

LES CAHIERS de la Reconstitution

SYLVICULTURE ET STABILITÉ

édito

Les effets de la tempête de janvier 2009 (ouragan Klaus) aggravés par les dégâts d'insectes ravageurs en 2010 et 2011 se traduisent par la nécessité de reconstituer 200 000 hectares de forêts en Aquitaine. C'est le plus grand chantier de reboisement d'Europe. Tous ceux qui sont concernés, en premier lieu les sylviculteurs sinistrés, souhaitent s'engager dans cette vaste entreprise en connaissance de cause, en particulier au travers d'itinéraires techniques de reconstitution susceptibles de limiter les risques et d'améliorer la résilience de la forêt de production.

Ces "Cahiers de la reconstitution" n'ont d'autre ambition que de les accompagner dans cette démarche essentielle mais difficile. Ils sont le fruit d'un dialogue permanent et responsable entre la Recherche, le Développement forestier, les représentants de la forêt privée et les gestionnaires de la forêt publique, au sein du groupement d'intérêt scientifique Groupe Pin Maritime du Futur (GPMF). Le GPMF s'est donné pour objectif de dresser ici un état des connaissances, en rappelant ce qui a été démontré, mais également ce qui reste à expérimenter, ainsi que les recherches en cours. Au-delà de cet état des lieux, nous souhaitons aussi exposer les questionnements qui s'imposent face à un contexte économique et environnemental en évolution, et proposer des pistes d'action.

Le Groupe Pin Maritime du Futur



Ce Cahier s'ouvre sur l'expérience européenne en matière de dégâts liés aux vents forts et sur l'établissement d'une base de données la plus complète et la plus large possible en Aquitaine. Force est de reconnaître que les éléments de connaissance sur l'impact du choix des espèces, des techniques sylvicoles ou des caractéristiques stationnelles sont souvent contradictoires. Ensuite nous faisons le point sur les critères les plus fiables concernant la résistance au vent des peuplements du Sud-Ouest. Nous ouvrons aussi ce cahier à des scientifiques du Royaume-Uni et de Nouvelle Zélande pour leurs expériences sur ce sujet.

Enfin, un spécialiste de la circulation du vent à l'échelle du paysage fait le point sur les avancées et les questions encore posées quand on essaye de comprendre la variation des caractéristiques du vent à larges échelles.

Céline Meredieu, INRA ; Amélie Castro, CRPF Aquitaine ; Rédactrices en chef

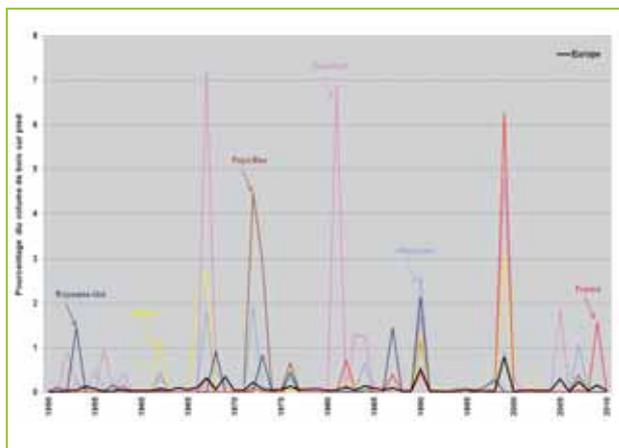
Qu'apprend-on des tempêtes à l'échelle européenne ?

Barry GARDINER, Forest Research, Royaume-Uni
Céline MEREDIEU, INRA

Le rapport final pour le projet EFI-led sur l'impact passé et à venir des tempêtes sur les forêts européennes contient un examen des connaissances scientifiques et à dire d'experts de 8 pays.

Les tempêtes sont un phénomène répandu en Europe, surtout en hiver et le long des côtes de l'Atlantique.

Plus de 130 tempêtes ont été identifiées comme ayant causé des dégâts notables aux forêts dans l'Union Européenne depuis 1950.



Dégâts en pourcentage du volume de bois sur pied pour 6 pays européens de 1950 à 2010 (Schelhaas, communication personnelle et Gardiner et al., 2010)

Une vaste base de données de toutes ces tempêtes, et une base de données plus détaillée concernant 11 de ces tempêtes ont été créées. Ce rapport a proposé de classer les tempêtes sur la base du pourcentage de volume de bois sur pied qui est touché, car il est plus instructif de classer les tempêtes en fonction de leur impact sur la forêt (importance économique des dégâts de tempête pour le secteur forestier) plutôt que sur des variables météorologiques (vitesse maximale du vent).

Parmi les 11 tempêtes spécifiques détaillées, deux ont concerné la Forêt d'Aquitaine. **La tempête de 1999 (en fait deux tempêtes consécutives, Lothar au nord et Martin sur le sud ouest) a été la plus destructrice pour les forêts européennes.** Plus de 240 Mm³ de bois ont été abattus dans 15 pays. La France a été le pays le plus touché avec 176 Mm³ (3 fois la récolte annuelle, 8,4 % du volume



Photo C. Meredieu, INRA

sur pied). Les attaques d'insectes qui ont suivi ont accru les dégâts jusqu'à la fin de l'année 2001 à la fois en France et en Allemagne (4 Mm³ supplémentaires de dommages en France). A cette période, les prix du bois ont chuté avec une estimation de 6 milliards d'euros de recettes perdues pour la France.

En 2009, la tempête Klaus a été la deuxième en 10 ans à toucher la région des Landes et le nord de l'Espagne (en France, 1,8 % du stock sur pied national, mais 30 % de la région Aquitaine). **En région Aquitaine, 41 Mm³ sur 175 Mm³ de bois sur pied ont été touchés.** Dans les peuplements endommagés, de nombreux arbres ont ensuite été attaqués par les scolytes. Les dégâts de scolytes ont été aggravés par les défoliations causées par une pullulation concomitante de chenille processionnaire. Le prix moyen à la coupe rase du pin maritime est tombé de 40 euros par m³ avant la tempête à quelques euros par m³ en 2009. Les dégâts causés par Klaus sont estimés à un milliard d'euros avec un fort impact sur l'industrie forestière locale (perte de valeur de marché). Si d'autres coûts directs (perte de valeur future, augmentation du coût de reboisement) et les coûts indirects (dégâts secondaires, exploitation différée) sont inclus, la perte totale pour les propriétaires forestiers se situe entre 1,6 et 2 milliards d'euros.

Il n'y a pas de système commun de déclarations ou d'analyses des dommages dus au vent à travers l'Europe comme pour tous les autres types de dégâts (abiotiques et biotiques). Cela conduit à des incertitudes dans les niveaux relatifs de dommages dus au vent dans les différentes parties de l'Europe et rend difficile l'évaluation des différents aléas. Néanmoins, ce rapport montre que **les tempêtes sont responsables de plus de 50 % de tous**

les dommages causés aux forêts européennes et il y a en moyenne deux tempêtes destructrices (>160 km/h) en Europe chaque année. L'augmentation de la surface forestière, du volume du bois sur pied et de l'âge moyen des forêts à travers l'Europe dans les 60 dernières années ont contribué à l'augmentation des dégâts observés. En d'autres termes, **la raison de l'augmentation des dégâts ne semble pas être principalement les changements dans les pratiques forestières ou les conditions météorologiques, mais simplement l'augmentation constante du volume sur pied des forêts européennes, susceptibles d'être endommagées.**

L'importance et la localisation des dégâts, ainsi que la vulnérabilité des forêts face au vent sont le résultat d'interactions complexes entre les conditions météorologiques, le type de sol, la composition des massifs forestiers et la gestion passée du peuplement forestier. Les preuves de l'impact de certaines opérations forestières, du choix des espèces ou des conditions stationnelles sont souvent fragiles, manquantes ou contradictoires. Néanmoins, ces paramètres de vulnérabilité sont les facteurs principaux impliqués dans les niveaux de dégâts à l'échelle locale (peuplement) et à l'échelle du paysage. **La vitesse maximale du vent en rafale est fortement corrélée au niveau maximal potentiel de dégâts. La hauteur des arbres est un facteur important de leur vulnérabilité ; au contraire la structure du peuplement ne semble avoir que peu d'influence sur la stabilité des peuplements. Les caractéristiques des sols et des paysages permettent d'expliquer une grande partie de la variation des dégâts entre les peuplements.** Mais ne considérer qu'un facteur décrivant le site ou le peuplement de manière isolée pour évaluer la vulnérabilité d'une forêt peut entraîner des conclusions erronées.

Le changement climatique risque d'aggraver le niveau de dégâts des tempêtes car la température et les précipitations qui sont des facteurs essentiels influençant le risque de dégâts sont parmi les principales variables du changement climatique. Ainsi, l'augmentation des précipitations qui accompagnent les tempêtes et qui entraînent la saturation en eau des sols accentuera le risque de dégâts. Des températures hivernales plus élevées conduisant à de plus longues périodes pendant lesquelles les sols sont dégelés contribueront également à une hausse des niveaux de



Photo CRPF

dégâts dans les pays du Nord. Les estimations les plus fiables évaluent à 2 % les pertes de séquestration de carbone par les forêts au niveau européen dues aux dégâts de tempête. Avec le changement climatique, ce chiffre pourrait atteindre 5 % d'ici la fin du siècle si l'accumulation du bois sur pied continue au même rythme.

Il y a une grande quantité d'informations et de connaissances au sein de l'Europe sur les causes de dégâts de la tempête et les meilleures méthodes pour faire face à leurs conséquences. Toutefois, cette information est très dispersée, parfois obsolète et n'est disponible que dans certaines langues. La plupart des pays d'Europe affectés par les dégâts de tempête répondent par des mesures semblables. Celles-ci comportent souvent l'octroi de subventions pour la récolte, le transport et la restauration des forêts, la dérogation à court terme des contrôles, et l'établissement de directives sur les meilleures méthodes pour rétablir ou régénérer les forêts touchées. La similitude des approches rend possible à l'échelle de l'Europe la production de recommandations générales à appliquer après une tempête, ainsi que la création d'un guide de bonnes pratiques et le développement d'outils politiques adaptés.

► Pour en savoir plus

- Rapport à télécharger (Gardiner et al., 2010) : www.efiatlantic.efi.int/portal/portal/1465
- Base de données des tempêtes : www.efiatlantic.efi.int/portal/databases/European_storms_catalogue

Rassembler l'expertise et les connaissances sur les facteurs de stabilité des peuplements forestiers

Amélie CASTRO, CRPF Aquitaine

Les tempêtes provoquent de lourds dégâts dans les forêts de nombreux pays. Prendre en compte ce risque, adapter la gestion forestière pour y faire face dans la mesure du possible sont des sujets d'étude anciens et récurrents.

La compréhension des mécanismes jouant sur la stabilité des peuplements forestiers est en constante évolution, en raison de l'utilisation de modèles mathématiques de plus en plus performants. Couplés à l'utilisation d'images satellite pour l'estimation et la localisation des dégâts, ces outils permettent d'affiner l'analyse de l'impact réel et d'améliorer la prédiction.

Après la tempête Klaus, il a semblé nécessaire de compléter la bibliographie réalisée après les tempêtes de 1999, afin de **disposer d'une base de connaissances la plus complète et récente possible**. L'objectif de ce travail était aussi de **recueillir les résultats scientifiques et techniques d'autres régions ou pays**, en mettant l'accent sur les retours d'expérience.

L'ouvrage collectif « La forêt face aux tempêtes » publié en 2009 par le GIP Ecofor a constitué une base autour de laquelle les recherches bibliographiques ont été organisées dans le cadre du GIS Groupe Pin Maritime du Futur et de l'IEFC (projet INTERREG IVB REINFFORCE).

Entre 2009 et début 2011, **265 documents ont ainsi été sélectionnés et référencés dans une base bibliographique facilement partageable ou échangeable**. Les articles scientifiques sont majoritaires mais on s'est attaché à inclure des rapports et manuels techniques (retour d'expérience et transfert de résultats de recherche), des actes de colloques et séminaires, des résultats de projets, des travaux universitaires ainsi que des synthèses bibliographiques et des plaquettes de vulgarisation.

La recherche a été volontairement restreinte aux publications traitant des tempêtes des latitudes tempérées. La seule exception concerne certains articles et rapports relatifs aux cyclones qui affectent régulièrement les forêts de pins (yellow pines - *Pinus taeda*, *P. echinata*, *P. palustris*, *P. elliottii* et *P. rigida*) du sud-est des Etats-Unis. On a aussi recherché en priorité les documents traitant de peuplements ou systèmes forestiers proches de ceux affectés par la tempête du 24 janvier 2009 : pins, conifères, plantations mais aussi peupliers. **La couverture géographique est ainsi très large** : Europe (France, Allemagne, Royaume-Uni, Suède, Finlande, Suisse) mais aussi Etats-Unis, Canada, Japon et Nouvelle-Zélande.

LES PRINCIPAUX THÈMES

- **Résistance au vent des arbres et des peuplements** : ancrage racinaire, tests de résistance, modèles mécanistes, influence de facteurs liés à la station et à la topographie.
- **Influence de la sylviculture sur la stabilité** : traitement sylvicole, densité, éclaircies, coupes, âge d'exploitabilité, lisières.
- **Circulation du vent dans un peuplement et dans un paysage forestier** : modèles de flux, influence de l'organisation spatiale du territoire, prédiction de dégâts.
- **Retours d'expérience** : gestion de crise, analyse des dégâts et études statistiques, recommandations techniques pour la reconstitution et la gestion, tempêtes de 1987 (Royaume-Uni, France), 1990 (Allemagne, Suisse), 1999 (France, Allemagne, Suisse), 2005 (Suède), 2007 (Suède, Europe centrale), etc.
- **Historique des tempêtes dans différentes régions du monde**.
- **Tempêtes et changement climatique** : évolution possible du risque (fréquence et intensité), prise en compte des événements extrêmes dans les modèles climatiques.

L'appréhension globale des conséquences des tempêtes ne se limite pas à ces aspects : on trouve nombre d'articles et guides techniques traitant spécifiquement de la gestion de crise (exploitation des chablis, évolution du marché, organisation des acteurs...) ou des conséquences sanitaires de ces événements catastrophiques. Ces domaines n'ont volontairement pas été approfondis ici.

La vocation de cette base est d'être partagée et enrichie progressivement. Elle doit pouvoir permettre d'alimenter la réflexion sur la reconstitution et la gestion future du massif landais. Dans ce cadre elle se veut complémentaire d'autres travaux de recherche ou de synthèse réalisés sur le même sujet après la tempête Klaus, comme l'étude réalisée par L'EFI Atlantic sur les tempêtes en Europe.

► Pour en savoir plus

- Base de données : www.efiatlantic.efi.int/portal/databases/storm_damages_and_tree_stability_references
- Documentation du CRPF Aquitaine : www.crpfaquitaine.fr/documentation.php

Sylviculture et stabilité des peuplements de pin maritime

Céline MEREDIEU, INRA

Les aléas abiotiques (vent, froid, gel/neige, sécheresse/chaleur, feu, glissement de terrain, inondation, explosion volcanique/tremblement de terre) constituent une menace pour les forêts. Ces aléas ne peuvent pas être éliminés, mais il est parfois possible de mettre en place des actions de prévention pour en limiter leurs effets. La gestion des risques peut être décomposée en quatre grandes étapes : l'identification des facteurs de vulnérabilité face à l'aléa, l'évaluation du risque, l'évaluation des options de gestion et la mise en œuvre du plan d'action choisi. Des difficultés résident dans le processus d'évaluation des risques et l'évaluation des options de gestion. Cela est dû au manque de connaissance des processus et de leurs interactions face à l'aléa et à la **rareté de l'information climatologique nécessaire pour convertir ensuite des niveaux de dégâts en probabilités d'occurrence.**

Une mauvaise compréhension du risque se traduira par une évaluation trop simpliste souvent influencée par des préjugés personnels : par exemple l'affirmation « le pin maritime ne résiste pas au vent » qui porte un jugement global sur l'espèce, ne prend pas en compte les caractéristiques des arbres, des sites et de leur gestion. Les peuplements des dunes littorales du Sud-Ouest peu ou pas touchés par les deux tempêtes Martin et Klaus montrent qu'au contraire la vulnérabilité de cette espèce varie selon ses conditions stationnelles de croissance. La vulnérabilité des peuplements est le résultat d'une interaction complexe entre la vitesse de vent, la durée de la tempête, la topographie et les conditions du site, et enfin les dimensions du peuplement. La gestion face aux risques liés au vent consiste donc à agir sur **tous les paramètres de la vulnérabilité sur lesquels on a un levier d'action possible.**

DES PARAMETRES CONNUS

- L'espèce par le choix de son adaptation à la station,
- Le sol, lors de la préparation de l'installation du peuplement et par les opérations de drainage¹,
- Les dimensions des arbres et du peuplement, lors du choix du scénario de densité,
- La gestion du peuplement lors du choix des dates et de l'intensité des coupes,

- Le voisinage du peuplement,
- La position topographique du peuplement dans le paysage.

Parmi les dimensions des arbres ou des peuplements qui ont un rôle certain dans la stabilité, **la hauteur** est un des critères mesurables le plus important. Plus la hauteur est importante, plus la charge de la cime est importante, plus le centre de gravité de l'arbre est haut et plus le bras de levier est long. Ainsi les expériences de déracinement comme les résultats de modélisation mécaniste donnent des résultats conformes aux études statistiques : **la hauteur est une variable pertinente au niveau individuel et au niveau du peuplement et elle est toujours corrélée positivement au niveau de dégâts.** Ces résultats peuvent permettre d'émettre des hypothèses sur le rôle indirect de la fertilité de la station sur la résistance au vent. En effet, si une plus grande hauteur atteinte entraîne des dégâts alors les sites les plus fertiles, qui permettent une croissance en hauteur des arbres plus dynamique, seraient les plus vulnérables. Par corrélation, l'âge est un facteur associé. **La recommandation immédiate est de ne pas retarder l'âge d'exploitation des peuplements voire de l'anticiper pour certaines zones et/ou essences.**



Éclaircie dans un peuplement de pin maritime (photo CRPF)

Alors que la structure du peuplement et le mélange d'essences n'ont que peu d'influence sur la stabilité, les éclaircies ont un impact marqué. **Ainsi, les peuplements sont particulièrement sensibles après une éclaircie car ils perdent la composante de leur résistance liée au soutien mutuel entre les arbres alors que le régime de turbulence dans le peuplement change.** Après une éclaircie, les arbres doivent donc « s'adapter » à ce nouvel environnement. C'est cette raison qui pousse les forestiers

¹ Ce thème important de l'ancrage racinaire pour la stabilité des arbres sera traité dans un numéro ultérieur des cahiers de la reconstitution.

de certaines régions à ne pratiquer aucune intervention dans les sites particulièrement exposés au vent. En revanche, en Aquitaine, compte tenu des densités à l'installation, les éclaircies dans les peuplements de Pin maritime s'imposent pour éviter d'obtenir des arbres trop grêles. Pour mieux raisonner ce risque spécifique lié au vent, le gestionnaire forestier devra considérer les éléments suivants :

- **pour des éclaircies réalisées tôt dans la vie du peuplement, la période de déstabilisation est certainement plus courte** car la croissance individuelle des arbres est plus forte pendant le jeune âge ;
- **un intervalle long entre deux éclaircies et des éclaircies fortes impliquent sans doute une déstabilisation du peuplement plus forte** car la fermeture du couvert sera d'autant plus difficile à obtenir que la croissance des arbres sera lente et l'espacement entre les arbres fort (forte chute de la densité après l'éclaircie).

Enfin le dernier facteur influençant la stabilité des peuplements est **le sol** : toutes les études s'accordent pour dire qu'un enracinement superficiel lié à la présence d'un horizon compact, ou d'une nappe à faible profondeur, rend les peuplements plus vulnérables. **Dans les Landes de Gascogne, la stabilité des peuplements serait plus dépendante de la hauteur de nappe que de la profondeur d'aliots.** De plus, la force d'ancrage des racines est réduite par l'engorgement du sol dû aux fortes pluies qui accompagnent les tempêtes et à un mauvais drainage. Ces deux raisons inciteraient à **la qualité de l'entretien des fossés tout le long de la vie du peuplement dans les stations humides du massif.** Il n'a pas été montré d'influence de la fertilisation phosphatée, habituellement préconisée en landes humides et mésophiles, sur la stabilité des peuplements. En revanche, une forte fertilisation azotée augmenterait les dégâts.

Le risque évolue donc avec les caractéristiques des arbres dans le peuplement, avec la gestion du peuplement (entretien, drainage, espacement initial, éclaircie, etc.), **les caractéristiques du site** (sol et hydrologie) et **l'emplacement du peuplement.** Il est donc évident que le risque est extrêmement spécifique au site et une première évaluation doit être effectuée à l'échelle du peuplement puis à l'échelle du paysage. Dans ce domaine, les progrès actuels de la simulation numérique s'avèrent porteurs d'espoir. Des articles récents montrent que certains niveaux de fragmentation d'un paysage forestier (coupe rase récente, différences de hauteurs de peuplements adjacents, transition entre forêt et autres usages du sol) pourraient conduire à une augmentation de la turbulence, et donc à un accroissement des risques en cas de vent violent.



Vue aérienne de la mosaïque des peuplements forestiers dans le massif des Landes de Gascogne (photo CRPF)

Aujourd'hui, les recommandations seraient de minimiser la fragmentation de la forêt qui crée de longues lisières plus fragiles. (photo ci-dessus)

Deux grands types d'outils restent à développer sur le massif pour que les sylviculteurs puissent prendre leurs décisions de gestion. D'une part, à large échelle, il faudrait pouvoir disposer de **cartes des facteurs « stables » influençant la vulnérabilité des peuplements** pour distinguer la variation de ces différents facteurs, à l'échelle régionale, toutes choses égales par ailleurs :

- les vitesses et direction de vent (combinant plusieurs caractéristiques dont l'information du temps de retour de ces vitesses),
- la fertilité des sols sur la base d'un indice de fertilité spatialisé du Pin maritime (hauteur dominante à un âge de référence, dépendant des caractéristiques du milieu).

D'autre part, et compte tenu de la complexité des processus qui conduisent aux dégâts liés au vent, il faut poursuivre le **développement des outils de modélisation** mécaniste capables de comparer les niveaux de vulnérabilité des itinéraires sylvicoles au cours du temps pour fournir des clés pour l'évaluation des options de gestion.

► Pour en savoir plus

- **La forêt face aux tempêtes**
Bírot Y., Landmann G., Bonhême I. (Coord.) 2009
Collection Synthèses, Editions Quae, Versailles
www.quae.com
- **Expertise collective scientifique et technique à visée prospective sur l'avenir du massif forestier landais - Critère C1 : Vulnérabilité aux tempêtes**
Landmann G., Danjon F., Brunet Y., Meredieu C. 2010
Rapport d'experts. 22 p.
<http://landes.gip.ecofor.org/data/RFC1Tempete0410.pdf>
- **Rapport de synthèse du groupe de travail itinéraires sylvicoles. Expertise sur l'avenir du massif des Landes de Gascogne : 18 p.**
<http://www.crpfquaine.fr/docs/files/Temp%C3%A0te%20Klaus%202009/GIP%20ECOFOR%20RAPPORT%20DE%20SYNTHESE.pdf>

La gestion des forêts face aux tempêtes : l'expérience du Royaume-Uni

Barry GARDINER, Bill MASON,
Forest Research, Royaume-Uni

La prise en compte du risque de dégâts de tempête pour les forêts fait partie intégrante de la gestion forestière au Royaume-Uni. En raison du climat océanique des îles britanniques, les tempêtes sont fréquentes. Chaque année, on compte environ 150 dépressions atlantiques. Les vents les plus forts soufflent généralement durant l'hiver (Octobre à Mars) et les vitesses de vent sont plus élevées en allant vers le nord et l'ouest du pays. **Les dégâts de tempête s'élèvent à environ 15 % des récoltes annuelles des forêts de conifères et les tempêtes les plus importantes ont ruiné presque 2 % du volume total sur pied des forêts du Royaume-Uni.**

Des dégâts de tempêtes élevés, en particulier en janvier 1953, janvier 1968, janvier 1976, octobre 1987 et janvier 1990 ont conduit à la mise au point d'un premier système d'aide à la gestion qui fournit des classes de niveaux de dégâts pour les forêts de plantation. Le lien fort entre la hauteur des arbres, la date de la dernière éclaircie et le niveau de dégâts a conduit au développement de ce système appelé « la classification des risques de vent » (WHC) qui préconise la coupe rase du peuplement à une hauteur dite « terminale » et qui limite les éclaircies dans les zones de vitesses de vent élevées. (Miller, 1985). Dans le même temps, l'utilisation du labour lors de la plantation a été réduite au profit de la plantation sur butte qui faciliterait une mise en place meilleure et plus symétrique du système racinaire dans ces sols peu profonds (*photo ci-contre*). Plus récemment, un intérêt croissant a été porté aux scénarios sylvicoles qui préconisent la régénération naturelle, les éclaircies régulières et un couvert continu qui contribueraient à augmenter la résilience des forêts. Cependant, ces préconisations ne peuvent pas être facilement appliquées car la plupart des forêts sont constituées de plantations monospécifiques trop âgées pour démarrer une telle conversion sans accroître leur niveau de risque de dégâts. Cette conversion nécessitera donc la définition d'une stratégie à long terme visant à établir de tels systèmes sylvicoles.

Afin de réduire les dégâts du vent, un outil informatique a été élaboré appelé ForestGALES pour aider les gestionnaires forestiers à prendre des décisions plus argumentées sur la gestion de leurs forêts. Cet outil permet de comparer l'impact du choix de différentes



Chablis dans un peuplement d'Épicéa de Sitka montrant la faible profondeur d'enracinement, typique des forêts du Royaume-Uni. (Photo B. Gardiner)

espèces, des éclaircies et de la création de trouées sur la stabilité des peuplements. Il tient compte de la localisation de la forêt pour qualifier son exposition au vent et du type de sol pour quantifier la profondeur d'enracinement. Ce système offre une approche beaucoup plus souple que le système WHC et il est actuellement utilisé par les forestiers, les aménagistes des forêts publiques et les assureurs. Il a été couplé aux modèles de croissance des principales essences forestières et à un système d'informations géographiques (SIG). Il permet d'identifier les zones et les peuplements les plus à risques dans leurs états actuels et futurs. A l'heure actuelle, ce logiciel est conçu exclusivement pour les peuplements monospécifiques et réguliers de conifères, mais le travail est en cours pour rendre l'outil capable de donner des résultats pour les structures de peuplement plus complexes en prédisant le risque au niveau de chaque arbre composant le peuplement.

Actuellement il n'existe aucun système spécifique de réglementation ou de législation sur la question des dégâts de vent pour les forêts du Royaume-Uni. Pour les forêts publiques, **on encourage l'utilisation de guides opérationnels qui contiennent les dernières informations disponibles et les résultats des simulations des outils d'évaluation des risques de dégâts dus au vent.** Cependant il n'existe pas de législation contraignante pour la gestion forestière. Outre



Photo Forest Research

les décisions habituellement prises après une tempête, il a été mis en place un « Comité d'action pour les chablis » : ce comité avait la responsabilité d'évaluer le niveau de dégâts, de fournir des conseils aux propriétaires forestiers et aux exploitants en établissant la liste des entrepreneurs et des marchands de bois et enfin de conseiller les ministres. Après certaines tempêtes, comme celle de 1987, de l'argent supplémentaire avait été mis à disposition par le gouvernement britannique et par d'autres organismes pour aider au nettoyage et à la restauration des forêts touchées. De plus, depuis 1988, les revenus forestiers ne sont plus soumis aux impôts.

Au Royaume-Uni, le guide d'actions qui existe pour le personnel de la forêt publique et qui est destiné aux responsables de terrain, donne des conseils stratégiques de gestion après les dégâts de tempête. Le document intitulé « Conseils pour gérer les chablis dans les forêts » fournit aux propriétaires des conseils sur la façon de gérer la récolte et la commercialisation du bois avant la reconstitution. Un « Plan d'urgence chablis pour l'Écosse »

offre des conseils pour quiconque est impliqué dans la planification et la gestion suite à un événement catastrophique lié au vent en Écosse : ce document s'adresse au gouvernement écossais, à la Forest Commission en Écosse, aux entreprises privées du secteur forestier, à l'industrie de transformation du bois et aux petits propriétaires forestiers.

En conclusion, il existe réellement une gestion forestière de prévention des risques de dégâts liés au vent au Royaume-Uni, mais cette gestion tend encore à encourager l'abattage des arbres sur les sites les plus exposés au vent avant que les arbres n'aient atteint leur valeur économique maximale. Avec la disponibilité de systèmes informatiques d'aide à la décision tels que ForestGALES et une compréhension croissante de la stabilité des régimes sylvicoles alternatifs, il y a un intérêt croissant dans le développement de systèmes forestiers plus résistants aux tempêtes et qui offrent une gamme plus étendue d'avantages, y compris pour la production de bois de haute qualité. Cependant, il reste encore un certain nombre d'incertitudes dans notre compréhension de l'interaction des forêts et du vent. En particulier **il subsiste encore des questions concernant la vulnérabilité relative des différentes espèces, la durée de la période pendant laquelle les arbres sont vulnérables puis s'adaptent après une éclaircie, et à déterminer si les peuplements avec une structure irrégulière et plurispécifique offrent des avantages réellement mesurables en terme de stabilité.** De plus, les conséquences potentielles du changement climatique global sur les régimes des vents en l'Europe restent extrêmement incertaines.

► Pour en savoir plus

- **Development of a GIS based wind risk system for British forestry**
Gardiner, B. A., Suárez, J., Quine, C. P. (2003)
In: Ruck, B., Kottmeier, C., Mattheck, C., Quine, C., Wilhelm, G. (Ed.), International Conference 'Wind Effects on Trees' Karlsruhe, Germany, pp. 145-150.
Document à télécharger en anglais : www.forestry.gov.uk/fr/INFD-83NDFP
- **ForestGALES: A PC-based wind risk model for British Forests. User's Guide Version 2.0.**
Forestry Commission
Gardiner, B., Suárez, J., Achim, A., Hale, S. and Nicoll, B. (2004).
Site web en anglais : www.forestry.gov.uk/forestry/HCOU-4U4J3E

Les dégâts dus au vent : le contexte paysager

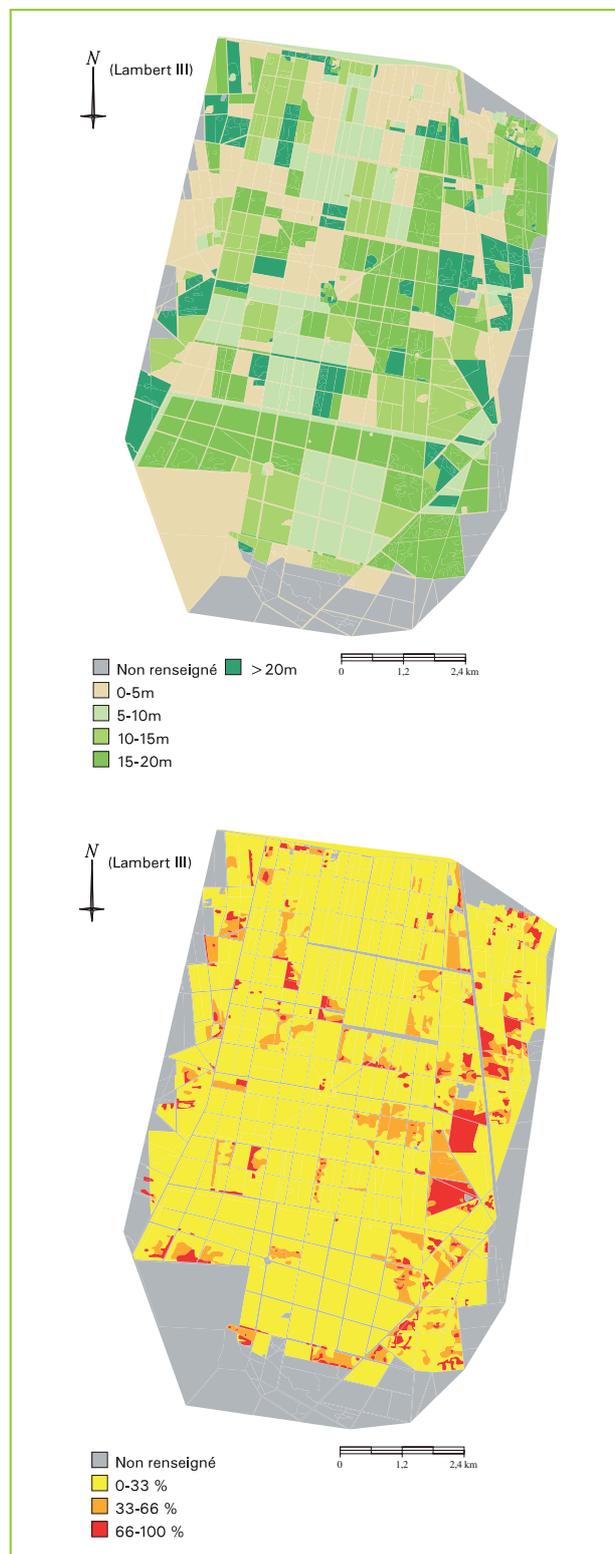
Yves BRUNET,
INRA

La grande majorité des études liées aux dégâts occasionnés par les tempêtes sur les forêts ont été jusqu'à présent menées à l'échelle de parcelles forestières ; on a souvent cherché à établir des relations entre taux de dégâts moyens observés et caractéristiques stationnelles telles que composition spécifique, hauteur des arbres, densité, facteurs d'élancement, etc., autant de variables sur lesquelles peut jouer la sylviculture.

Une approche plus complète du problème impose de considérer également les parcelles dans leur environnement. A l'exception de rares massifs compacts, un paysage forestier est fragmenté : on y trouve des parcelles de différentes natures, des routes, des bandes de pare-feu, etc. Ceci n'est pas sans conséquences. **Chaque parcelle a des limites, ses lisières : elles transforment l'écoulement atmosphérique, qui doit s'adapter à la canopée dans laquelle il rentre. Le vent lui-même qui aborde une nouvelle parcelle est marqué par celle dont il vient : il peut être plus ou moins rapide, plus ou moins turbulent.** A l'échelle de la mosaïque régionale, la multiplicité des lisières génère une rugosité paysagère qui peut affecter l'écoulement en le « chargeant » en turbulence.

Les situations hétérogènes sont plus la règle que l'exception et un enjeu majeur des recherches en cours est de comprendre pourquoi, dans un paysage donné, les arbres tombent ici plutôt que là. Les cartes ci-contre soulignent bien la complexité du problème en montrant la très forte hétérogénéité des dommages dans un paysage forestier ; déterminer dans quelle mesure ils sont liés aux caractéristiques aérodynamiques de ce dernier est fondamental. **Une étude récente sur un parc urbain ravagé par la tempête de 1999 a ainsi montré que la localisation des dégâts s'expliquait par l'aérodynamie du site, là où aucun autre facteur (caractéristiques des sols, état sanitaire, espèces, etc.) n'avait pu le faire.**

Un premier facteur à considérer est que lorsque le vent, venant par exemple d'un champ cultivé, entre dans une parcelle forestière, ses caractéristiques sont progressivement modifiées sur une distance horizontale qui peut atteindre une dizaine de fois la hauteur du couvert h , avant de parvenir à un équilibre. Il décélère près du sol et accélère juste au-dessus du couvert, générant une couche de fort cisaillement qui croît avec la distance à la lisière et génère



Cartes des classes de hauteur (en haut) et de dégâts (en bas) observés dans la forêt de Nezer en Gironde (Brunet et al., 2009).
Remerciements à D. Guyon et S. Dayau.

des structures turbulentes. **Ainsi la vitesse diminue dans la forêt, mais la turbulence y augmente. La distance d'un arbre à la lisière est donc un facteur à considérer.**

Dans certains cas on peut observer, dans une zone située entre 2.5 et 6 h environ de la lisière, que les arbres peuvent être sollicités par des rafales de vent particulièrement intermittentes. Ce phénomène peut rendre compte, pour partie, du fait que les dégâts dus au vent se manifestent souvent non pas à la lisière même mais à l'intérieur du couvert, à quelque distance de celle-ci.

Quelques études ont été menées pour analyser l'effet de traitements de lisière, en jouant sur son étagement, sa hauteur ou sa densité. Dans une parcelle qu'une coupe rase pratiquée en amont expose brusquement au vent, la vulnérabilité des arbres peut être légèrement réduite si l'on « abrite » cette parcelle par une lisière haute et dense. Mais l'impact de telles pratiques reste limité, notamment pour les lisières établies. De telles opérations demanderaient en outre une grande anticipation des plans de gestion et poseraient de lourds problèmes logistiques.

Comme on l'a dit, la structure de l'écoulement qui aborde une parcelle dépend des zones qu'il vient de parcourir. Derrière une parcelle forestière, le vent accélère, la production de turbulence diminue et l'énergie turbulente générée par le couvert, maximale vers le sommet de couvert, se redistribue sur la verticale, dans les premières couches de l'atmosphère. Là encore, la combinaison de ces phénomènes peut entraîner l'apparition d'une région où l'énergie mécanique du vent passe par un maximum avant de diminuer plus en aval. La distance où se trouve la lisière suivante peut donc avoir un impact important sur les sollicitations aérodynamiques qui vont l'affecter.

Si la taille d'une zone ouverte peut moduler le régime de vent auquel est soumise la parcelle aval, la multiplicité de telles zones, augmentant la fragmentation du paysage, a aussi son importance. Des premiers travaux visant à analyser le comportement d'un paysage formé de parcelles forestières régulièrement espacées ont montré que l'énergie turbulente et la contrainte mécanique varient en effet d'une manière notable, en passant par un maximum pour une valeur de l'espacement valant à peu près le double de celle de la longueur des parcelles. Pour de grands espacements, l'influence d'une parcelle ne se fait guère sentir sur la suivante, et lorsqu'ils sont faibles l'écoulement ne ressent guère les clairières ; les écarts intermédiaires, eux, entraînent une forte interaction de l'écoulement avec la structure paysagère, pouvant augmenter les niveaux de turbulence. **Certains degrés de fragmentation peuvent ainsi conduire à un accroissement des risques en cas de vent violent.**

On ne peut parler d'effet du paysage sans mentionner celui du relief. Là encore peu de travaux ont été jusqu'à présent menés. Une étude récente en soufflerie sur une colline boisée modérément raide (pente 1/3) a montré que sur le tiers supérieur du côté au vent, où l'écoulement accélère, les structures turbulentes pénètrent profondément dans le couvert, alors qu'au sommet de la colline seul le tiers supérieur de la canopée est sollicité. Juste après le sommet se trouve une région relativement calme mais plus en aval, dans la moitié inférieure de la face sous le vent, la turbulence peut devenir plus active et intermittente, avec des régimes de rafales pouvant générer des sollicitations mécaniques répétées.

Ce bref survol de résultats de recherche récents donne un aperçu des connaissances sur les interactions entre écoulement atmosphérique et structure des paysages forestiers. **Ils témoignent de l'orientation actuelle des recherches vers une prise en compte de la turbulence car c'est elle, plus que le vent moyen, qui joue un rôle déterminant dans les phénomènes de casse ; vers des contextes hétérogènes, en raison de leur omniprésence ; et vers des échelles plus étendues (paysage, mosaïque régionale) que l'échelle stationnelle, de façon à prendre en compte des phénomènes non locaux** (effet, par exemple, de la multiplicité des lisières sur la turbulence atmosphérique et son impact, en retour, sur les sollicitations locales).

Ces nouvelles approches sont rendues possibles par le développement d'outils de simulation atmosphérique et mécanique, permettant de modéliser finement les interactions vent-arbre dans des contextes très variés. Elles bénéficient aussi d'études en soufflerie, fournissant de remarquables moyens de simulation physique de paysages forestiers soumis à un écoulement turbulent bien maîtrisé. Tous ces progrès permettront de bâtir des chaînes d'outils prédictifs, des plus fondamentaux aux plus finalisés, et de réaliser des études d'impact visant à optimiser les pratiques d'aménagement de l'espace forestier.

► Pour en savoir plus

- Les interactions vent-arbre, de l'échelle locale à celle du paysage : vers des approches déterministes

Brunet Y., Dupont S., Sellier D., Fourcaud T., 2009
In : La forêt face aux tempêtes. Birot Y., Landmann G., Bonhême I. (Coord.) Collection Synthèses, Editions Quae, Versailles, 229-259.
www.quae.com

Le vent, le houppier et la valeur des arbres : exemple du Pin radiata en Nouvelle Zélande

Jenny GRACE,
SCION, Nouvelle Zélande

Le vent est un facteur de risque important pour les plantations forestières en Nouvelle-Zélande. Les effets des fortes tempêtes sur les forêts sont généralement bien documentés, mais il y a eu peu de recherches sur les effets du vent sur la croissance des arbres et sur la valeur des forêts lorsque les vents sont faibles et ne conduisent qu'aux dégâts suivants :

- arbres penchés et formant du bois de compression pour corriger le défaut et se redresser,
- bris de cime entraînant le remplacement de la tige principale par une branche. Ce remplacement entraîne un développement plus fort du diamètre de cette branche et la formation de bois de compression.

Lorsqu'on compare la branchaison du pin radiata (*Pinus radiata* D. Don), mesurée sur le terrain ou celle prédite par un modèle de branchaison comme TreeBLOSSIM, on s'aperçoit que les branches de forts diamètres sont mal prédites par le modèle (*Photo ci-dessous*). Ces branches ont un angle d'insertion sur le tronc beaucoup plus faible que les autres branches (ce qui suggère que la dominance



Pin radiata avec des groupes de branches de diamètres plus forts et d'angles plus faibles que la normale (Photo R.K. Brownlie, SCION).

apicale de la tige a été affaiblie) et/ou qu'il y a une déviation de la tige principale à cet emplacement. On considère alors que ce dernier type de branches résulte le plus souvent d'un bris de cime.

Les résultats ci-dessus soulèvent des questions intéressantes, telles que :

- quelle est la perte potentielle de valeur des arbres quand la tige principale est endommagée ?
- quels critères de sélection et quel type de sylviculture doivent être appliqués afin de minimiser la fréquence des casses de la tige ?

Une étude préliminaire à l'aide de simulations a comparé la valeur de quatre peuplements mesurés par des techniques d'inventaire avec leurs valeurs simulées où les tiges sont droites et la ramification est prédite par TreeBLOSSIM. **Cette étude a montré que la perte de valeur estimée varie avec le site et est d'autant plus grande que les sites sont exposés au vent.**

Plusieurs essais de Pin radiata ont été installés pour comprendre les effets de la sélection et de la sylviculture sur la croissance et le développement des arbres. A chaque passage en mesure, un code de description lié à la forme du tronc et à la présence de dégâts, est attribué à chaque arbre. Une analyse de ces codes a montré que :

- **les plantations à faible densité (500 tiges/hectare), et sans aucune éclaircie sont particulièrement sensibles aux bris de la tige,**
- il n'y a que de faibles différences entre les différentes variétés sélectionnées pour leurs taux de croissance et la forme du tronc.

Toutes ces questions se posent aussi pour le Pin maritime et des études seraient à envisager sur ce sujet.

► Pour en savoir plus

- **Stem damage in radiata pine: Observations with respect to site, silviculture and seedlot**
Grace, J. C., Andersen, C., Brownlie, R. K., & Fritzsche, M. F. (2009).
Paper presented at the 2nd International Conference Wind Effects on Trees.
Document en anglais à télécharger :
www.forestry.gov.uk/fr/INFD-83NDFP#oct09



Directeur de la publication :
le GIS GPMF

Comité éditorial :

Patrick Pastuszka, INRA - président du GIS GPMF
Alain Bailly, FCBA
Didier Canteloup, ONF
Yves Lesgourgues, CRPF Aquitaine
Dominique Merzeau, IDF-CPFA
Annie Raffin, INRA

Rédactrices en chef :

Céline Meredieu, INRA
Amélie Castro, CRPF Aquitaine

Traductrice :

Céline Meredieu, INRA

Contact GIS GPMF :

Groupe Pin Maritime du Futur, Domaine de l'Hermitage
69, route d'Arcachon - Pierroton - 33612 Cestas Cedex
Courriel : groupe.pmf@pierroton.inra.fr

Les trois autres cahiers en préparation :

Matériel végétal de reboisement
Les techniques d'installation
Situation sanitaire et diversification du massif

R E G I O N



Avec le soutien de

AQUITAINE



RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
DE L'ALIMENTATION
DE LA PÊCHE
ET DE L'AMÉNAGEMENT
DU TERRITOIRE