et al., 2012) ou dans des conditions très restrictives (radar sol) (Wu et al., 2014). Il n'existe que peu ou pas d'indicateur de la qualité de l'architecture racinaire visible en surface. Seule une mesure de l'écart à la verticalité basale du tronc pourrait nous renseigner sur le risque, mais il faudrait alors établir une relation entre risque et écart à la verticalité. En tout état de cause, la variabilité de l'architecture des systèmes racinaires est très grande. La mise en évidence de l'influence de différents facteurs sur l'architecture exige donc des effectifs d'arbres importants, alors même que le déterrage et la mesure de l'architecture sont destructifs et chronophages.

Une approche complémentaire est celle de la modélisation qui permet d'intégrer ensemble des connaissances mécaniques sur l'architecture racinaire, les propriétés du sol et les propriétés du bois de racines. Des expériences numériques ont ainsi confirmé le rôle essentiel de l'architecture du système racinaire en simulant différentes architectures théoriques (Dupuy et al., 2007 ; Fourcaud et al., 2008). Des modèles permettent maintenant d'examiner les ruptures des racines et la chronologie des endommagements de racines lors d'un chablis ou d'un treuillage mimant un chablis (Yang et al., 2014). Les simulations montrent que sur des pins maritimes de 13 ans, c'est d'abord le pivot qui cède à environ 40 cm de profondeur, puis les traçantes sous le vent près du tronc, puis les traçantes dans le vent à une distance radiale d'environ trois fois le diamètre à hauteur de poitrine. Sur des arbres d'une dizaine de mètres de haut, un pivot avec une forte résistance en flexion permettrait donc d'éviter toute inclinaison du tronc. La qualité de l'ancrage dépend ainsi des propriétés mécaniques du bois de racine, qui est principalement sollicité en tension et en flexion.

Ces modèles sont aussi des outils prometteurs pour simuler les effets des conditions de sol aux moments du passage des tempêtes dans les modèles de risques au vent. Ces modèles ont ainsi permis d'analyser le rôle des propriétés mécaniques du sol (essentiellement cohésion et friction) qui sont une composante essentielle de l'ancrage (Dupuy et al. 2007 ; Rahardjo et al., 2009). Dans des sols argileux qui ont une forte cohésion, c'est la longueur du plus long élément racinaire qui déterminera la résistance au chablis, alors que dans des sols sableux avec une friction élevée, tous les éléments du système racinaire contribuent à l'ancrage (Fourcaud et al., 2008). Ce type de modèle devrait aussi permettre de mieux comprendre les effets liés à la structure des sols sur l'ancrage d'un arbre. Les déplacements des racines et le frottement racines/sol sont influencés par les conditions d'humidité qui pourraient modifier l'état du sol au moment du coup de vent. Par exemple, les tempêtes hivernales s'accompagnent souvent de fortes précipitations qui engorgent le sol. Enfin, les pratiques de travail du sol modifient la structure et la profondeur (sous-solage). Dans le massif landais, en lande sèche et sur les dunes, il n'y a pas d'obstacle à l'enracinement en profondeur. Dans les landes mésophiles ou humides, la profondeur d'enracinement est déterminée par le niveau de la nappe phréatique et par la profondeur d'un horizon induré (alios). La répartition, en profondeur et composition, de la couche d'alios est cependant très variable ; la profondeur disponible pour l'enracinement varie d'un mètre à l'autre (Augusto et al., 2010). La profondeur de l'alios n'était pas apparue comme une variable discriminante de la qualité de l'ancrage dans les essais de flexion réalisés sur des pins maritimes (Cucchi et al., 2004) ou lors d'analyse des caractéristiques racinaires d'arbres chablis (Danjon et al., 2005). Ce résultat est logique, car l'alios a un rôle ambigu : il restreint la profondeur d'enracinement, mais offre un support très stable pour l'arbre qui adapte fortement sa structure pour s'en servir de support (Danjon et al., 2005).

En conclusion, l'acquisition de connaissances génériques se heurte à deux difficultés principales. La première est la difficulté à manipuler et étudier les systèmes racinaires d'arbres adultes. La seconde tient à la complexité du problème mécanique de l'ancrage qui met en jeu la géométrie du système racinaire, les propriétés du sol, les propriétés mécaniques du bois de racine et des interactions mécaniques à l'interface sol-racines. Cependant, les avancées récentes sur l'ancrage nous renseignent sur le rôle joué par l'architecture des racines et les propriétés du sol, et la façon dont elles varient avec les pratiques sylvicoles, les conditions climatiques et selon les espèces.

Dans les modèles de risques au vent actuels (décrits dans un paragraphe ci-dessous), les relations utilisées pour estimer l'ancrage d'un arbre sont des relations statistiques reposant sur des mesures de résistance à la flexion des arbres pour une espèce donnée et des propriétés de sol à un instant t (Gardiner et al., 2008). Au niveau intra-espèce, il devrait être possible de moduler la résistance au vent en fonction de l'origine génétique des peuplements. Les provenances de pin maritime de régions ventées développent dans les podzols landais un pivot unique, droit, profond et vertical, alors que les provenances de régions plus sèches développent surtout un réseau dense de racines traçantes ramifiées (Danjon et al., 2009). Par ailleurs, le pin maritime fait l'objet d'un programme d'amélioration génétique avec pour principaux critères de sélection la hauteur et l'écart à la verticalité basale du tronc à 10 ans. Les études de corrélation génétique confirment que l'effet positif de la rectitude du tronc sur la stabilité au vent est important comparativement à l'effet négatif de la croissance (les dégâts de chablis augmentent avec la hauteur et la circonférence, et augmentent plus encore avec l'écart à la verticalité du tronc (Raffin et Bouffier, 2014). Le lien entre rectitude et résistance à la tempête pourrait s'expliquer par un meilleur ancrage racinaire chez les arbres les plus droits (Danjon et al., 2005). Concernant la prise en compte des caractéristiques du sol dans ces modèles de risque, les relations décrivant l'évolution de la résistance à la flexion peuvent être calibrées pour un panel de texture ou de profondeurs limites d'enracinement (Gardiner et al., 2004). Dans le massif landais, nous avons vu qu'il fallait distinguer les landes sèches et les dunes d'une part des landes mésophiles et humides d'autre part. Pour la seconde catégorie, il est difficile de déterminer une profondeur d'enracinement et de la relier à une stabilité. Généraliser ces relations empiriques de résistance au chablis est indispensable pour extrapoler à des conditions qui varient selon les dimensions des arbres, les pratiques sylvicoles et les conditions climatiques. Cette généralisation ne sera possible qu'en intégrant les résultats des modèles mécaniques de l'ancrage combinés aux études expérimentales d'analyse de la stabilité en fonction des caractéristiques des systèmes racinaires. Ces relations empiriques pourront aussi être validées par les mesures d'écart à la verticalité du tronc sur un nombre important d'arbres dans des dispositifs expérimentaux testant les facteurs génétiques, sylvicoles et environnementaux.

3. Modéliser le risque lié au vent

Quand on cherche à modéliser un risque, on doit intégrer ses trois composantes : l'aléa, la vulnérabilité et le niveau de l'impact. Tout naturellement, les premiers modèles ont été construits à partir de données d'impact que sont les taux de dégâts dans des peuplements après des tempêtes pour mettre en évidence les facteurs de vulnérabilité des peuplements ou des arbres (Colin et al., 2009). En connaissant la probabilité de risque de chablis ou de volis dans une région donnée, on peut utiliser cette information pour tester l'impact de différents aménagements sur les niveaux de dégâts potentiels (Albrecht et al., 2012). Par ailleurs, l'amélioration des connaissances sur le comportement des arbres face à des vents forts, les mécanismes d'ancrage des arbres et de résistance des tiges a permis le développement de modèles mécanistes qui permettent de calculer la vitesse critique (vitesse moyenne horaire au-dessus de la canopée) nécessaire pour déraciner ou casser un arbre. La prédiction de cette variable combinée à la connaissance du climat de vent pour une zone considérée permet de déduire un niveau de risque pour la situation simulée.

3.1 Un modèle statistique pour les peuplements de Pin maritime

Les modèles statistiques prédisent la probabilité de dommages dus au vent pour une forêt d'une zone géographique donnée, en mettant en relation des dégâts déjà observés sur cette forêt avec des facteurs connus pour influencer la résistance au vent. Une étude consacrée aux dégâts dans les peuplements de pin maritime a été menée par un groupe de travail (Belouard et al., 2012) après la tempête Klaus de 2009.

Plus de 145 variables, issues des placettes de lever IFN (Inventaire Forestier National), de photographies aériennes ou du krigeage des caractéristiques du vent lors de cet épisode de janvier 2009, ont été testées. Les huit variables retenues couvrent un large spectre de facteurs, à la fois des facteurs classiquement mis en évidence mais également deux nouvelles variables, l'une liée à la turbulence atmosphérique et l'autre à l'environnement de la parcelle. Les composantes du vent apparaissent indispensables et ont été intégrées grâce à deux variables : la vitesse maximale du vent mais aussi un indice de turbulence. C'est notamment cette dernière caractéristique qui distingue le mieux les peuplements de dune de ceux du plateau landais. Si le vent en dune a soufflé très fort, il l'a fait de manière plus régulière et soutenue et la turbulence était moins forte. Deux variables dendrométriques ont été également intégrées : un indicateur de la hauteur dominante du peuplement de pin maritime, facteur de stabilité récurrent dans les études sur la stabilité quelles que soient les essences étudiées, et le taux de couvert absolu. Pour cette dernière variable, un couvert très fermé ou au contraire un couvert absolu faible favoriseraient la stabilité des peuplements. Les caractéristiques stationnelles ont une importance majeure : les dégâts seraient plus importants sur les sols hydromorphes, sur les stations de lande humide et sur les stations ayant les indices de fertilité les plus élevés pour le pin maritime. Enfin, une dernière variable, l'effet d'abri après prise en compte des dégâts, montre que les peuplements qui subissent le plus de dégâts sont les peuplements exposés à l'ouest.

Même si ce modèle fournit une bonne prédiction des dégâts lorsque deux populations sont considérées (dégâts inférieurs et supérieurs à 40% sur des placettes de lever IFN), sa valeur explicative reste largement perfectible. Les variables retenues mettent en évidence la diversité des facteurs impliqués dans la stabilité des peuplements et permettent de cibler les futures recherches. Par exemple, les progrès récents de la modélisation à fine échelle des champs de vent instantanés sur des zones aussi grandes que l'Aquitaine permettraient d'obtenir un choix plus large de variables météorologiques et une meilleure précision qu'avec la méthode utilisée. Nous pourrions également construire des variables plus élaborées de manière à intégrer les mécanismes des interactions entre vent et canopée, mais aussi la structure du paysage forestier. Sous réserve que ces pistes améliorent la valeur prédictive du modèle, une meilleure estimation des hauteurs sur le massif faciliterait la cartographie des résultats de ce modèle.

3.2 Les modèles mécanistes

3.2.1 A l'échelle de la parcelle forestière et de son environnement immédiat

La seconde approche pour modéliser les risques liés au vent fait appel aux modèles mécanistes hybrides qui utilisent les principes de la mécanique afin de déterminer la charge de vent sur les arbres et d'en déduire les vitesses nécessaires pour déraciner ou casser les arbres (Gardiner et al., 2008). Ils sont appelés modèles hybrides parce que certaines parties du calcul font appel à des relations empiriques telles que la résistance au chablis sur différents types de sols. Un exemple typique d'un tel modèle est ForestGALES (Gardiner et al., 2004), qui utilise les caractéristiques du peuplement forestier et du site pour calculer la vitesse critique du vent (VCV) pouvant causer des dommages aux arbres. Ce calcul de la VCV est combiné à la connaissance du climat local de vent (en utilisant les cartes locales de vent ou des modèles d'écoulement atmosphérique) pour estimer la probabilité d'occurrence de cette vitesse.

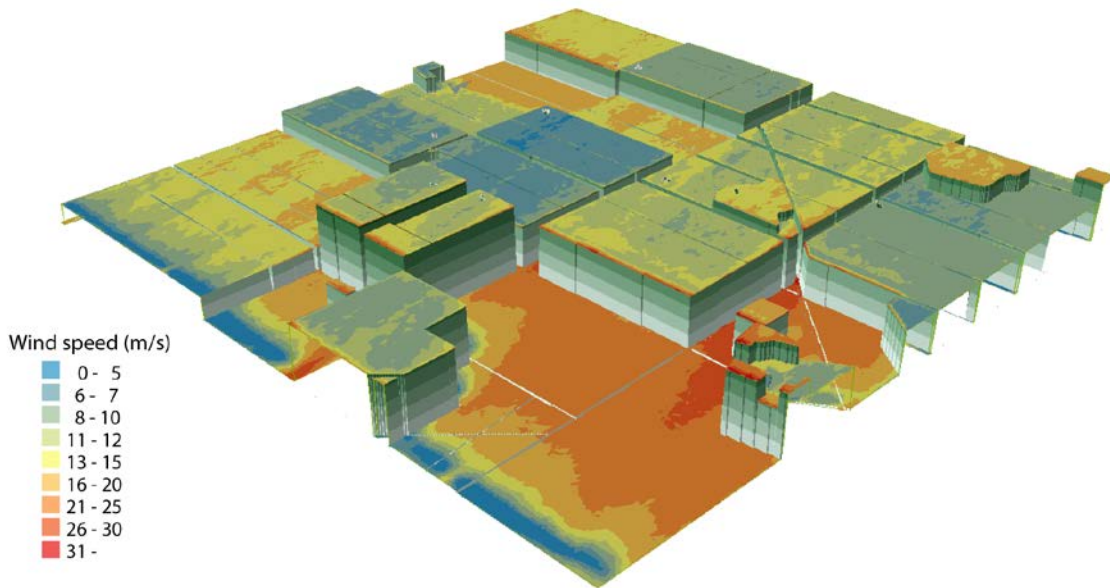


Figure 3 : Prédications à l'aide du modèle ARPS (approche LES - Large Eddy Simulation) des vitesses de vent au niveau de la hauteur dominante de chaque parcelle de la forêt de Nezer (Aquitaine) (2 x 2 km) pendant la tempête Klaus.

ForestGALES a été développé en 2000 pour calculer le risque lié au vent à l'échelle de la parcelle et pour des peuplements monospécifiques et équiennes (Cucchi et al., 2005). Au cours des cinq dernières années, le modèle a été adapté pour travailler à différentes échelles : du niveau de l'arbre individuel à l'échelle régionale, voire européenne. Modéliser le risque au niveau de l'arbre individuel permet d'intégrer la variabilité naturelle présente dans les peuplements forestiers qui sont le plus souvent multi-spécifiques ou inéquiennes. Ces types de peuplement sont fréquents dans les couverts forestiers européens et résultent de sylvicultures spécifiques. Cette nouvelle version du modèle ForestGALES au niveau arbre a été rendue possible grâce aux progrès dans la compréhension de l'impact des charges de vent sur les arbres individuels dans les forêts (Hale et al., 2012). Ce modèle « arbre individuel » a été testé en validation sur des données de dégâts notés arbre par arbre dans des forêts de mélèzes au Japon, et dans des peuplements de pins maritimes de la forêt du Nezer en Aquitaine (Figure 3). Pour ce dernier cas, cette notation des dommages a fait suite aux tempêtes de 1999 et 2009. Ces premiers tests sont prometteurs pour cette nouvelle version de ForestGALES mais ils mettent en évidence combien il est difficile de prévoir quels sont les arbres susceptibles d'être endommagés en cas de tempête. En effet, le modèle n'intègre pas encore toutes les variabilités locales : variabilité des propriétés du sol, de l'enracinement ou de la résistance le long des tiges. À l'avenir, notre description de la variabilité de la force d'ancrage sera améliorée grâce aux connaissances sur l'enracinement acquises avec les études décrites ci-dessus. Les difficultés de prévision à l'échelle « arbre individuel » proviennent également des propriétés de résistance émergentes de la structure en peuplement : il existe un fort impact de la vulnérabilité ou résistance des arbres voisins sur la vulnérabilité de l'arbre considéré. Concernant l'effet de ces interactions entre les arbres, de nouveaux outils de modélisation de la progression des dommages au sein des peuplements commencent à être développés, comme on l'a vu précédemment (Pivato, 2014).

Ce travail récent a démontré très clairement l'importance de disposer de données d'entrée de haute qualité, issues soit de mesures sur le terrain soit de mesures de télédétection aérienne. Ainsi grâce au développement de nouvelles techniques de télédétection (par exemple LiDAR), il est maintenant envisageable de cartographier le risque de vent au niveau intra-parcellaire. Cette combinaison de données de meilleure qualité et spatialement plus détaillées avec des modèles de risque de vent

améliorés va permettre aux gestionnaires forestiers et aux propriétaires de prédire le risque de dommages dus au vent pour une plus grande gamme de types de forêts et pour un large éventail de pratiques sylvicoles.

3.2.2 A l'échelle régionale : outil de planification forestière

La plupart du temps, la gestion forestière s'applique à l'échelle locale de l'aménagement d'une forêt tout en respectant des directives régionales. Par conséquent, pour que les modèles de prévision des risques liés au vent soient utiles à la fois aux aménagistes et aux planificateurs régionaux, il est nécessaire d'effectuer des calculs de risque à ces différentes échelles. Pour cela, il existe trois principales exigences. La première est de disposer de données sur la forêt à une résolution suffisante et de bonne qualité. Traditionnellement, ces informations étaient disponibles dans le cadre d'une base de données de gestion de la forêt ou dans le cadre d'un inventaire forestier national. La deuxième exigence est de disposer de modèles de dynamique forestière capables de calculer la croissance des arbres entre l'année de mesure lors de l'inventaire de la forêt et l'année de croissance en cours. Récemment l'avènement du LiDAR aéroporté et la diminution de ses coûts d'utilisation permettent de disposer d'un niveau d'informations sans précédent sur les forêts. Le couplage entre données LiDAR, données d'inventaire forestier et modèles de croissance peut ainsi être un moyen très puissant de caractérisation de la forêt. La troisième condition est d'avoir une connaissance approfondie du climat de vent dans la région. Cette information peut être fournie par un maillage dense de stations météorologiques. Néanmoins, quelle que soit leur densité d'installation, il est indispensable de cartographier ces données climatiques sur l'ensemble de la région considérée en utilisant des modèles d'écoulement (par exemple WASP ou Méso-NH) ou des modèles statistiques à partir de données de terrain (par exemple à l'aide de modèles numériques de terrain précis sur les altitudes, de cartes de rugosité du couvert...).

Ces deux dernières années, nous avons travaillé à la prédiction du risque lié au vent en Aquitaine (France) et au Pays Basque (Espagne). Ces deux régions présentent un contraste intéressant en termes de topographie, sous un climat de vent globalement similaire. L'analyse en Aquitaine s'est concentrée sur l'utilisation des données avant et juste après la tempête Klaus en 2009 enregistrées par l'Inventaire Forestier National (IFN) ainsi que l'analyse des vents de surface à la résolution 8 x 8 km par Météo France (modèle SAFRAN). Les données de l'IFN ont été utilisées comme entrée pour ForestGALES et les prédictions de vitesse critique du vent ont été comparées aux vitesses de vent SAFRAN pour déterminer quels seraient les peuplements éventuellement endommagés (Figure 4). La comparaison avec les mesures réelles de dommages a montré une concordance raisonnable, mais des améliorations sont encore nécessaires. Un des problèmes rencontrés est l'imprécision de la position des placettes de lever de l'IFN. Comme il n'a pas été possible de connaître leur emplacement exact, nous n'avons pas pu les localiser par rapport aux lisières alors que cette variable est un facteur important dans l'apparition de dommages comme l'avait montré le modèle statistique. En outre, les informations actuelles sur les vitesses de vent lors de la tempête Klaus sont trop grossières et une détermination des vitesses de vent à une échelle de résolution plus fine est nécessaire pour tester correctement le modèle de risque ForestGALES à l'échelle régionale en Aquitaine.

Au Pays Basque (Espagne), il existe des données plus détaillées sur la forêt : des données LiDAR aéroporté, des photographies aériennes entre 2008 et 2012, des données de l'IFN et plus de 50 stations météorologiques. Cela signifie qu'il a été possible d'obtenir des informations précises sur l'état de la forêt avant les tempêtes Klaus en 2009 et Xynthia en 2010. Ces deux derniers événements ont causé d'importants dégâts aux peuplements de pin radiata. Les données de l'IFN ont été utilisées comme valeurs d'entrée pour ForestGALES afin de prédire les vitesses de vent critiques en chaque point de l'inventaire. Celles-ci ont ensuite été comparées aux vitesses de vent modélisées durant les deux tempêtes avec Euskalmet (Gaztelumendi et al., 2012) puis aux taux de dégâts mesurés après les deux tempêtes. Finalement, les données LiDAR ont également été utilisées pour fournir des mesures

de hauteur d'arbres et de diamètre dans toute la région afin qu'une carte régionale des risques de vent puisse être établie pour la période actuelle.

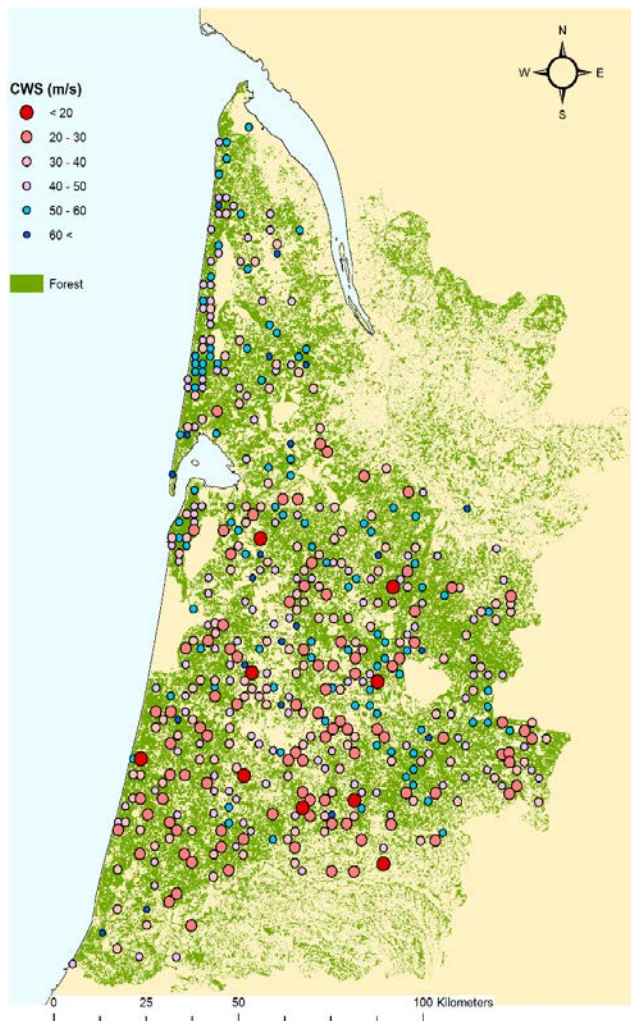


Figure 4 : Carte présentant les vitesses critiques de vent (CWS en anglais pour Critical Wind Speed) sur l'échantillon de placettes de pin maritime de l'Inventaire Forestier National. Les peuplements les plus vulnérables sont représentés en rouge (vitesse de vent critique faible).

3.2.3 A l'échelle européenne

La disponibilité des données des inventaires forestiers pour tous les pays européens offre la possibilité de prédire le risque lié au vent pour tous les massifs forestiers à travers l'Europe. Une telle analyse a été réalisée dans le cadre du projet européen Motive (Gardiner et al., 2012) en utilisant la base de données EFISCEN. Malheureusement, bien que les données de 32 pays soient regroupées, cette base n'est pas exhaustive et pour certains pays il est nécessaire de faire certaines hypothèses pour compléter les données. En outre, il existe de nombreuses différences entre les inventaires des différents pays. Une solution partielle à cette question serait d'utiliser des données LiDAR. Actuellement le LiDAR aéroporté est uniquement disponible dans certains pays. Aussi des données LiDAR par satellite (Los et al., 2012) ont été utilisées et permettent d'obtenir la gamme des hauteurs des arbres dans un rayon de 60 m. Les prévisions de la vitesse critique du vent à travers l'Europe ont ainsi été calculées en combinant la base de données EFISCEN et les données LiDAR par satellite. Les résultats obtenus doivent être traités avec prudence et en tout état de cause ils sont seulement la preuve que ce concept est prometteur. Les cartes réalisées ne peuvent en l'état servir d'outil d'aide à l'aménagement ou à des prises de décisions de politiques forestières. Dans l'avenir, la combinaison de données LiDAR (satellite et aéroporté) avec les données des inventaires forestiers nationaux pourra fournir des informations suffisamment détaillées pour produire des cartes précises du risque lié au vent pour les

forêts à travers l'Europe, mais à l'heure actuelle l'échelle la plus pertinente pour la prise de décision reste l'échelle régionale.

4. Perspectives

Les conséquences potentielles du changement climatique global sur les régimes des vents en Europe restent extrêmement incertaines. Récemment, un certain nombre de modèles climatiques ont prédit une augmentation de l'intensité des vents forts et une évolution des trajectoires des tempêtes vers le nord de l'Europe (selon l'intensité des modifications climatiques attendues pour le siècle à venir) (Rummukainen, 2012). Néanmoins, même si la gravité et la fréquence des tempêtes n'étaient pas modifiées, plusieurs facteurs directement liés aux modifications climatiques et environnementales pourraient aggraver la vulnérabilité des forêts européennes face aux tempêtes : de plus fortes températures et une augmentation des précipitations pendant les périodes hivernales pourraient diminuer la force de l'ancrage dans des sols non gelés ou saturés en eau, et augmenter l'activité des champignons pathogènes dans les sols. Les tempêtes sont et resteront un facteur de vulnérabilité des forêts. Les forestiers doivent donc gérer leur patrimoine avec cette incertitude. Les outils de simulation et d'évaluation des risques doivent continuer à se perfectionner et à se diffuser (projets en cours : ANR FORWIND : Fournier, 2012 ; ANR TWIST : Défossez, 2013). La disponibilité de systèmes informatiques d'aide à la décision est indispensable au niveau des peuplements pour promouvoir des régimes sylvicoles raisonnés face à ce risque. Cet outil doit exister au niveau régional et il pourrait être à l'origine de la création d'espaces de réflexions multipartites pour définir les mesures nécessaires à la préservation dans le temps d'un niveau de risque acceptable pour de grands massifs forestiers. Cette concertation continue doit aussi permettre de nous préparer à faire face à de nouvelles crises et à leurs gestions.

Références bibliographiques

- Albrecht A., Hanewinkel M., Bauhus J., Kohnle U., 2012. How does silviculture affect storm damage in forests of south-western Germany? Results from empirical modeling based on long-term observations. *European Journal of Forest Research* 131, 229-247
- Augusto L., Bakker M.R., Morel C., Meredieu C., Trichet P., Badeau V., Arrouays D., Plassard C., Achat D.L., Gallet-Budynek A., Merzeau D., Canteloup D., Najar M., Ranger J., 2010. Is 'grey literature' a reliable source of data to characterize soils at the scale of a region? A case study in a maritime pine forest in southwestern France. *European Journal of Soil Science* 61(6), 807-822.
- Belouard T., Marchadier R., Merzeau D., Meredieu C., Brunet Y., Drouineau S., Paillassa E., Riou-Nivert P., 2012. 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. Rapport pour la Région Aquitaine, 77p.
- Birot Y., Landmann G., Bonhême I. (eds.). 2009. La forêt face aux tempêtes. Editions Quæ. Versailles Cedex, France.
- Brunet Y., Dupont S., 2009. Écoulement du vent et structure du paysage. *Innovations Agronomiques* 6, 51-62.
- 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 : Y. Birot, G. Landmann, I. Bonhême (Coord.), La forêt face aux tempêtes. Quæ, Versailles, pp. 229-259.
- 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 : Y. Birot, G. Landmann, I. Bonhême (Eds.), La forêt face aux tempêtes. Editions Quæ, France, pp. 177-228

- Cucchi V., 2004. Sensibilité au vent des peuplements de Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.). Analyse comparative de dégâts de tempête, étude expérimentale et modélisation de la résistance au déracinement. Université de Bordeaux I, (Bordeaux, France), 108 p.
- 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* 18(4), 460-466.
- Cucchi V., Meredieu C., Stokes A., de Coligny F., Suarez J., Gardiner B., 2005. Modelling the windthrow risk for simulated forest stands of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait). *Forest Ecology and Management* 213(1-3), 184-196.
- Danjon F., Eveno E., Bernier F., Chambon J., Lozano P, Plomion C, Garnier-Géré P. 2009. Genetic variability in 3D coarse root architecture in *Pinus pinaster*. In: H Mayer, D Schindle (Eds.). *Proceedings of Second International Conference on Wind Effects on Trees*, Vol. 19, pp. 155–161. Freiburg, Germany: Meteorologischen Instituts der Albert Ludwigs Universität.
- Danjon F., Fourcaud T., Bert D., 2005. Root architecture and windfirmness of mature *Pinus pinaster* Ait. *New Phytologist* 168(2), 387-400.
- Danjon F., Khuder H., Stokes A., 2013. Deep phenotyping of coarse root architecture in *R. pseudoacacia* reveals that tree root system plasticity is confined within its architectural model. *PLoS One* 8(12)
- Défossez P., 2013. ANR TWIST : Adaptation de l'arbre aux vents forts. AAP JCJC SIMI6 2013.
- Dupont S., Brunet Y., 2009. Coherent structures in canopy edge flow: a large-eddy simulation study. *Journal of Fluid Mechanics* 630, 93-128.
- Dupont S., Gosselin F., Py C., de Langre E., Hémon P., Brunet Y., 2010. Modelling waving crops using large-eddy simulation: comparison with experiments and a linear stability analysis. *Journal of Fluid Mechanics* 652, 5-44.
- Dupont S., Bonnefond J.-M., Irvine M., Lamaud E., Brunet Y., 2011. Long-distance edge effects in a pine forest with a deep and sparse trunk space: in situ and numerical experiments. *Agricultural and Forest Meteorology* 151, 328-344.
- Dupont S., Irvine M., Bonnefond J.-M., Lamaud E., Brunet Y., 2012. Turbulent structures in a pine forest with a deep and sparse trunk space: stand and edge regions. *Boundary-Layer Meteorology* 143, 309-336.
- Dupuy L. X., Fourcaud T., Lac P., Stokes A., 2007. A generic 3D finite element model of tree anchorage integrating soil mechanics and real root system architecture. *American Journal of Botany* 94, 1506-1514.
- Fourcaud T., Ji J.-N., Zhang Z.-Q., Stokes A., 2008. Understanding the impact of root morphology on overturning mechanisms: a modelling approach. *Annals of Botany* 101(8), 1267-1280.
- Fournier M., 2012. Projet FOR-WIND : Adaptation sylvicole et économique de l'aménagement forestier au risque vent. AAP ANR AgroBiosphère 2012. 41 p.
- Gardiner B., Suarez J., Achim A., Hale S., Nicoll B. 2004. ForestGALES: a PC-based wind risk model for British forests, version 2.0 [computer program]. Forestry Commission, Edinburgh.
- Gardiner B., Byrne K., Hale S., Kamimura K., Mitchell S. J., Peltola H., Ruel J. -C., 2008. A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests. *Forestry* 81(3), 447-463.
- Gardiner B., Schelhaas M.-J., Nicoll B., 2012. Mapping current and projected key European forest risks. Report FP7-226544-MOTIVE / D4.1B. <http://motive-project.net/deliverables.php?P=35&SP=45>
- Gaztelumendi S., Egaña J., Otxoa-de-Alda K., Hernández R., Aranda J., Anitua P., 2012. An overview of a regional meteorology warning system. *Advances in Science Research* 8, 157-166.
- Hale S., Gardiner B., Wellpott A., Nicoll B., Achim A., 2012. Wind loading of trees: influence of tree size and competition. *European Journal of Forest Research* 131(1), 203-217.
- Khuder H., Stokes A., Danjon F., Gouskou K., Lagane F., 2007. Is it possible to manipulate root anchorage in young trees? *Plant Soil* 294, 87–102.

- Köstler J, Brückner E, Bibelriether H., 1968. Die Wurzeln der Waldbäume. Hamburg, Germany: Paul Parey.
- Los S., Rosette J., Kljun N., North P., Chasmer L., Suárez J., Hopkinson C., Hill R., Van Gorsel E., Mahoney C., 2012. Vegetation height and cover fraction between 60° S and 60° N from ICESat GLAS data. *Geoscientific Model Development* 5, 413-432.
- Mooney S.J., Pridmore T.P., Helliwell J., Bennett M.J., 2012. Developing X-ray computed tomography to non-invasively image 3-D root systems architecture in soil. *Plant and Soil* 352, 1–22.
- Pivato D., 2014. Les interactions vent-forêt en condition de tempête : un modèle couplé prenant en compte la rupture des arbres. Thèse de Doctorat, École Doctorale SDU2E, Toulouse, France, 121 p.
- Pivato D., Dupont S., Brunet Y., 2014. A simple tree swaying model for forest motion in windstorm conditions. *Trees*, 28, 281-293.
- Poëtte C., Gardiner B., Bohm M., Dupont S., Brunet Y., 2014. The influence of forest fragmentation on wind flow and the risk of wind damage. IUFRO 2014 Wind and Trees International Conference, Águas de São Pedro, São Paulo, Brazil, 3-8 August 2014.
- Raffin A., Bouffier L., 2014. Les variétés de pin maritime sont-elles plus sensibles à la tempête que les peuplements non améliorés ? In : GIS GPMF (Ed.), Les cahiers de la reconstitution n°4
- Rahardjo H., Harnas F.R., Leong E.C., Tan P.Y., Fong Y.K., Sim E.K., 2009. Tree stability in an improved soil to withstand wind loading. *Urban Forestry & Urban Greening* 8(4), 237-247.
- Rodriguez M., de Langre E., Moulia B., 2008. A scaling law for the effects of architecture and allometry on tree vibration modes suggests a biological tuning to modal compartmentalization. *American Journal of Botany* 95(12), 1523-1537
- Rummukainen M., 2012. Changes in climate and weather extremes in the 21st century. *WIREs Clim Change* 3, 115–129.
- Sellier D., Fourcaud T., 2009. Crown structure and wood properties: influence on tree sway and response to high winds. *American Journal of Botany* 96(5), 885-896.
- Schelhaas M.J., 2008. Impacts of natural disturbances on the development of European forest resources: application of model approaches from tree and stand levels to large-scale scenarios. *Dissertationes Forestales* 56, 28 p.
- Stokes A., Berthier S., Sacriste S., Martin F., 1998. Variations in maturation strains and root shape in root systems of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Trees* 12(6), 334-339.
- Wu Y., Guo L., Cui X., Chen J., Cao X., Lin H., 2014 Ground-penetrating radar-based automatic reconstruction of three-dimensional coarse root system architecture *Plant Soil* 383,155–172.
- Yang M., Défossez P., Danjon F., Fourcaud T., 2014. Tree stability under wind: simulating uprooting with root breakage using a finite element method. *Annals of Botany*. doi:10.1093/aob/mcu122