

**Expertise collective scientifique et technique à visée prospective
sur l'avenir du massif forestier landais**

**Critère C1 : Vulnérabilité aux tempêtes
Rapport d'experts**

Guy Landmann, Ecofor, Frédéric Danjon, Yves Brunet et Céline Meredieu, INRA

1. La démarche

Cette analyse a été préparée en grande partie sur la base des travaux réalisés suite aux dégâts causés par la tempête Martin en 1999 dans les Landes de Gascogne.

Dans un premier temps, nous présentons succinctement l'état des connaissances relativement à la sensibilité actuelle de la forêt landaise au vent. Dans la mesure du possible, ce constat intègre l'évolution au cours des dernières décennies.

Dans un deuxième temps, nous analysons du point de vue de la contrainte vent les options présentées dans les rapports techniques.

La plupart des résultats sont synthétisés dans l'ouvrage « *La forêt face aux tempêtes* » (Biroth *et al.*, 2009 ; voir notamment Brunet *et al.*, 2009 ; Colin *et al.*, 2009 ; Danjon *et al.*, 2009a ; Meredieu *et al.*, 2009) et des compléments ont été présentés à l'occasion du Carrefour de l'Innovation Agronomique 2009 consacré au thème « *Sylviculture, forêts et tempêtes* » qui s'est tenu en juin 2009 à Bordeaux (http://www.inra.fr/ciag/colloques/forets_et_tempestes).

La démarche d'expertise a nécessité le retour aux travaux originaux jugés les plus pertinents (voir la bibliographie *in fine*) et la consultation de collègues spécialisés (liste *in fine*). Le travail a été conduit sur la base d'échanges électroniques et de quatre visioconférences réunissant les auteurs de ce rapport.

2. Etat actuel et tendanciel de la vulnérabilité de la forêt landaise au vent

Les principaux facteurs de vulnérabilité sont décrits selon le canevas suivant :

1. description de l'état des connaissances relatif au rôle de ce facteur dans la stabilité des peuplements forestiers ;
2. appréciation au moins qualitative de l'importance de ce facteur dans la stabilité générale de la forêt au vent ;
3. description de l'évolution passée du facteur considéré en lien avec celle des pratiques sylvicoles et les facteurs naturels ;

4. appréciation de la possibilité, pour le gestionnaire forestier, d'intervenir sur le facteur en question ;
5. intérêt économique des mesures d'adaptation ;
6. identification des besoins en matière de validation des avis formulés et de recherche plus en amont.

Il est en fait rare d'avoir les éléments nécessaires pour répondre à toutes ces questions ; en particulier, l'évolution temporelle et la dimension économique restent souvent mal documentées.

2.1. Rôle de l'espèce (pin maritime *versus* autres essences)

Le pin maritime, qui domine très largement dans le massif des landes de Gascogne, a subi par deux fois en dix ans de très lourds dégâts de tempête. La violence des tempêtes Martin et Klaus et l'importance des surfaces concernées expliquent-elles seules le niveau de dégâts, ou faut-il incriminer la sensibilité particulière du pin maritime ?

On ne peut répondre de façon tout à fait rigoureuse à cette question car on ne peut comparer le comportement du pin maritime à celui d'autres essences dans les conditions pédoclimatiques du massif des Landes. On peut toutefois souligner d'une part, l'aptitude du pin maritime à exploiter des conditions pédoclimatiques dominantes qui sont peu favorables à une croissance dynamique de peuplements forestiers (Danjon *et al.* 2005 ; Danjon et Fourcaud, 2009), ce qui en fait une espèce particulièrement bien adaptée au milieu landais, et d'autre part, la très grande stabilité du pin maritime sur la dune (mais tout y est différent de la lande : sol, mode d'installation, peuplement...).

Il n'en demeure pas moins que le « pin maritime du massif des Landes » est sujet à des dégâts élevés par comparaison avec d'autres essences soumises à des vents similaires. C'est ce qu'a montré une étude statistique réalisée après le passage des tempêtes Lothar et Martin et s'appuyant sur un large échantillon de placettes de l'Inventaire Forestier National (11 202 placettes réparties dans 13 départements, dont 2 806 classées en pin maritime) (Riou-Nivert *et al.*, 2005 ; Rosa, 2004 ; figure 1).

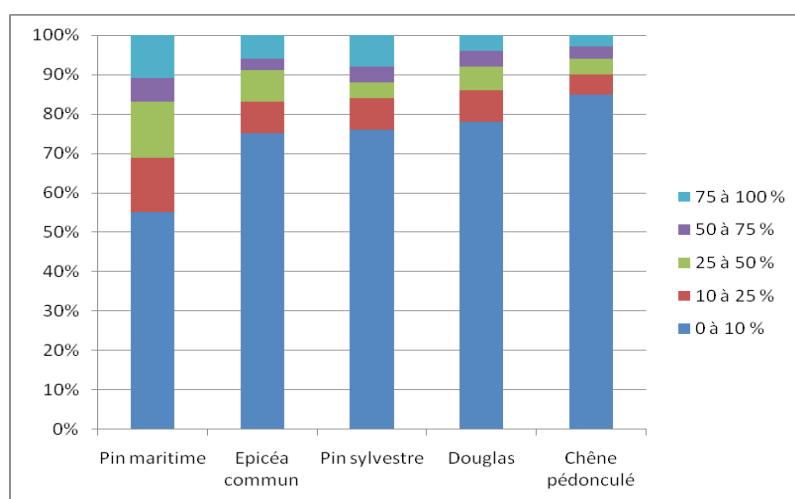


Figure 1 Niveaux de dégâts pour cinq essences forestières majeures pour les placettes ayant subi un vent de 120 à 140 km/h en décembre 1999. Les nombres de placettes sont, respectivement, de 1557, 127, 217, 106 et 752 pour le pin maritime, l'épicéa commun, le pin sylvestre, le douglas, et le chêne pédonculé. L'importance des dégâts sur pin maritime semble donc tenir à la fois à l'importance des surfaces concernées par les vents forts et la moindre stabilité de cette essence. (source : Rosa, 2004)

2.2. Caractéristiques « permanentes » du peuplement

2.2.1 Hauteur dominante des peuplements de pin maritime

La hauteur dominante des peuplements adultes âgés de 40 ans est généralement de l'ordre de 25 m. Du fait de durées de révolution raccourcies (couramment de l'ordre de 35 à 45 ans), la hauteur maximale n'est pas toujours atteinte ou l'est seulement pendant un laps de temps assez court.

Il est démontré que pour toutes les essences forestières, les dégâts dus au vent augmentent avec la hauteur des peuplements, comme la conséquence de plusieurs effets dus à la hauteur : bras de levier plus important, vent plus fort avec la hauteur (Colin *et al.*, 2009). Il y a cependant des différences entre essences. Il s'avère en particulier que les pins (sylvestre et maritime) sont sensibles dès une hauteur faible, de l'ordre de 5 m (ils sont alors souvent penchés) alors que les autres résineux ne sont sensibles qu'à partir de 10-15 m, et les feuillus à partir de 20 m.

Comparativement à la plupart des autres essences forestières françaises, l'influence d'une baisse de la hauteur semble moins prononcée chez le pin maritime (Riou-Nivert *et al.*, 2005 ; figure 2), ce qui signifierait que l'intérêt de diminuer la hauteur moyenne des peuplements serait relativement moindre que pour d'autres essences ailleurs en métropole. Cela peut aussi être dû en partie au fait que la hauteur moyenne du pin maritime est inférieure à celle de résineux de moyenne montagne par exemple, voire de feuillus sur des sols plus fertiles. L'analyse comparative de l'influence de la hauteur sur le comportement de différentes essences étant délicate, il faut toutefois considérer avec quelque prudence cette conclusion.

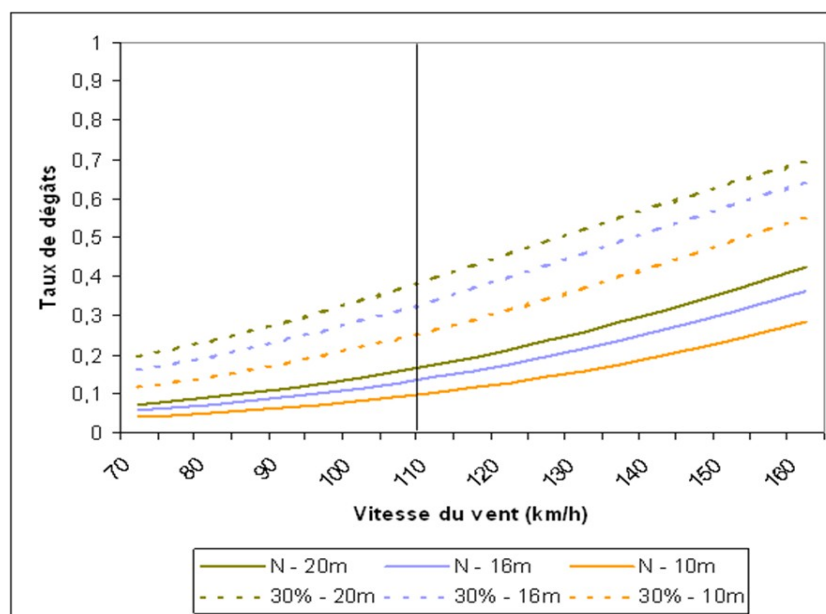


Figure 2 : Modèle décrivant la relation entre vitesse du vent, hauteur des peuplements et taux de dégâts pour le pin maritime dans les Landes après le passage de Martin en décembre 1999. L'échantillon comporte 2195 placettes IFN. Les paramètres: Hauteur dominante - Eclaircie récente – Vent ont un effet significatif ; les paramètres type de lande - Diamètre moyen - Surface terrière - H/D .n'ont pas d'effet significatif. Les peuplements sont nettement déstabilisés après une éclaircie récente portant sur 30% du volume. : à 110 km/h, les dégâts sont de 10% dans un peuplement de pin maritime de 10m de haut, de 14% pour une hauteur de 16 m, et de 34% pour un peuplement de 16 m récemment éclairci (source : Piton, 2002)(voir texte, 2.3)

Dans le nord de la France (et dans plusieurs régions européennes), il a été établi pour plusieurs essences importantes que leur hauteur dominante avait nettement augmenté au cours des décennies écoulées, sous l'effet de la modification de facteurs environnementaux (augmentation des dépôts atmosphériques et du CO₂ atmosphérique). Dans les Landes, où l'amélioration génétique et la modification des techniques culturales se superposent plus qu'ailleurs aux effets environnementaux, on peut s'attendre à des effets du même ordre.

Une réduction des durées de révolution permettrait de réduire la hauteur dominante atteinte et donc la vulnérabilité au vent des peuplements, ceci indifféremment des questions de valorisation économique.

2.2.2 Densité

La densité de peuplement agit sur la résistance au vent des arbres en influençant leur morphologie individuelle (arbre plus ou moins élancé avec un houppier plus ou moins long), mais également du peuplement en déterminant la vitesse de pénétration du vent.

La densité des peuplements de pin maritime est généralement peu élevée, du fait de densités d'installation faibles (au regard d'autres espèces régénérées naturellement) et d'une pratique relativement intensive des éclaircies. Ces pratiques produisent-elles des peuplements plus stables ? Il n'est pas évident de répondre à cette question ; de façon générale, la littérature sur l'influence de la densité des peuplements sur leur stabilité est aussi abondante que contradictoire (Colin *et al.*, 2009) et cela vaut pour le pin maritime. L'idée qu'un peuplement plus dense, compact, où l'espacement moyen entre arbres est faible, résiste mieux aux assauts du vent, est soutenue par les mesures réalisées sur un dispositif expérimental du domaine de l'Hermitage à Cestas (Cucchi et Bert, 2003) et des travaux de modélisation (Meredieu *et al.*, 2009). Une analyse de l'écoulement turbulent indique, en apparence contradiction avec ce résultat, qu'un peuplement peu dense, composé d'arbres moins élancés, plus gros et *in fine* plus stables, dans lequel le vent pénètre plus aisément, génère une plus grande vitesse moyenne mais également un moindre cisaillement dans la partie supérieure de la canopée, et des processus turbulents moins intenses (Dupont et Brunet, 2008a ; Dupont et Brunet, 2009).

En fait, il semble raisonnable d'admettre que la densité a bien un effet mais que son rôle doit être examiné en fonction du passé sylvicole du peuplement et donc de la morphologie des arbres. En particulier, on peut penser que les effets varient selon le stade de développement considéré, et qu'en jouant sur la densité, une sylviculture joue également sur d'autres paramètres, comme la dynamique de croissance en diamètres ou la variabilité des hauteurs qui peut être défavorable à la stabilité des peuplements (Cucchi et Bert, 2003).

Il ne semble pas que des analyses historiques de l'évolution du paramètre densité aient été conduites dans le massif landais, mais on peut penser qu'au moins pour la période récente, il aurait plutôt baissé, du fait de niveaux d'éclaircies relativement élevés.

Au total, le poids du facteur « densité » des peuplements reste difficile à apprécier, mais n'est probablement pas de premier ordre, et en tout état de cause, il paraît moins net que celui d'un paramètre proche dans sa nature, à savoir la proximité dans le temps d'une éclaircie qui fragilise provisoirement les peuplements forestiers (voir 2.3).

2.2.4 Régions de lisière

Dans un massif forestier aussi fragmenté que celui des Landes (multitude de parcelles forestières de tailles variables et de parcelles non forestières), les régions de lisière occupent une surface importante et doivent être prises en compte dans l'évaluation de la stabilité au vent. On entend ici par « région de lisière » la région de transition dans laquelle le vent entrant dans la parcelle voit ses propriétés se modifier progressivement ; on passe en effet d'un écoulement « externe » (représentatif des zones amont de la parcelle considérée : sol nu, coupe rase, autre parcelle boisée, zones bâties, etc.) à un écoulement « interne » (caractéristique de la parcelle forestière).

L'extension horizontale de la région de lisière varie selon la densité des arbres et l'étagement vertical du feuillage, dans une gamme de l'ordre de 8 à 15 fois la hauteur moyenne des arbres (Dupont et Brunet, 2008b). Cette région se caractérise par une décélération de l'écoulement dans la canopée et une accélération au-dessus, dont la combinaison génère vers le sommet du houppier une couche de cisaillement plus ou moins prononcée. L'écoulement dans la partie supérieure de la canopée y est complexe : l'énergie turbulente décroît juste après la lisière avant de croître plus loin ; dans la zone où elle est minimale (typiquement, à une distance de la lisière de 2.5 à 6 fois la hauteur des arbres), les « bouffées » turbulentes (rafales de vent) s'intensifient et deviennent plus intermittentes. Ces caractéristiques sont d'autant plus marquées que la densité de végétation est forte : l'écoulement est plus fortement distordu, la zone d'intensification des rafales est plus intense et plus proche de la lisière, l'écoulement atteint son état d'équilibre plus près de cette dernière. Dans une structure telle que celle d'une forêt de pin maritime (houppier haut placé et sous-bois peu dense), la vitesse dans les basses couches peut rester relativement élevée, augmentant ainsi la distance d'ajustement de l'écoulement avec le couvert et étirant la zone d'intensification des rafales (Dupont et Brunet, 2008b, 2009).

L'impact de la structure de la région de lisière sur l'écoulement a été étudié par Dupont et Brunet (2008c), en comparant plusieurs traitements caractérisés par des lisières plus ou moins étagées, plus ou moins denses ou plus ou moins hautes par rapport à un cas homogène de référence. Ils montrent que :

- pour des lisières nouvellement créées, suite à une coupe rase réalisée à proximité, certains traitements peuvent réduire la vulnérabilité de l'arbre ; il s'agit notamment des lisières constituées d'arbres hauts plantés avec une forte densité, traitements qui génèrent toutefois une plus forte turbulence plus loin en aval ;
- pour des lisières établies pendant un temps suffisant pour que les arbres, et notamment leur enracinement, soient adaptés aux conditions d'écoulement, un traitement de lisière n'apporte pas de bénéfice clair, et dans certains cas, les forces intermittentes exercées sur les arbres peuvent même être accrues dans la région de lisière (cas des traitements denses).

Cette adaptation de l'enracinement aux conditions de vent est réelle. Lors d'essais de flexion sur des pins maritimes de lisière en bordure ouest, Cucchi *et al.* (2004) ont en effet montré une résistance plus forte de ces arbres à l'arrachage, attribuée à une adaptation au vent de ces arbres exposés, visible sur leur système racinaire (Stokes *et al.*, 1998). On veillera donc à ne pas endommager les systèmes racinaires de ces arbres de bordure lors, par exemple, de l'entretien des pare-feux ou des fossés.

2.3. Caractéristiques conjoncturelles de peuplement

Les recherches menées sur les grands chablis depuis une trentaine d'années ont mis l'accent sur le caractère déstabilisateur transitoire (1 ou 2 ans) des éclaircies sur les peuplements forestiers (dans la mesure où ce facteur a pu être pris en compte ; voir par exemple Lohmander et Helles, 1987). Cette observation a également été faite dans les Landes après le passage de la tempête Martin. Dans l'étude basée sur les placettes IFN (2806 placettes de pin maritime, dont plus de 90 % en région Aquitaine), le prélèvement en volume au cours des cinq dernières années a montré des effets hautement significatifs (figure 2). Le modèle construit pour le pin maritime dans le massif landais, montre la forte influence des éclaircies relativement aux variations de hauteur du peuplement (figure 2). En raisonnant en volume prélevé, le risque croît fortement au-dessus d'un volume de prélèvement de 20 m³.

L'augmentation de vulnérabilité des peuplements est d'autant plus importante qu'on se situe dans un contexte où les éclaircies sont fréquentes : en moyenne, 45% des peuplements de pin maritime sont éclaircis tous les cinq ans dans les Landes, mais des récoltes plus fréquentes sont parfois menées. En fonction de la fréquence et plus encore de l'intensité des coupes, la proportion de peuplements plus ou moins fragilisés peut varier sensiblement en fonction du temps.

A l'évidence, compte tenu des densités installées et de la qualité du bois attendue, les éclaircies sont indispensables. Pour mieux raisonner le risque spécifique lié au vent, le gestionnaire forestier devra considérer les éléments suivants :

- chaque éclaircie est une prise de risque car il y a toujours un effet déstabilisant pendant un ou deux ans (changement de régime de vent, absence de soutien mutuel entre les arbres) ;
- 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).

2.4. Caractéristiques « permanentes » du sol et de sa gestion, et leurs influences sur le système racinaire

Le sol influence le développement du système racinaire de multiples façons, notamment par l'intermédiaire des obstacles physiques et en modifiant l'alimentation en eau et en nutriments.

Le développement du système racinaire du pin maritime sur podzol a été étudié de façon détaillée (voir par exemple Danjon *et al.*, 2005 ; Danjon et Fourcaud, 2009a). Il émet d'abord un pivot et des traçantes à environ 5 cm de la surface du sol. Une bonne stabilité de l'arbre jeune (<10 ans environ) est assurée par un fort pivot vertical et profond et par une couronne de racines de surface rectilignes et radiales, avec une distribution circulaire homogène. Pour les arbres de plus grande dimension, et ce d'autant plus précocement que la profondeur de sol disponible est faible, l'arbre émet sur les traçantes des pivots secondaires qui se renforcent pour former une cage rigide emprisonnant le sol. Cette cage détermine les contours de la plaque sol-racine en cas de chablis. Elle est une composante majeure de la stabilité ; les arbres munis d'une cage incomplète ou de faible taille sont plus vulnérables. Le pin maritime émet donc très peu de racines obliques ; les racines ne fourchent pas

spontanément et il n'y a pas de racines se reformant sur des racines plus âgées. De par ces propriétés, le système racinaire du pin maritime est très sensible aux perturbations. Ajoutons que cette espèce adapte fortement et sélectivement son architecture racinaire au vent dominant et à la profondeur de sol (Danjon *et al.*, 2005). En régime atlantique, les tempêtes soufflent en général de la même direction que les vents dominants.

Parmi les facteurs à prendre en compte, il faut citer les opérations de travail du sol qui créent une microtopographie comme le labour. Par exemple, le labour en bande devenu pratique courante au cours des années récentes pourrait, par une accentuation de la microtopographie, diminuer la qualité de l'installation des semis ou des plants. De plus, si cette technique est associée à un désherbage mécanique dans la bande non labourée quelques années après l'installation des pins, l'instabilité des arbres serait accentuée par un endommagement de leurs racines superficielles.

La profondeur du sol est un autre facteur qui peut influencer la stabilité des arbres en favorisant la qualité de l'enracinement. Alors que ce paramètre est généralement cité parmi les plus importants pour la plupart des couples essences x type de sol, la question semble plus complexe dans le contexte landais : la présence d'un alios, horizon induré, n'est pas forcément défavorable à la stabilité des arbres par diminution de la profondeur d'enracinement ; selon sa profondeur et sa perméabilité, l'alios peut en effet offrir une forme de support aux arbres. On ne peut pour autant parler d'absence d'influence de la profondeur d'enracinement sur la sensibilité des peuplements de pin maritime au vent. De fait, il y a très peu d'études sur le sujet, et les résultats de celles qui sont disponibles (notamment Renaud, 2002, sur la base des résultats du réseau de surveillance 16 km x 16 km) ont peut-être été sur-interprétés. Souvent, la profondeur d'enracinement ne peut être définie à l'échelle de la parcelle, car dans les Landes mésophiles, celle-ci peut varier de 40 cm à 1,2 m, avec un alios distribué en taches de léopard (Danjon *et al.*, 2005). L'influence de la profondeur semble avérée au moins pour les grandes profondeurs, mais la présence de nappe de surface ou de nappe perchée interfère souvent.

A la difficulté d'appréhender la profondeur effective d'enracinement fait écho l'absence supposée d'effet du sous-solage (mentionnée par exemple par Lafitte et Lerat, 2009). En réalité, on ne dispose pas de résultats expérimentaux très solides en la matière. Cette technique n'a un intérêt que si l'alios est à moins de 50 cm de profondeur sur une fraction importante de la parcelle.

La richesse du sol évolue en fonction des apports (fertilisation) et des exports (bois, écorce, éventuellement système racinaire). Sur ce point, il n'a pas été montré d'influence de la fertilisation phosphatée, habituellement préconisée en landes humides et mésophiles, sur la stabilité des peuplements (Najar *et al.*, 2002).

La variation de hauteur de la nappe influence fortement le système racinaire ; elle est plus ou moins modifiée, dans la lande humide et mésophile (Danjon *et al.*, 2005), par la morphologie et la qualité de l'entretien des fossés.

2.5. Caractéristiques conjoncturelles du sol

On sait que la résistance d'un système racinaire dépend de sa morphologie et de sa topologie mais également de l'état du sol qui l'entoure. Outre la présence d'obstacles, le battement des racines et le frottement racines/sol sont influencés par la résistance du sol au cisaillement et par son taux d'humidité au moment du coup de vent (Wu *et al.*, 1988).

L'importance de ce mécanisme dans le cas des grands chablis est difficile à apprécier. De fait, un fort niveau d'engorgement des sols est souvent cité comme un facteur qui diminue la capacité de résistance des peuplements forestiers au vent, et le passage des tempêtes Lothar et Martin en décembre 1999 est effectivement intervenu à l'issue de très fortes précipitations conduisant à des sols nettement plus saturés en eau qu'en moyenne à cette époque (Bessemoulin, 2009). Les sols étaient toutefois relativement moins détrempés lors du passage de Klaus, ce qui n'a pas empêché des dégâts massifs.

Une étude historique récente sur les dégâts de vent dans un canton suisse suggère fortement que le niveau des dégâts est influencé par l'état d'humidité des sols forestiers (Usbeck *et al.*, 2010), mais dans le contexte des Landes, où les sols sableux dominant, les effets liés à un engorgement temporaire ne sont probablement pas très importants ; un effet complexe en lien avec le facteur « assainissement » (cf. 3.2.6) n'est pas à exclure.

2.6. Caractéristiques paysagères

L'écoulement turbulent qui aborde une parcelle forestière est modulé par l'impact qu'a eu sur lui le paysage amont. Ainsi, dans le cas d'une transition forêt – coupe rase – forêt, l'écoulement sortant de la parcelle forestière amont a des caractéristiques propres, qui vont être modifiées par le passage sur la coupe rase avant d'arriver sur la parcelle suivante. Il va accélérer sur cette coupe rase et l'énergie turbulente générée par la parcelle précédente va être redistribuée dans l'atmosphère ; selon les hauteurs relatives des deux canopées et la distance à laquelle se trouve la parcelle suivante, la vitesse de l'écoulement entrant et son niveau de turbulence pourront être plus ou moins forts.

Ces remarques ne sont pas anodines dans la configuration actuelle du massif landais, où l'on estime que 90 % de la forêt est constituée de petites propriétés privées de tailles et de hauteurs variables, insérées dans une mosaïque de parcelles forestières ou non, elles-mêmes de caractéristiques très variables. Cette forte fragmentation du paysage conduit à aborder la problématique de la stabilité au vent non plus seulement à l'échelle de la parcelle, mais aussi à l'échelle du paysage. Ce nouveau regard apparaît d'autant plus important dans le contexte actuel d'implantation de grandes parcelles agricoles (maïs, cultures légumières) et de projets de fermes photovoltaïques, voire de fermes éoliennes. Malheureusement, la recherche en ce domaine est encore balbutiante, faute jusqu'à une période récente de dispositifs d'observation et de moyens de calcul adéquats.

La réalisation de campagnes de photos aériennes après une tempête, suivie d'un traitement sous Système d'Information Géographique, est cependant de nature à apporter une grande richesse d'informations. Par exemple, une analyse statistique en cours des dégâts occasionnés dans la forêt de Nezer (sud du bassin d'Arcachon) par la tempête de 1999 met en évidence les quelques points suivants (Brunet *et al.*, 2009) :

- lorsqu'une parcelle est « à l'abri » (elle est plus basse) de la parcelle amont elle présente en général peu de dégâts ;
- les dégâts les plus importants se produisent souvent lorsque la parcelle considérée est précédée (dans le sens du vent) d'une parcelle plus basse ;
- si la hauteur du peuplement elle-même apparaît être le principal facteur de risque de forts dommages, cet effet est modulé par l'écart de hauteur entre parcelles amont et aval.

Ces résultats demandent confirmation car les observations qui ont pu être faites jusqu'à présent sur le terrain montrent la grande complexité des phénomènes dans des paysages hétérogènes. Dans ce domaine, les progrès actuels de la simulation numérique s'avèrent porteurs d'espoir. Brunet *et al.* (2009) font par exemple état d'un travail préliminaire réalisé visant à analyser l'influence sur l'écoulement de petites parcelles forestières de longueur fixe, séparées d'une distance variable. Les résultats montrent que l'énergie cinétique turbulente de l'écoulement, ainsi que la contrainte mécanique exercée sur les arbres, varient d'une manière notable en fonction de l'espacement des parcelles, 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 les plus grands espacements, l'influence d'une parcelle sur la suivante est faible, et pour les plus petits la présence de clairière affecte peu l'écoulement. Ainsi, certains niveaux de fragmentation d'un paysage forestier pourraient conduire à une augmentation de la turbulence, et donc à un accroissement des risques en cas de vent violent.

Ce domaine de recherche doit faire l'objet d'études approfondies. D'un point de vue pratique, de telles considérations pourraient conduire dans l'avenir à instaurer des actions de régulation dans les coupes rases et les éclaircies, visant à éviter des configurations spatiales *a priori* plus sensibles aux dégâts que d'autres.

3. Evaluation des options identifiées par rapport au critère « vulnérabilité au vent »

Les différentes options proposées par les groupes de travail ont été analysées sous l'angle de la stabilité au vent.

3.1. Stratégie de sortie de crise et anticipation des risques

Dans le contexte landais, la gestion de crise n'a pas *a priori* d'interactions majeures avec la vulnérabilité au vent des peuplements issus de la reconstitution.

En particulier, les risques de déstructuration des sols forestiers liés au tassement par des engins intervenant en hiver sur des sols éventuellement engorgés sont moins élevés dans le cas des sols sableux que dans celui des sols à texture plus fine.

La détection d'une évolution défavorable de la vulnérabilité du massif forestier au vent (qui fait partie de l'anticipation des risques) est très importante.

Notre analyse rejoint sur ce point le souhait des groupes *Sortie de crise* et *Territoires, eau et biodiversité* qui ont appelé de leurs vœux un système coordonné de monitoring qui devrait, bien entendu, prendre en compte les principaux facteurs de vulnérabilité au vent. En rendant les données cohérentes et facilement accessibles, l'évaluation de l'évolution spatiale et temporelle de

paramètres clés en serait facilitée. La gestion pourrait ainsi plus facilement s'adapter aux évolutions constatées, si le besoin s'en faisait sentir.

3.2 . Itinéraires sylvicoles

3.2.1 Nettoyage (et récupération de biomasse)

Les techniques de remise en état des parcelles après tempête ont évolué. Après la gestion de crise liée à la récolte des bois issus de la tempête, il pourrait y avoir une récupération des rémanents et des souches pour en faire des plaquettes.

Un nettoyage plus important sera favorable à la prochaine génération d'arbres dans la mesure où les débris de bois de rémanents aériens ou de racines enfouis dans le sol constituent un obstacle pour le positionnement de la motte en cas de plantation et pour le développement des racines. En effet, si les racines peuvent traverser les morceaux de bois à partir d'un certain degré de décomposition, de gros morceaux qui se situeraient sous le semis ou le plant ou en surface, à moins de 50 cm du collet, peuvent constituer un problème car ils empêchent un développement harmonieux du pivot ou de la couronne de traçantes (Quine *et al.*, 1991). La gêne occasionnée par les débris varie inversement à la distance au plant, la quantité de volume de racines diminuant très rapidement quand on s'éloigne de la souche.

Nous formulons ici quelques remarques sur les techniques de nettoyage présentées dans le rapport du groupe 2 (tableau p. 7 et pages suivantes) du point de vue de l'effet possible sur la stabilité du peuplement qui sera mis en place.

De façon générale, l'enfouissement des rémanents pose un problème si ces derniers sont de taille importante et faiblement décomposés. Plus précisément :

- le broyage de surface des souches laisse entière la partie souterraine des souches qui se décomposeront progressivement ; il faut donc prêter attention au positionnement des rémanents pour la mise en place des lignes du nouveau peuplement. Dans tous les cas (avec ou sans broyage des souches), le positionnement des nouvelles lignes (semis, plantation) entre les lignes du peuplement précédent permet de minimiser la présence des débris de bois près des plants ;
- le déchiquetage des rémanents disperse les débris sur la parcelle et risque d'empêcher le développement des racines si de gros morceaux de bois sont enfouis au moment de la préparation du sol.

En revanche, les techniques visant à évacuer les souches et rémanents sont favorables à la plantation et donc à la stabilité ultérieure des plants :

- la mise en andains des souches broyées serait favorable au développement des racines mais elle est déconseillée dans le cadre du maintien de la fertilité des sols en raison du décapage en surface du sol ;
- l'extraction et l'utilisation des souches et des rémanents pour le bois énergie sont favorables au déploiement satisfaisant du système racinaire.

3.2.2 Choix de l'essence

Pin maritime

Le rapport du groupe de travail *Itinéraires sylvicoles* propose l'utilisation de nouvelles variétés de pin maritime. Nous examinons ici ces propositions sous l'angle de leur stabilité potentielle.

Les provenances de pin maritime de régions venteuses présentent une adaptation de leur système racinaire assurant une meilleure stabilité (fort pivot vertical et profond, bonne couronne de traçantes) alors que les provenances de régions sèches présentent de longues racines traçantes, fines et ramifiées (Danjon *et al.*, 2009c). L'introduction de variabilité génétique allogène, notamment des provenances méditerranéennes, doit donc être faite avec précaution. A noter qu'une technique de phénotypage à haut débit de l'architecture racinaire permettra une sélection/évaluation pour ce caractère dans le cadre du GIS « Pin maritime du futur » (Danjon *et al.*, 2009c). Ceci permettra de juger de la stabilité d'éventuels hybrides « provenances atlantiques x provenances méditerranéennes », qui pourraient mieux résister au changement climatique.

De façon générale, l'amélioration génétique a souvent pour effet d'affaiblir l'ancrage des arbres (Nielsen, 1994). S'agissant des variétés améliorées de provenance landaise, elles sont issues d'une sélection en forêt d'arbres hauts et droits (« arbre + ») suivie d'une ou plusieurs sélections en test de descendances à 10 ans avec pour critère la hauteur mais également la rectitude du tronc ; comme la rectitude est associée en partie à la qualité de l'ancrage (Danjon *et al.*, 2005), le système racinaire des arbres améliorés devrait être bien adapté à la résistance au vent. De fait, les arbres de la première génération d'amélioration ont aussi bien résisté au vent que les génotypes sauvages, à 20 ans, dans les placettes normalement denses (Cucchi et Bert, 2003). L'amélioration génétique, en réduisant la durée de révolution, permet donc globalement plutôt une réduction du risque vent.

En général, l'amélioration génétique porte surtout sur l'indice de récolte (*harvest index* en anglais), en l'occurrence la proportion de tronc dans la biomasse totale. Chez le pin maritime, d'après les corrélations génétiques entre vigueur, rectitude, polycyclisme et branchaison, certains arbres investissent plus dans les racines dans leur jeune âge, et d'autres plus dans une croissance aérienne (tronc, branches, cône), avec une production de graines plus rapide (Illy, 1969 ; Danjon, 1994 et 1995).

Si une variété vigueur de pin maritime est créée, il est ainsi très probable que son système racinaire sera moins efficace pour l'ancrage, ce qui impliquera de soigner la régénération qui sera exclusivement faite par plantation. Il faudra donc que la coupe rase soit bien effectuée à 10-15 ans (avec un éventuel problème de traçabilité en cas de changement de propriétaire, par exemple).

La question de la dimension génétique vaut aussi pour les autres essences qui seraient utilisées en reboisement, même si on ne connaît pas leur variabilité génétique concernant l'architecture racinaire.

Pinus taeda

Sur la base de quelques observations de terrain, Le pin à l'encens est réputé moins sensible au vent que le pin maritime. Peu de connaissances sont disponibles d'une part sur cette aptitude dans le massif aquitain et d'autre part sur les facteurs cultureux qui pourraient affecter son ancrage. Il faut également porter une attention particulière aux provenances utilisées pour les reboisements (voir plus haut). Le pin à l'encens n'est, de plus, adapté qu'aux stations landaises les moins difficiles. Une

implantation sur une station non adaptée pourrait donner un peuplement peu stable.

Autres essences

Le robinier, l'eucalyptus, le pin pignon, le pin sylvestre, le pin laricio, le cèdre de l'Atlas, le séquoia sempervirens, le cryptomeria japonica, le sapin de Céphalonie, le cyprès chauve ont été cités par le groupe *Itinéraires* comme des alternatives possibles au pin maritime. Ces essences n'ont guère fait l'objet d'études nationales. En particulier, les connaissances sur les propriétés de leurs systèmes racinaires vis-à-vis de la stabilité et de leur adaptation aux sols landais ou du développement en fonction des techniques d'installation sont faibles.

3.2.3 Essences d'accompagnement

Il y a peu de résultats probants sur l'effet des essences d'accompagnement sur la stabilité des peuplements au vent (Colin *et al.*, 2008). Il apparaît que le mélange n'a pas, en soi, de vertu particulière, mais l'ajout d'une espèce moins sensible stabilise l'ensemble et inversement.

Au niveau souterrain, nous n'avons pas de raison de penser que les essences d'accompagnement gênent le développement du système racinaire du pin maritime, car nous n'avons pas observé de timidité des racines d'une espèce à l'autre. Nous n'avons cependant pas non plus de raisons de penser qu'il y ait un avantage à avoir, du point de vue de la stabilité de l'ensemble, d'effets particuliers du mélange des essences.

3.2.4 Stratégie sylvicole pour le pin maritime

Six grands itinéraires ont été décrits par le groupe *Itinéraires sylvicoles*. Il est particulièrement délicat de comparer ces scénarios en terme de stabilité globale au vent car la sensibilité au vent des peuplements évolue en fonction de divers facteurs : leur dynamique de croissance, leur durée de révolution qui dépend elle-même de la fertilité de la station, du choix du mode d'installation et de la variété.

En revanche, les recommandations générales faites sur la mise en œuvre de ces scénarios contribuent bien à une limitation des risques vis-à-vis du vent. Il s'agit :

- d'utiliser du matériel végétal de qualité (variétés améliorées en plantation et semis artificiel),
- de soigner l'installation du peuplement,
- d'éviter d'endommager les racines,
- de ne pas retarder l'âge d'exploitation,
- d'améliorer le parcellaire de manière à « constituer des parcelles conséquentes et n'offrant pas de pointes plus sensibles au vent ».

Les itinéraires « bois d'œuvre » sont jugés par le groupe *Itinéraires sylvicoles* « par nature plus risqués que les itinéraires courts (car) ils impliquent des éclaircies régulières (parfois à des âges avancés) et des rotations longues ». Cette assertion raisonnable mérite probablement d'être nuancée, en considérant notamment les éléments de prise de risque cités plus haut, et en particulier le couple « hauteur de peuplement » *versus* « fréquence et volume des coupes » (régimes standards, pratiques de terrain) (cf. 2.3).

Concernant l'itinéraire semi-dédié, nous pouvons émettre des réserves quant à sa sensibilité sur la base des connaissances rassemblées. La récolte de biomasse dans l'interligne fragilisera les arbres

qu'on laissera en place : d'une part leur morphologie aura été affectée par la concurrence avec les arbres prélevés pour la biomasse et peut-être en raison de la densité sur la ligne ; d'autre part en raison de la récolte partielle pouvant endommager les troncs des arbres restants et éventuellement aussi leurs systèmes racinaires.

D'autre part, même si le groupe n'en fait pas spécifiquement état, on doit signaler que certains choix d'itinéraires impliquent le recours aux cloisonnements. Celui-ci devrait préférentiellement être réalisé sur les anciennes lignes du peuplement précédent, car c'est là que les systèmes racinaires auront été les moins gênés par les anciennes souches (développement à plus de 70 cm d'une souche ; Quine *et al.*, 1991).

Enfin il faut rappeler qu'une gestion des peuplements en bande est peu favorable à la rectitude des troncs qui ont tendance à s'orienter vers l'extérieur des bandes.

3.2.5 Mode de régénération du pin maritime

Comme un système racinaire non perturbé est garant d'une bonne stabilité, on peut penser, bien qu'on ne dispose pas de données sur le développement du système racinaire du pin maritime en podzol en régénération naturelle, que la régénération naturelle est favorable pour l'ancrage.

A priori, les semis ne présentent pas, comme c'est parfois le cas des jeunes arbres plantés, de déformations racinaires. La stabilité des semis est donc a priori meilleure que celle des plantations, en particulier lorsque les jeunes arbres atteignent un certain âge (après quinze ans). Rajoutons qu'un dépressement prenant en compte le critère de rectitude du tronc permet de sélectionner les arbres les plus stables, ce qui ne peut être fait pour les plantations.

Qu'il s'agisse de semis issus de régénération naturelle ou non, il faut que le travail du sol permette un bon développement du système racinaire.

Dans le cas des plantations, le type de conteneurs influence la qualité de l'enracinement, mais d'autres facteurs interagissent, notamment les conditions de culture en pépinière, le mode et la période de plantation.

Comme on le sait, les enroulements de racines dans les conteneurs sont rédhibitoires pour la stabilité. Comme les conteneurs à parois rigides ne sont plus utilisés dans le massif, cette source de problème a en principe disparu. Il faut cependant garder en mémoire que le risque de déformation des racines au moment de la plantation persiste (Danjon *et al.*, 2009c et d). Une telle déformation entraîne une mauvaise répartition spatiale des racines traçantes et peut induire une croissance horizontale du pivot. Pour éviter ces déformations, les racines ne doivent pas dépasser de la motte à la plantation ; il faut donc soit habiller court le plant, soit utiliser une technique qui sectionne de fait les racines au ras de la motte (par exemple des cubes de tourbe compressée).

Faute de pouvoir attendre la fin d'une rotation pour évaluer l'effet d'une technique particulière de régénération aux différents stades de la vie du peuplement, on peut cependant rapidement évaluer l'effet potentiel d'une technique de plantation en examinant :

- la répartition des racines immédiatement après la mise en place des plants,
- puis l'architecture racinaire deux ou trois ans après sa mise en place.

Nous recommandons donc fortement qu'une évaluation des innovations techniques par rapport à la

stabilité et à l'architecture du système racinaire soit réalisée avant leur utilisation en routine. Le critère économique ne peut être le seul critère de choix.

On gardera à l'esprit que c'est l'ensemble des conditions de réalisation des opérations techniques qui va produire un système racinaire donné à dix ans. Il est possible qu'un certain type de conteneur, dans un essai bien contrôlé, dans un sol bien travaillé, donne d'excellents résultats. Et que ce même type de conteneur, avec une plantation d'été de plants un peu trop grands, dans un sol mal travaillé, donne des résultats beaucoup moins satisfaisants. La robustesse d'une technique est donc aussi à prendre en compte.

3.2.6 Assainissement

L'effet d'un engorgement en sol sableux sur la vulnérabilité des arbres est peu connu. La question a été identifiée par la recherche comme un élément à étudier. C'est pourquoi un projet de recherche vient d'être proposé qui vise à déterminer si une nappe plus haute au moment de la tempête diminue la stabilité du pin en sol landais. Si cela était vérifié, on pourrait suggérer un creusement plus important et un meilleur entretien des fossés. Des fossés trop profonds pourraient cependant produire des dépérissements ou un ralentissement de la croissance des peuplements.

3.2.7 Débroussaillage mécanique

Le sol est en quelque sorte « armé » par les racines fines dont la biomasse diminue rapidement avec la profondeur. Les racines fines d'adventices représentent 90 % de la biomasse de racines fines (Achat *et al.*, 2008). Il est donc probable qu'un débroussaillage diminue la cohésion du sol.

Du fait de la structure du système racinaire du pin maritime (pivot + traçantes, puis pivot secondaire inséré sur traçantes), il est probablement pénalisant pour la stabilité d'utiliser des outils de débroussaillage qui pénètrent de plus de 2-3 cm dans le sol. Rappelons en effet que les racines traçantes du pin maritime sont situées à environ 5 cm de profondeur. La pénétration du rouleau landais dépend de la biomasse aérienne du sous-bois à détruire et de l'épaisseur de la litière. Il faudrait donc adapter le poids du rouleau landais à ces paramètres pour éviter de couper les racines de pin.

Le groupe *Itinéraires sylvicoles* propose « un travail de l'interligne qui permettrait d'ameublir le sol en profondeur pour éviter un développement superficiel des racines et réduire ainsi leur sensibilité aux passages des engins ». Cette mention est en contradiction avec l'ensemble des recommandations du même groupe visant à éviter toute technique endommageant les systèmes racinaires.

3.2.8 Fertilisation

Dans son rapport, le groupe *Itinéraires sylvicoles* a jugé inutile une fertilisation à un niveau supérieur à 80 unités de phosphore à l'hectare (§3.2.1.3).

D'après Trichet *et al.* (2008), une irrigation d'été combinée avec différents niveaux de fertilisation, y compris une fertilisation très intensive, ne modifient pas la part de la biomasse de racines dans la biomasse totale. Mais la fertilisation diminue la biomasse de racines fines et le rapport entre la biomasse et la surface de racine et d'aiguille (Bakker *et al.*, 2009). L'irrigation n'augmente pas les dégâts de tempête, au contraire d'une fertilisation intensive, avec ¾ d'arbres touchés au lieu de ¼ pour les témoins (Trichet *et al.*, 2008). Ces résultats obtenus dans un peuplement de 13 ans avec une croissance nettement plus forte pour les arbres fertilisés sont difficiles à transposer à la pratique.

L'architecture racinaire du pin maritime est faiblement influencée par une fertilisation phosphatée intensive en lande mésophile, comme cela a été constaté sur un peuplement âgé de 12 ans (Danjon *et al.*, 2008). Cucchi et Bert (2003) montrent également qu'un regonflage au phosphore (120 kg de P₂O₅ à l'hectare) à l'âge de 25 ans a réduit le taux de chablis observé à 51 ans.

Nous pouvons conclure qu'une fertilisation phosphatée modérée, en raccourcissant la durée de révolution, permet de réduire les risques liés au vent. Il est certainement possible d'améliorer nos connaissances pour optimiser la date d'application et sa localisation.

3.2.9 Travail du sol

Rappelons tout d'abord que la meilleure architecture racinaire pour assurer la stabilité sera obtenue pour un sol plat de façon à ce que la cage tenant la plaque racinaire puisse se développer de façon homogène et tenir le maximum de terre (Danjon *et al.*, 2005).

Il est donc fort probable que le labour en bande ayant pour effet de créer un fort micro-relief, notamment une dérayure de 40 cm, soit défavorable à la stabilité, surtout si la profondeur du sol n'excède pas 60 ou 80 cm. En effet, la couronne de racines traçantes suit la surface du sol et passe donc sous la dérayure. Même si celle-ci est comblée, le système racinaire gardera la forme. Les arbres adultes auront donc une cage de racines incomplète, peu favorable à la stabilité. En outre, le comblement de la dérayure quelques années après la plantation aura pour effet de couper les racines de pin, avec une perte de biomasse et un effet perturbateur sur l'architecture racinaire. En cas de plantation, la préparation du lit de plantation est essentielle : s'il subsiste sur la ligne de plantation des touffes de molinie, des souches de bruyères arborescentes ou des gros morceaux de bois, le planteur ne pourra bien positionner sa canne et le plant ne pourra être planté correctement (motte écrasée ou déformée).

Nous n'avons pas de références sur l'effet de l'ameublissement du sol sur le développement des racines. En revanche, le labour pratiqué à titre d'opération de désherbage a certainement une influence positive sur le développement des pins les premières années et donc sur le raccourcissement de la rotation.

Toutes les opérations sylvicoles qui augmentent la contamination par les pourridiés des racines (armillaire et fomes) sont défavorables pour la stabilité.

Le rapport du groupe *Itinéraires sylvicoles* ne fait pas de bilan sur la technique du sous-solage. Si une évolution des pratiques vers une moindre utilisation de cette technique, justifiée notamment par son coût, était avérée, il serait bien difficile d'anticiper ses éventuelles répercussions sur la productivité des peuplements, et, en tout état de cause, on ne peut exclure une incidence négative sur la stabilité.

3.2.10 Espaces interstitiels et lisières

Le groupe *Itinéraires sylvicoles* a émis un certain nombre de considérations sur la présence de zones feuillues, d'îlots, de lisières, de choix d'essences pour ces dernières, d'espaces ouverts. Comme on l'a vu dans la partie 2, les récents résultats de simulation montrent que les zones de lisière ont un effet moindre que ce que l'on pouvait penser (Dupont et Brunet, 2008c). Ces simulations ayant été réalisées avec des épaisseurs de lisière de deux fois la hauteur du couvert (typiquement, de 20 à 40 m), une épaisseur de 8 m (chiffre cité dans le rapport du groupe) aura un effet de protection contre le vent a fortiori très faible. Après une coupe rase en amont d'une parcelle, une lisière haute et dense peut certes avoir un effet de protection sur le reste du peuplement, notamment s'il est jeune ; mais

la chose est difficile à mettre en pratique car elle suppose une anticipation des plans de gestion. La diversification des régions de lisière semble ainsi avoir un intérêt plus fort en matière de biodiversité et d'état phytosanitaire qu'en matière de stabilité au vent des peuplements.

3.3 Travaux du groupe « Filière : pérennité de la ressource forestière »

Le groupe *Filière* a esquissé diverses options de nature à influencer l'alimentation de la filière. Ces options concernent notamment : (i) la destination des bois endommagés, (ii) les bois ayant dépassé l'âge d'exploitation (exploitation des « vieux bois » présents en quantités relativement importantes), (iii) l'âge d'exploitabilité des peuplements, que l'on souhaiterait réduire, et (iv) les bois fragilisés par la tempête, que l'on peut laisser en forêt, ou récolter.

Ces options ne sont pas *a priori*, hormis peut-être celle relative à l'âge d'exploitation, déterminantes pour la stabilité au vent des peuplements restants. Nous nous contentons ici de formuler quelques remarques :

- l'abandon de quantité importante de bois en forêt est délicat à gérer dans le cadre d'une conduite sylvicole de plantation (mais il est bien entendu intéressant à d'autres points de vue, stockage de carbone ou de biodiversité. La remarque vaut également pour les plaques sol-racines qui ne seraient pas remise en place (les trous semblent persister quelques années) ;
- le déstockage de vieux bois est intéressant pour l'important volume de bois qu'il pourrait fournir. S'il est massif, ce déstockage contribuerait toutefois à la fragmentation du massif et donc à la vulnérabilité des peuplements restants. Il serait intéressant d'en savoir un peu plus sur ces peuplements vis-à-vis de leur résistance au vent (ont-ils été épargnés par les tempêtes ou ont-ils une résistance particulière ?) ;
- le raccourcissement de l'âge d'exploitabilité contribue également à la fragmentation du massif et donc à la vulnérabilité des peuplements restants ;
- la récolte des bois fragilisés par la tempête enlève des arbres qui ne protègent guère les peuplements alentour. Ces arbres, déstabilisés par la tempête, n'ont souvent pour seuls symptômes qu'une inclinaison du tronc, mais les racines ont probablement subi des ruptures. Les jeunes arbres qui ont été redressés artificiellement demeureront sans doute instables, et la courbure du tronc de ceux qui se sont redressés naturellement modifiera leur comportement mécanique au vent.

3.4. Territoires, eau, biodiversité

Une première série d'options évoquées par le groupe met en jeu une diversification des types de couverts forestiers (juxtaposition de peuplements de pin maritime de différentes origines et objectifs, plantations de différentes essences en peuplements purs, plantation d'essences forestières en mélange, régénération naturelle de boisements avec essences feuillues en strate arborée ou en sous-étage, préservation des îlots feuillus existants). Hormis une éventuelle meilleure résistance intrinsèque de ces essences ou origines, qu'il conviendrait dans ce cas de bien choisir, ces options sont globalement neutres vis-à-vis de la stabilité au vent. Dans le cas de mélanges d'espèces en peuplement (Colin *et al.*, 2008), on a pu observer que l'introduction d'espèces plus stables pouvait augmenter la stabilité globale du mélange, mais ces effets restent malgré tout limités.

Parmi les autres options préconisées par le groupe, celle d'une réduction de la fragmentation du paysage forestier revient à plusieurs reprises. Il s'agit de stopper son augmentation, de réparer les fragmentations anciennes, de limiter de manière générale le mitage de la forêt. Les raisons évoquées sont essentiellement liées aux effets néfastes de la fragmentation du paysage sur la biodiversité. Globalement, cette option va dans un sens plutôt favorable à la stabilité au vent, par la fermeture du massif, la réduction des longueurs de lisière exposées et des surfaces de zones de lisière, entraînant ainsi la diminution de sources possibles de turbulence.

De manière générale, on cherchera ainsi à gérer les schémas de plantation et les plans de coupe dans le sens d'une « protection » des peuplements entraînant une réflexion à l'échelle d'une propriété, voire d'une zone de massif. Un peuplement plutôt jeune, en croissance, présentera moins de risques de dégâts au vent s'il est situé en aval d'un peuplement haut et plutôt dense ; de même on devrait éviter de réaliser de grandes coupes rases en amont de peuplements ayant passé leurs premières années « à l'abri ». Une mise en pratique de ces principes passe nécessairement par une concertation des acteurs à l'échelle territoriale, et sans doute la mise en place d'une organisation spécifique.

4. Conclusions

Les tempêtes Martin (1999) et Klaus (2009) ont infligé à la forêt landaise de très lourds dégâts, qui mettent en grande difficulté la filière forêt-bois régionale. Si d'autres vents extrêmes venaient frapper à nouveau la forêt landaise, ce que l'on ne peut exclure même si une fréquence accrue liée aux changements climatiques n'est pas prouvée, on peut sans doute compter sur une meilleure gestion de crise pour en atténuer les effets. Peut-on également espérer à terme une réduction de la vulnérabilité de la forêt landaise au vent ? Nous avons examiné cette question sur la base des options envisagées pour l'avenir du massif.

Des éléments de vulnérabilité sur lesquels le sylviculteur peut jouer

En nous fondant sur les résultats des groupes de travail de l'expertise, nous partons de l'hypothèse que le pin maritime constituera l'élément central de la forêt landaise. Outre le choix de l'essence, pour lequel la latitude est donc faible, le sylviculteur peut jouer principalement sur :

- les opérations d'installation des peuplements, dont le travail du sol,
- le régime d'éclaircies,
- la durée des révolutions,
- la distribution spatiale des coupes finales.

D'autres opérations comme la gestion des lisières ou la qualité de l'assainissement peuvent jouer également un rôle, mais probablement de second ordre.

Des évolutions récentes des pratiques sylvicoles dont certaines sont de nature à amoindrir la résistance des peuplements au vent

Malgré l'intensité des dégâts causés par la tempête Martin en 1999, et le traumatisme qu'elle a occasionné chez les acteurs concernés, il n'y a pas eu d'inflexions fortes de la gestion forestière relativement au risque spécifique « tempête ». Il semble même que, sans que les gestionnaires n'en aient conscience, la vulnérabilité des peuplements ait été en moyenne plus élevée en 2009 qu'en 1999 ; la pratique (presque généralisée) du labour en bandes avec reprise en inter-bandes et d'éclaircies fortes et fréquentes (qui expliqueraient en partie l'absence de remontée de volume de bois sur pied entre 1999 et 2009) pourraient expliquer l'observation d'une fréquence accrue de dégâts dans les jeunes peuplements.

Des évolutions futures positives et potentiellement négatives dans la gestion forestière

Si l'on se projette dans l'avenir, en considérant les tendances lourdes probables, on peut noter des évolutions a priori favorables, notamment la réduction de la durée des révolutions et l'utilisation de l'amélioration génétique (si elle répond aux caractéristiques signalées dans ce rapport). On peut aussi signaler des réflexions sur des modes de conduites intensifs basés sur des peuplements de hauteur plus faible (TTCR) donc *a priori* plus stables.

L'émergence d'itinéraires sylvicoles nouveaux comme les plantations semi-dédiées est porteuse de nombreuses interrogations, particulièrement quant à leur stabilité.

D'autres évolutions, dont l'ampleur reste à évaluer, auraient des répercussions plutôt négatives. Il s'agit d'une part, dans le cadre d'une tension forte sur la ressource, d'une tendance à faire des éclaircies dites de rattrapage fortes et rapprochées (après le gel des éclaircies en bois vert) et donc à générer des peuplements fragiles; et d'autre part de l'augmentation inévitable de la fragmentation avec l'intensification des coupes (coupes rases prévues, coupes de régularisation, résorption des vieux peuplements). Une gestion attentive de l'organisation spatiale des coupes pourrait atténuer les effets de fragmentation.

Il y a donc, du point de vue de la stabilité du massif landais au vent, des incertitudes que les préconisations actuellement formulées, pour avisées qu'elles soient (le retour au labour en plein en fait partie) ne permettent pas de lever.

Le besoin confirmé d'un outil de suivi/pilotage et d'un nouveau contrat « recherche-développement-gestion »

Pour permettre une gestion avisée de la ressource forestière, la mise au point et la mise en œuvre d'un système de suivi du massif landais à la fois cohérent et le plus complet possible s'avèrent aujourd'hui plus indispensables encore que par le passé. Notre analyse rejoint ici celle des groupes de travail. L'importance des enjeux, particulièrement les enjeux économiques, et la vitesse d'évolution possible d'un système « sous tension » invitent à concevoir un dispositif efficace de mise en commun des informations et des conditions de partage de ces dernières.

Un tel système de suivi permettrait en outre, dans le cas d'un nouvel épisode générant des dégâts massifs, de recueillir un maximum de données pertinentes permettant notamment de mieux comprendre les interactions entre vent et paysages forestiers. Il faudrait ainsi pouvoir combiner, partout où ce serait possible, observations post-tempête (localisation et intensité des dégâts, à partir de photographies aériennes et de relevés sur le terrain) à des bases de données relatives aux

caractéristiques parcellaires (hauteur, densité, historique des opérations sylvicoles, etc.).

Enfin, nous souhaitons insister sur le besoin d'une action ciblée de recherche et une articulation formalisée entre recherche, développement et acteurs de terrain, comme complément indispensable du suivi susmentionné, et justifié par le même contexte.

La recherche sur les effets du vent a connu un essor considérable après les tempêtes de décembre 1999, mais n'a pas bénéficié de la continuité qu'aurait justifié un aléa épisodique et d'occurrence incertaine, mais aux effets dévastateurs. Après le passage de la tempête Klaus et des réflexions qu'elle a suscitées, le besoin d'un programme associant recherche, développement et gestion apparaît nettement. Ce rapport n'est pas l'endroit pour l'élaborer, mais nous pouvons en souligner quelques caractéristiques. Un tel programme devrait :

- couvrir la mise au point de nouveaux itinéraires techniques et permettre d'éviter que des inflexions notables de la gestion n'interviennent sans examen même rapide par la recherche ;
- s'intéresser de près aux paramètres sur lesquels le sylviculteur peut jouer, par exemple la mise en place des systèmes racinaires et de leurs propriétés dans différentes conditions, l'influence de différents régimes d'éclaircie sur la vulnérabilité des peuplements. Le recours à la modélisation (modèle Forest Gales notamment) sera important, car il sera toujours difficile d'appréhender ces aspects uniquement par des analyses descriptives de terrain. Ces travaux pourront fournir des résultats d'autant plus solides qu'ils seront articulés de façon étroite avec les analyses « mécanistes » d'écoulement des masses d'air ;
- étudier de près l'impact de la fragmentation du paysage forestier sur la stabilité des peuplements. Si ce domaine de recherche a encore été peu abordé, les éléments dont on dispose semblent bien montrer l'importance de la structure du paysage dans les problèmes de vent et de son interaction avec les peuplements. Ici encore, on aura tout intérêt à s'appuyer sur une combinaison judicieuse d'observations et de modélisation mécaniste ;
- accompagner la gestion en s'appuyant sur les données de suivi, afin de mieux comprendre les évolutions à court terme et les marges de manœuvre, et viser des objectifs plus « intégrés » et ambitieux pour le long terme, afin de comprendre de combien les inflexions de la sylviculture peuvent atténuer les dégâts, d'évaluer si ces évolutions de la gestion motivées par le risque vent sont économiquement défendables, etc.

Remerciements : à Philippe Riou-Nivert, IDF/CNPF, et Pauline Défossez, INRA, pour leurs contributions.

5. Bibliographie

Achat D. L., Bakker M. R., Trichet P., 2008. Rooting patterns and fine root biomass of *Pinus pinaster* assessed by trench wall and core methods *Journal of Forestry Research* 13:165–175

Bakker M.R., Jolicoeur E, Trichet P., Augusto L., Plassard C, Guinberteau J., Loustau D., 2009. Adaptation of fine roots to annual fertilization and irrigation in a 13-year-old *Pinus pinaster* stand. *Tree Physiology* 29, 229–238

- Bessemoulin P., 2009. Les tempêtes exceptionnelles de 1999 : caractérisation météorologique et lien éventuel avec le changement climatique. In : Birot Y., Landmann G., Bonhême I. (coord.), 2009 *La forêt face aux tempêtes*. Collection Synthèses, Editions Quae, Versailles, 37-46
- Birot Y., Landmann G., Bonhême I. (coord.), 2009. *La forêt face aux tempêtes*. Collection Synthèses, Editions Quae, Versailles, 433 p.
- Brunet Y., Dupont S., 2009. Ecoulement du vent et structure du paysage. Carrefours de l'Innovation Agronomique, « Sylviculture, Forêts et Tempêtes », Pessac, 30 juin 2009, *Revue Innovations Agronomiques* 6, 51-62.
http://www.inra.fr/ciag/revue_innovations_agronomiques/volume_6_juin2009
- Brunet Y., Dupont S., Sellier D., Fourcaud T., 2009. Les interactions vent-arbre, de l'échelle locale à celle du paysage : vers des approches déterministes. In : *La forêt face aux tempêtes*. Birot Y., Landmann G., Bonhême I. (Coord.), Collection Synthèses, Editions Quae, Versailles, 229-259
- Colin F., Brunet Y., Vinckler I., Dhôte J.-F., 2008. Résistance aux vents forts des peuplements forestiers et notamment des mélanges d'espèces. *Revue forestière française*, LX, 2, 191-205
- 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 : Birot Y., Landmann G., Bonhême I. (Coord.), *La forêt face aux tempêtes*. Collection Synthèses, Editions Quae, Versailles, 177-228
- Cucchi V., Bert D., 2003. Wind-firmness in *Pinus pinaster* Ait. stands in Southwest France: influence of stand density, fertilisation and breeding in two experimental stands damaged during the 1999 storm. *Annals of Forest Science* 60:209–226
- Cucchi V, Meredieu C, Stokes A, Berthier S, Bert D, Najar M, Denis A, Lastennet R. 2004. Root anchorage of inner and edge trees in stands of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) growing in different podzolic soil conditions. *Trees-Structure and function* 18:460-466.
- Danjon F., 1994. Heritabilities and genetic correlations for estimated growth curve parameters in maritime pine. *Theoretical and Applied Genetics* 89 (7/8): 911-921
- Danjon F., 1995. Observed selection effects on height growth, diameter and stem form in maritime pine. *Silvae Genetica* 44 (1): 10-19
- Danjon F., Drénou C., Dupuy L., Lebourgeois F. 2009a. Racines, sol et mécanique de l'ancrage de l'arbre. In : Birot Y., Landmann G., Bonhême I., coord. *La forêt face aux tempêtes*. Collection Synthèses, Editions Quae, Versailles, 229-259
- Danjon F., Eveno E., Bernier F., Chambon J.-P., Lozano P., Plomion C., Garnier-Géré P., 2009c Genetic variability. In: 3D coarse root architecture in *Pinus pinaster*. Proc. 2nd International Conference *Wind Effects on Trees*, Freiburg, Germany, 13-16 Oct. 2009. Mayer H & Schindler D Eds., Berichte des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg n. 19 p155-162 [oral presentation]
- Danjon F., Fourcaud T., Bert D. 2005. Root architecture and wind-firmness of mature *Pinus pinaster*. *New Phytologist* 168:387-400
- Danjon F., Fourcaud T. 2009b. L'arbre et son enracinement. Carrefours de l'Innovation Agronomiques « Sylviculture, Forêts et Tempêtes », 30 juin 2009, Pessac, France. INRA, Paris. *Revue Innovations Agronomiques* 6:17-37
http://www.inra.fr/ciag/revue_innovations_agronomiques/volume_6_juin2009
- Danjon F, Gonzalez G, Meredieu C, Leprovost G, Gion JM, Bert D, Bosc A, Lagardère O, Raffin A, Jourdan C 2009d. Phenotypic plasticity of *Pinus pinaster* for water stress: biomass allocation and root

- architecture. Proceedings 7th ISRR Symposium 'Root Research and Applications' (RootRAP), Vienna, 2009/09/2-4 p 64 Himmelbauer M. & Loiskandel W. eds .
- Dupont S., Brunet Y., 2008a. Influence of foliar density profile on canopy flow: a large-eddy simulation study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148: 976-990
- Dupont S., Brunet Y., 2008b. Edge flow and canopy structure: a large-eddy simulation study. *Boundary-Layer Meteorology*, 126: 51-71
- Dupont S., Brunet Y., 2008c. Impact of forest edge shape on tree stability: a large-eddy simulation study. *Forestry*. Special issue "Wind and trees", 81(3): 299-315
- Dupont S., Brunet Y., 2009. Coherent structures in canopy edge flow: a large-eddy simulation study. *Journal of Fluid Mechanics*, 630, 93-128
- Illy G. 1969, Recherches sur l'amélioration génétique du Pin maritime. I. 23(4):769-948
- Lafitte J.-J., Lerat F., 2009. *Reconstitution des peuplements forestiers détruits par la tempête du 24 janvier 2009 dans le massif forestier des Landes de Gascogne*. Rapport n°1928, Conseil général de l'agriculture, de l'alimentation et des espaces ruraux, Paris, 59 p. + annexes
- Lohmander P., Helles F., 1987. Windthrow Probability as a Function of Stand Characteristics and Shelter. *Scandinavian Journal of Forestry Research*, 2: 227-238
- Meredieu C., Stokes A., Cucchi V., 2009. L'apport de la modélisation à la prédiction de la stabilité des peuplements. Le cas du pin maritime dans les Landes de Gascogne. In : Birot Y., Landmann G., Bonhême I. (coord.), 2009 *La forêt française face aux tempêtes*. Collection Synthèses, Editions QUAE, Versailles, 267-272
- Najar M., Crémère L., Fraysse J.Y., de Boissesson J.M., Merzeau D., Carnus J.M., Bert D., Cucchi V., Trichet P., Pastuska P., Sardin T., Canteloup D., Dumas J.M., 2002. *Sylviculture et résistance au vent des peuplements de pin maritime*. Rapport final Projet ZE12. Gip Ecofor- Région Aquitaine. Afocel, Station territoriale Sud-Ouest, Les Vaseix. 80 p.
- Nielsen, C. C. N. 1992. Will traditional conifer tree breeding for enhanced stem production reduce wind stability - Genetic variation in allocation of biomass to root classes and stem *Silvae Genetica*, 41:307-318
- Piton B., 2002. *Facteurs de la sensibilité au vent des peuplements*. Mémoire de fin d'études de la FIF-ENGREF, Nancy, ENGREF, 131 p. + annexes.
- Quine, C.P., Burnand, A. C., Coutts, M. P., Reynard, B. R. 1991. Effects of mounds and stumps on the root architecture of Sitka spruce on a peaty gley restocking site. *Forestry* 64:385-401
- Ray D., Nicoll B.C., 1998. The effect of soil water-table depth on root-plate development and stability of Sitka spruce. *Forestry* 71:169-182
- Renaud J.P., 2002. Première évaluation de la sensibilité des peuplements forestiers aux tempêtes à partir des dommages subis par le réseau européen. In Ministère de l'agriculture de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales (DERF), *Les Cahiers du DSF (La Santé des Forêts [France] en 2000 et 2001)*, 1-2002. Paris, Ministère de l'agriculture de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales. (DERF), 81-84
- Riou-Nivert P., Hervé J.-C., Belouard T., Renaud J.-P., Paillassa E., Rosa J., Piton B., Mathevet A., 2005. *Évaluation des facteurs de résistance au vent à l'aide des données de l'IFN. Application aux diagnostics de stabilité régionaux – Partie I : Rapport général*. Rapport de convention de recherche. ECOFOR 2001.45, Paris, IDF, 58 p.

Rosa J., 2004. Évaluation des facteurs de résistance au vent à l'aide des données de l'IFN. Construction d'une méthode de diagnostic de stabilité. Document interne : étude complémentaire aux analyses de J.C. Hervé et B. Piton, Paris, IDF, 76 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-Structure and Function*, 12:334-339

Trichet P., Loustau D., Lambrot C., Linder S., 2008. Manipulating nutrient and water availability in a maritime pine plantation: effects on growth, production, and biomass allocation at canopy closure *Annals of Forest Science*. 65:814

Usbeck T., Wohlgemuth T., Dobbertin M., Pfister C., Bürgi A, Rebetez M., 2010. Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007, *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 47-55

Wu, T H. Omber, R.M., Erb, R.T., Beal, P. E., 1988. Study of Soil-Root Interaction. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114: 1351-1375