ForestGales : un outil d'aide à la gestion adapté au Pin maritime dans les Landes de Gascogne

Céline Meredieu, Alexia Stokes, Véronique Cucchi

▶ **To cite this version:**

Céline Meredieu, Alexia Stokes, Véronique Cucchi. ForestGales : un outil d'aide à la gestion adapté au Pin maritime dans les Landes de Gascogne. Innovations Agronomiques, 2009, 6, pp.63-72. 10.17180/f1xx-b832 . hal-02654369

HAL Id: hal-02654369
https://hal.inrae.fr/hal-02654369

Submitted on 29 May 2020

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

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

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

Innovations Agronomiques (2009) 6, 63-72

ForestGales : un outil d'aide à la gestion adapté au Pin maritime dans les Landes de Gascogne

C. Meredieu[1], A. Stokes[2], V. Cucchi[1]

[1] : INRA, UMR1202 BIOGECO, 69 route d'Arcachon, F-33612 Cestas cedex FRANCE

[2] : INRA, UMR931 AMAP, Bd de la Lironde TA A-51 / PS2, F-34398 Montpellier cedex 5

Correspondance : Celine.Meredieu@pierroton.inra.fr, alexia.stokes@cirad.fr

Résumé

Après un aperçu des divers types de modèles prédictifs de la stabilité des arbres au vent, et notamment des modèles mécanistes, nous présentons plus en détails l'un de ces modèles inclus dans un outil d'aide à la décision, ForestGALES, et son adaptation à l'essence Pin maritime dans le cadre du massif landais. Cette adaptation a été réalisée grâce à des essais de flexion en statique, permettant de caractériser le comportement d'ancrage de l'essence selon les conditions stationnelles et l'exposition au vent.

Une connexion a été réalisée entre ForestGALES et la plate-forme de simulation CAPSIS : elle permet d'utiliser le modèle de croissance du pin maritime existant pour fournir les caractéristiques du peuplement dont a besoin ForestGALES en entrée, et ainsi simuler la résistance au vent des peuplements selon une multitude de scénarios sylvicoles. Les possibilités d'utilisation de l'outil ainsi élaboré pour émettre des recommandations sylvicoles à destination des gestionnaires sont présentées. Enfin, nous discutons des limites et avantages de ce type de modèle ainsi que des perspectives concernant leur apport à la gestion du risque.

Mots-clés : ancrage racinaire, vitesse de vent critique, stabilité de peuplement, essai de flexion, *Pinus pinaster* Ait., CAPSIS, ForestGALES

Abstract

We reviewed different models which have been developed for predicting tree failure to wind loading, placing a special emphasis on mechanistic models. The decision support tool, ForestGALES, which incorporates such a mechanistic model, was then chosen to include Maritime pine growing in the silviculture conditions of the Landes de Gascogne region, SW France. To adjust the species dependent relationships for Maritime pine, winching tests were used to determine the mechanical resistance of root anchorage to podzolic soil conditions and wind exposure. A connection was then carried out between ForestGALES and the simulation platform, CAPSIS. This link allows us to use the Maritime pine growth model to provide the stand characteristics needed as input to ForestGALES, and thus simulate the wind resistance of a stand according to a multitude of forestry scenarios. The possible use of this tool is then discussed with regard to recommendations for forest managers. We also outline the limits and advantages of this type of model, and consider its future evolution taking into account the aspect of risk management.

Keywords: root anchorage, critical wind speed, stand stability, winching test, *Pinus pinaster* Ait., CAPSIS, ForestGALES

Le vent est, pour les forêts, un facteur de dégât parmi les plus importants avec les incendies et les ravageurs. Dans les forêts de production, les dégâts d'arbres sur pied provoqués par les tempêtes se chiffrent en pertes économiques. Or, la sylviculture et l'aménagement forestier peuvent contribuer à diminuer les risques encourus par les peuplements face au vent.

Mis au point récemment, différents types d'outils, dont certains sont des modèles, ont été développés pour aider les forestiers à déterminer la résistance au vent de leurs peuplements. Cet article a pour objectif de présenter ces différents modèles puis de détailler la méthodologie et les résultats obtenus pour l'adaptation d'un de ces modèles au cas du pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) dans les Landes de Gascogne.

Cet article reprend pour partie le texte paru aux Editions Quae sous la référence suivante :

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 : Y. Birot, G. Landmann, I. Bonhême (Eds), La forêt face aux tempêtes. Quae Editions, Paris, p. 261-273.

1 Présentation des différents types de modèles

Pour intégrer le risque lié au vent dans des outils d'aide à la décision, ceci implique généralement d'y inclure la connaissance de l'aléa, soit pour le vent, sa vitesse et sa direction pour une zone donnée. L'information directe pour certaines zones du territoire est maintenant disponible (enregistrement de données régulières de vitesses de vent lié à l'apparition des stations météorologiques — 1854, premières stations en France — et à l'invention de l'anémomètre à coupelles en 1946), mais cette information est limitée dans l'espace, et la spatialisation des vitesses comme leur prédiction à long terme restent difficiles. Des techniques indirectes ont été élaborées pour pallier le manque de données directes *in situ*, afin de représenter géographiquement le climat de vent. Certaines méthodes sont empiriques, telles que le DAMS (Detailed Aspect Method of Scoring) (Quine et White, 1993) utilisé en Grande-Bretagne. D'autres sont basées sur la modélisation et permettent de reproduire des profils de vent sur un paysage ou un objet de caractéristiques données : par exemple, les modèles topographiques issus d'essais en soufflerie (simulation d'écoulement des vents selon la configuration du relief). Ces approches sont partiellement utilisées, parfois de façon simplifiée, dans les outils d'aide à la décision.

D'autre part, la prédiction du risque implique de pouvoir estimer la réaction de l'arbre ou du peuplement face à l'aléa. Quel impact aura un vent d'intensité et de fréquence données sur le peuplement forestier en terme de dégâts? L'analyse de la stabilité au vent des arbres et des peuplements, conduite sur la base de l'exposition et de la vulnérabilité au risque, s'attache donc à relier l'aléa à ses conséquences par le biais d'une fonction de dommages. Cette fonction est dépendante des caractéristiques dendrométriques du peuplement. Deux grands types de méthodes peuvent être mis en œuvre : le premier découle directement de la caractérisation des dommages et relève essentiellement de l'observation traitée avec des outils statistiques ; le second adopte de préférence l'expérimentation pour, à partir de relations simples établies en conditions contrôlées, valider des modèles susceptibles d'être combinés entre eux pour aboutir à une fonction complète de dommages.

1.1 Indicateurs et modèles statistiques

Pour évaluer la stabilité des arbres ou des peuplements, les sylviculteurs ont utilisé de simples indicateurs tel que la hauteur atteinte par le peuplement, ou le coefficient d'élancement "Hauteur totale/Diamètre à 1,3 m" (Pardé et Bouchon, 1988) : un arbre (h/d) ou un peuplement (Hg/Dg ou Hdom/Dg) est d'autant plus fragile que ce coefficient est élevé. Dans le même esprit, à partir de l'étude de chablis dans des peuplements réguliers de *Picea abies* L. Karst. et d'*Abies alba* Mill. du Massif

Central endommagés par la tempête de 1982, Becquey et Riou-Nivert (1987) puis Riou-Nivert (2009) ont défini trois zones correspondant à des domaines de stabilité.

Un autre type d'indicateurs combine l'observation de dégâts sur une zone, la prise en compte des conditions climatiques d'un site et des caractéristiques pouvant influencer la tenue au vent des arbres (caractéristiques de la végétation, sol, etc…). La Forestry Commission a combiné une méthode (WHC, Windthrow Hazard Classification, Miller, 1985) qui attribue une classe de risque de vent à une zone géographique donnée, (six classes de risque de dégât lié au vent sont définies sur la base des scores de quatre facteurs pondérés) et deux hauteurs dominantes caractérisant la stabilité du peuplement considéré : une hauteur dite "critique" à laquelle les dégâts commencent à se manifester, et une hauteur dite "terminale" à laquelle les dégâts se propagent dans le peuplement pour atteindre un taux de 40% (Quine, 1995 ; Quine et al., 1995). La méthode d'estimation du DAMS dont nous avons parlé plus haut est une version extraite de la WHC. Le calcul du DAMS se fait à partir d'une carte des vents, de l'altitude et de la topographie (niveau de protection ou configuration du relief favorisant l'engouffrement du vent, …). Lekes et Dandul (2000) ont développé en République Tchèque un système similaire à la WHC. Ce système, WINDARC (WINd DAmage Risk Classification), a permis de classer les peuplements forestiers d'une zone définie selon neuf niveaux d'exposition au risque (de 1 = risque faible à 9 = risque fort). Ce niveau d'exposition est calculé selon le type de sol, la topographie, les facteurs climatiques (facteurs permanents) et les caractéristiques de la végétation (facteurs non permanents). Un Système d'Information Géographique (SIG) permet de cartographier et d'analyser ces différents facteurs. Le résultat en sortie est une carte figée de la région présentant ces facteurs permanents.

Il existe également des modèles de type probabiliste qui fournissent en sortie une probabilité de dégât. Ils prédisent la probabilité de dommages dus au vent pour une forêt d'une zone géographique donnée, en mettant en relation des dégâts déjà observés sur cette forêt avec des facteurs connus pour influencer la résistance au vent. Le modèle consiste souvent en une régression logistique. Citons comme exemples les modèles statistiques mis au point par Lohmander et Helles (1987), Valinger et Fridman (1999), Jalkanen et Mattila (2000), Mitchell et al. (2001) et Ni Dhubhain et al. (2001). Les modèles probabilistes sont utilisés pour les forêts monospécifiques équiennes mais ils sont également adaptés au calcul du risque pour les forêts à structure complexe, par exemple les forêts hétérogènes en âge et/ou en composition d'essences. Mais, du fait de la seule utilisation d'observation de dégâts pour leur mise au point, leur pouvoir explicatif est limité : ils ne prennent pas en compte les caractéristiques du vent que les arbres ont subi et ils sont basés sur la comparaison d'un faible nombre de modalités sylvicoles.

1.2 Modèles mécanistes

Une autre catégorie d'outils est constituée par les modèles déterministes souvent basés sur des approches plus mécanistes à l'échelle de l'arbre. Ils calculent la vitesse critique de vent nécessaire pour ruiner un arbre représentatif d'un peuplement puis ils la comparent avec le climat de vent local pour la zone géographique du peuplement de façon à estimer sa période de retour. Cette vitesse est calculée de façon mécaniste, en prenant en compte les principaux facteurs influençant la résistance au vent de l'arbre : géométrie de l'arbre, force du vent, résistance au déracinement ou à la casse... Ils sont calibrés grâce à des études en soufflerie et des essais de flexion. Dans la littérature et sans prendre en compte les adaptations, on ne recense que trois types de modèles pour calculer la vitesse critique de vent : HWIND (Peltola et al., 1999), GALES (Gardiner et al., 2000), et FOREOLE (Ancelin et al., 2004). GALES ou HWIND ont initialement été construits pour des peuplements monospécifiques et équiens puisque la vitesse critique n'est calculée que pour un arbre représentatif du peuplement. Au contraire, FOREOLE a été mis au point pour calculer ces vitesses pour chaque arbre positionné dans des peuplements hétérogènes de *P. abies*. Ces modèles ne sont valides que pour des charges de vent appliquées en statique. Des modèles au niveau arbre existent actuellement pour décrire le

comportement d'arbres soumis à des charges dynamiques, par exemple England et al. (2000), Saunderson et al. (1999), Sellier et al. (2005).

2. Un outil de prédiction de la stabilité pour les peuplements de pin maritime

Nous avons construit un outil d'aide à la décision capable de prédire la résistance au vent de peuplements équiennes monospécifiques de pin maritime poussant dans les conditions sylvicoles des Landes de Gascogne (France) en combinant deux modèles et deux logiciels. Premièrement, on a choisi GALES (Geographical Analysis of the Losses and Effect of Storms), modèle de prédiction du risque, intégré dans le logiciel d'aide à la décision ForestGALES (Gardiner et al., 2000). Les relations espèce-dépendantes présentes dans ce modèle ont été adaptées grâce aux données issues d'essais de flexion (Cucchi et al., 2004). Deuxièmement, le modèle de croissance du pin maritime, intégré dans le logiciel CAPSIS sous la forme du module PP3 (Meredieu, 2002), a été connecté à ForestGALES dans le but d'effectuer des simulations avec autant de scénarios sylvicoles voulus (Cucchi et al., 2005).

2.1 GALES : modèle de prédiction du risque

GALES est un modèle qui prédit les vitesses de vent requises pour déraciner et casser l'arbre moyen représentatif d'un peuplement monospécifique et équienne donné (Gardiner et Quine, 2000). Cela signifie que le modèle prédit la vitesse nécessaire pour ruiner le peuplement dans sa totalité selon deux modes : chablis ou volis. Il estime également la période de retour de ces vitesses critiques pour une zone géographique donnée. Ce modèle utilise en entrée les caractéristiques dendrométriques classiques de description d'un peuplement (espèce, âge, densité, hauteur dominante, diamètre moyen) issues de tables de production ainsi que des informations sur le type de sol, la qualité du drainage et la méthode d'installation.

GALES est un modèle structuré pour répondre successivement aux questions suivantes :

- Quelle est la force nécessaire pour déraciner et pour casser un arbre de dimension donnée ?

Le modèle calcule la résistance de la tige à la casse (calcul du moment critique de casse basé sur la résistance théorique de la tige) et la résistance de l'arbre au renversement (calcul du moment critique de déracinement basé sur des essais de flexion dans des conditions pédologiques et sylvicoles très variées).

- Quelle est la vitesse de vent qui permet de générer cette force nécessaire pour endommager l'arbre ?

Le modèle calcule le moment de flexion maximal, soit au niveau du sol (pour le déracinement), soit à 1,30 m (pour la casse ; la hauteur de 1,30 m correspond à la hauteur de mesures des circonférences effectuées classiquement), pour un profil de vitesse de vent donné. Par un processus itératif faisant varier la vitesse de vent, on cherche l'égalité entre les moments critiques et le moment de flexion maximal. On obtient donc deux vitesses de vent critiques, une pour la casse et une pour le déracinement de l'arbre moyen.

Le calcul du moment de flexion maximal intègre le fait que les vitesses de vent responsables des dégâts ne sont pas les vitesses moyennes mais les vitesses maximales de vent. Ainsi, le facteur « rafale » intervient comme facteur multiplicatif pour passer d'un moment de flexion moyen (défini par le profil de vent et les caractéristiques dendrométriques de l'arbre moyen) à un moment de flexion maximal. Ce facteur est dérivé des relations empiriques établies par Gardiner et al. (1997) pour des gammes de hauteurs d'arbre et d'espacements données. Il implique donc une augmentation de la charge du vent sur l'arbre moyen. Ainsi, pour un même moment critique de casse ou de déracinement, la vitesse de vent nécessaire pour atteindre l'égalité sera inférieure.

- Quelle est la probabilité que cette vitesse de vent soit atteinte pour la zone géographique considérée ?

Pour un peuplement forestier de n'importe quelle zone du Royaume Uni, un score de DAMS est attribué (voir l'explication au paragraphe 1) basé sur la localisation, l'altitude et l'exposition. Ce score permet d'estimer une valeur moyenne du climat de vent. Afin de pouvoir extraire de ce score la vitesse maximale de vent correspondant à la valeur moyenne du climat de vent, il est donc relié à une distribution des vitesses de vent selon leurs probabilités de retour. Cette distribution est extrêmement sensible, une faible variation de vitesse de vent peut entraîner une forte variation de la probabilité d'occurrence. Les choix en entrée (espèce, type de sol, type d'installation, drainage) permettent au modèle de sélectionner la forme des équations et les paramètres correspondants. On obtient une combinaison d'équations et de valeurs de paramètres pour une combinaison de choix.

2.2 Adaptation du modèle Gales aux conditions du pin maritime dans les Landes de Gascogne

Notre étude a consisté à étudier l'ancrage du Pin maritime par des essais de flexion. Pour définir ce comportement, 100 pins au sein du peuplement ou en lisière Ouest (exposition régulière aux vents dominants), répartis sur quatre peuplements de lande humide et trois peuplements de lande sèche, ont été testés en flexion statique à l'aide d'un tire-fort, jusqu'à la ruine (chablis ou volis). Des données dendrométriques, combinées à la force de traction déployée pour arracher l'arbre, permettent de calculer le moment critique de renversement (MCR) (Cucchi, 2004 ; Cucchi et al., 2004).

Nous avons cherché à relier le MCR avec une caractéristique dendrométrique de l'arbre. Des corrélations entre le MCR et les variables poids de la tige, $\{DBH^3\}$ (DBH : Diamètre à 1,30 m) et $\{H \times DBH^2\}$ étaient hautement significatives ($P < 0,001$). La régression linéaire entre le MCR et le poids de la tige permet alors de comparer le comportement mécanique de l'ancrage du Pin maritime selon les différents facteurs pris en compte initialement dans l'échantillonnage : type de landes et exposition aux vents dominants (pins internes ou de lisière). Nous avons, tout d'abord, montré qu'une discrimination selon la présence ou l'absence de l'alios sous l'arbre est plus pertinente pour la mécanique de l'ancrage qu'une discrimination selon le type de lande désigné pour le peuplement. En effet, même en lande sèche, l'alios peut être localement présent de la même façon qu'en lande humide. En utilisant les variables présence d'alios et exposition des arbres au vent dominant, ces analyses montrent un effet significatif de ces deux facteurs: les arbres en lisière avec présence d'alios d'une part, et ceux poussant en l'absence d'alios d'autre part étaient significativement plus résistants à l'arrachage que les arbres poussant sur alios au sein du peuplement. Il n'y a pas de différence significative entre la résistance des pins de lisière poussant sur alios et celle des pins poussant sans alios au sein du peuplement. Il faut souligner que pour ces derniers, la prédiction du MCR est possible seulement au-dessus de 250 kg de poids de tige estimé, car en dessous, la casse de la tige intervient dans 82% des cas. Au final, trois relations linéaires entre le MCR et la variable $[H \times DBH^2]$ ont été calibrées.

Par ailleurs, les caractéristiques morphologiques entre les quatre groupes de pins ont été comparées. La longueur relative de houppier est significativement plus importante pour les pins poussant sur de l'alios et pour les pins cassés par rapport aux pins poussant sans alios. Le poids du houppier constitue alors chez ces pins une part plus importante de la biomasse aérienne. Ces caractéristiques ont une influence du point de vue mécanique : un houppier plus long augmente la prise au vent mais son poids plus important abaisse le centre de gravité de l'arbre. Il est ainsi difficile d'en tirer une conclusion globale quant à la résistance de l'arbre au vent. La courbure basale est moins importante pour les pins internes sans alios et les pins cassés. Cette courbure basale pour les pins avec alios peut être associée à un déséquilibre de l'ancrage à un moment donné de la vie de l'arbre et à l'action des vents dominants, en particulier pour les arbres de lisière. Comme attendu, la profondeur d'enracinement est plus

importante chez les pins sans alios, mais il n'y a pas de différence significative de volume de plaque entre les deux types de sol.

Si on considère l'ancrage de ces arbres on peut noter que contrairement à l'asymétrie de la plaque racinaire sur l'axe perpendiculaire à la traction, l'asymétrie sur l'axe de traction montre toujours une extension de la plaque plus importante du côté exposé au vent, et cette partie est deux fois plus étendue chez les arbres de lisières que chez les arbres internes. La meilleure résistance à l'arrachage des pins de lisière semble liée principalement à un ratio masse de plaque racinaire/masse aérienne plus important, et en partie à l'extension et à l'architecture (taille et nombre) des racines traçantes côté au vent. Cette extension est directement liée à l'absence de compétition inter-arbre dans une direction donnée, d'une part car l'extension de plaque est directement liée à la densité d'arbres (Cucchi et Bert, 2003), et d'autre part car le stress mécanique engendré par les vents dominants entraîne une adaptation du système racinaire du pin maritime (Stokes et al., 1998).

2.3 Mise au point d'un nouvel outil de prédiction du risque pour le pin maritime

GALES a été construit dès l'origine pour pouvoir estimer la résistance au vent de peuplements homogènes et monospécifiques. Il a été calibré pour 18 espèces différentes de conifères. Comme pour l'ensemble de ces autres espèces, nous avons fourni à GALES soit des paramètres spécifiques au pin maritime, soit des équations particulières. Ceci concerne, outre les équations de moments critiques, la description de la dimension du houppier, la densité foliaire, la densité de bois vert, les modules d'élasticité et de rupture de la tige. Le choix de la présence ou l'absence d'alios sous le peuplement affecte la relation du Moment critique de renversement et la relation « longueur du houppier », qui ont été implémentées avec trois jeux de paramètres (avec alios, sans alios et global). Certains paramètres, non disponibles pour le pin maritime, ont été choisis chez l'espèce la plus proche présente dans ForestGALES, à savoir le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) (Cucchi et al., 2005).

CAPSIS est une plate-forme de simulation dédiée à la modélisation de la croissance et de la dynamique des peuplements forestiers (de Coligny et al., 2003). La connexion concerne le module pin maritime (PP3) de CAPSIS (Meredieu, 2002). La connexion pourrait être étendue à d'autres modules de CAPSIS ayant une architecture proche de celle de PP3. L'avantage principal du couplage des deux logiciels réside en la capacité de CAPSIS et du modèle pin maritime utilisé, à générer les informations dont a besoin ForestGALES en entrée selon une multitude de scénarios sylvicoles.

Différents scénarios sylvicoles pour le pin maritime ont été simulés en fonction de différentes densités initiales, intensités d'éclaircie et indice de fertilité du site (Cucchi et al., 2005).

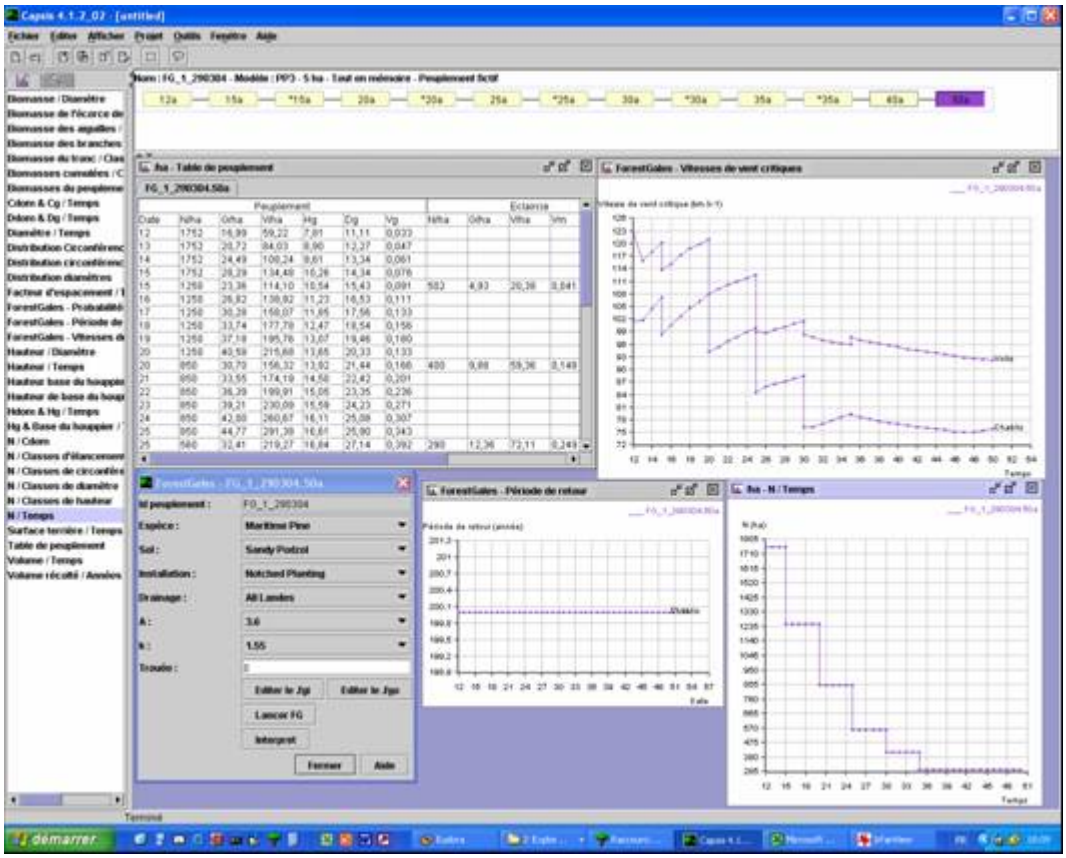

Figure 1 : Copie d'écran Capis avec des résultats obtenus avec ForestGales

Synthèse et perspectives

Les informations recueillies au cours de ce projet sur la comparaison d'ancrage racinaire entre des arbres poussant au sein du peuplement et des arbres poussant en bordure exposée aux vents dominants sont novatrices : les modèles mécanistes existants de prédiction du risque lié au vent, principalement HWIND et GALES, sont basés respectivement sur le comportement d'arbres de bordure et d'arbres situés au sein d'un peuplement. Ils ne sont calibrés que sur un des deux jeux de données, et extrapolent pour prédire le comportement des arbres de la catégorie manquante. Ces informations pourront donc être exploitées pour valider les hypothèses utilisées dans ces modèles.

Les analyses ont montré qu'une discrimination selon la présence ou l'absence d'alios sous l'arbre est plus pertinente pour la mécanique d'ancrage qu'une discrimination selon le type de lande. En effet, même en lande sèche, l'alios peut être localement présent de la même façon qu'en lande humide. La régression est utilisée pour comparer le comportement mécanique du pin maritime selon le type de sol (présence ou non d'alios) et l'exposition aux vents dominants (pins internes ou de lisière).

Grâce à l'intégration de GALES, CAPSIS-PP3 permet de visualiser grâce à des outils développés à cet effet (courbes, tables...) l'évolution des vitesses de vent (en km/h) pour la casse et le déracinement du peuplement. Ce nouvel outil permet de tester l'influence de différents facteurs sur la résistance au vent de peuplements de pin maritime, et en premier lieu l'effet des dimensions des arbres en relation avec la densité du peuplement tout le long d'un scénario sylvicole. En effet, l'intérêt du modèle de croissance PP3 est de permettre la génération de dimensions d'arbres dans des peuplements variés cohérentes avec l'évolution de la sylviculture au cours du temps. Cette possibilité de tester de nombreux types de peuplements permet de valider et de compléter les résultats obtenus dans les études de dégâts post tempête. Le modèle permet ainsi de tester l'influence de la densité sur la résistance du peuplement couplé à la fertilité du site (au sens hauteur dominante à un âge de référence). Ainsi, nous avons pu

montrer que la sensibilité au vent augmente avec l'âge du peuplement. De plus, l'augmentation de l'indice de fertilité entraîne également une augmentation de la sensibilité du peuplement. Néanmoins, il reste à valider l'effet des éclaircies sur la résistance au vent comme l'ont fait Achim et al. (2005).

Bien que l'outil d'aide à la décision ForestGALES, utilisé et développé dans cette étude, soit utile pour prédire le risque de chablis ou de casse dû au vent pour le pin maritime, il présente certaines limites, et des améliorations doivent être apportées (Gardiner et al., 2008). Les résultats des essais de flexion sur le terrain, ainsi que les simulations décrites, montrent une importante variabilité qui n'est pas expliquée par des paramètres mesurés tels que la hauteur ou le diamètre de l'arbre. Une grande partie de cette variabilité est sans doute liée à l'architecture racinaire, difficile à analyser mais qui gouverne fortement la stabilité mécanique de l'arbre. C'est pourquoi il serait souhaitable d'intégrer un modèle simple d'ancrage racinaire dans ForestGALES. Pour l'instant, seul un modèle assez complexe d'ancrage racinaire existe pour le pin maritime (Dupuy et al., 2005), mais il serait envisageable de simplifier ce modèle pour l'inclure dans ForestGALES.

La configuration du massif landais est très particulière. En effet, 90% de la forêt des Landes de Gascogne est constituée de petites propriétés privées de taille irrégulière, insérées dans une mosaïque de parcelles de différentes hauteurs et formes. Dans ce contexte, la possibilité d'inclure des informations sur la taille et la forme des parcelles étudiées paraît être une perspective intéressante. D'ailleurs, les interactions entre parcelles (présence mitoyenne d'une parcelle récemment coupée qui risque de fragiliser les peuplements adjacents par exemple) sont prises en compte par des paramètres empiriques dans ForestGALES (non testés dans cette étude). De façon plus générale et prospective, l'utilisation d'un SIG dans le cadre du couplage ForetsGales/CAPSIS permettrait de prendre en compte l'influence des facteurs paysagers sur les dégâts de vent.

L'utilité des modèles empiriques et mécanistes n'est pas seulement de prédire le risque de chablis ou de casse au vent dans une région donnée, mais aussi d'alimenter les systèmes d'expertise tel que celui développé par Mickovski et al (2005). Il est techniquement difficile d'intégrer de tels modèles dans ces systèmes d'aide à la gestion, mais l'information obtenue suite à des simulations via les modèles peut servir à renseigner des bases de données. Ces bases fournissent au système expert des informations concernant la croissance des arbres ainsi que les facteurs qui gouvernent la résistance au vent et la stabilité dans des conditions données.

Références bibliographiques

Achim A., Ruel J.-C, Gardiner B.A., 2005. Evaluating the effect of precommercial thinning on the resistance of balsam fir to windthrow through experimentation, modelling and development of simple indices. Can. J. For. Res 35, 1844-1853.

Ancelin P., Courbaud B., Fourcaud T., 2004. Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands. Forest Ecology and Management 203, 101-121.

Becquey J., Riou-Nivert P., 1987. L'existence de "zones de stabilité" des peuplements, conséquences sur la gestion. Revue Forestière Française 39, 323-334.

de Coligny F., Ancelin P., Cornu G., Courbaud B., Dreyfus P., Goreaud F., Gourlet Fleury S., Meredieu C., Saint André L., 2003. CAPSIS: Computer-Aided Projection for Strategies In Silviculture: Advantages of a shared forest-modelling platform. In Amaro A., Reed D., Soares P. (Eds.), Modelling Forest Systems, (Wallingford), CABI Publishing, p. 319-323.

Cucchi V., 2004. Sensibilité au vent des peuplements de Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.). Analyse comparative de dégâts de tempête, étude expérimentale et modélisation de la résistance au déracinement. Université de Bordeaux I, (Bordeaux, France), 108 p.

Cucchi V., 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 (4), 460-466.

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

Dupuy L., Fourcaud T., Stokes A., 2005. A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage. Plant and Soil 278, 119-134.

England A.H., Baker C.J., Saunderson S.E.T., 2000. A dynamic analysis of windthrow of trees. Forestry 73, 225-237.

Gardiner B.A., Quine C.P., 2000. Management of forests to reduce the risk of abiotic damage - a review with particular reference to the effects of strong winds. Forest Ecology and Management 135, 261-277.

Gardiner, B., Byrne K., Hale S., Kaminura K., Mitchell S.J., Peltola H., Ruel J.-C.; 2008. A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests. Forestry 81, 447-463.

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

Gardiner B.A., Stacey G.R., Belcher R.E., Wood C.J., 1997. Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree stability. Forestry 70, 233-252.

Jalkanen A., Mattila U., 2000. Logistic regression models for wind and snow damage in northern Finland based on the national forest inventory data. Forest Ecology and Management, 135, 315-330.

Lekes V., Dandul I., 2000. Using airflow modelling and spatial analysis for defining wind damage risk classification (WINDARC). Forest Ecology and Management 135, 331-344.

Lohmander P., Helles F., 1987. Windthrow probability as a function of stand characteristics and shelter. Scandinavian Journal of Forest Research 2, 227-238.

Meredieu C., 2002. Intégration dans Capsis d'un modèle de croissance du Pin maritime développé par l'INRA. Convention n° 61.45.47/01, MAPA-DERF/INRA. Rapport final de cinquième tranche 28/11/2002. In Auclair D. (Ed.), Modélisation et intégration logicielle : croissance, branchaison, qualité des bois. Aide à la décision pour la sylviculture et l'utilisation du bois des essences forestières françaises, Bordeaux, France.

Mickovski S.B., Stokes A., Van Beek L.P.H., 2005. A decision support tool for windthrow hazard assessment and prevention. Forest Ecology and Management 216, 64-76.

Miller K.F., 1985. Windthrow Hazard Classification, Forestry Commission, London

Mitchell S.J., Hailemariam T., Kulis Y., 2001. Empirical modelling of cutblock edge windthrow risk on Vancouver Island, Canada, using stand level information. Forest Ecology and Management 154, 117-130.

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

Pardé J., Bouchon J., 1988. Dendrométrie (2ème édition), Nancy, ENGREF, 328 p.

Peltola H., Kellomaki S., Vaisanen H., Ikonen V.P., 1999. A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch. Canadian Journal of Forest Research 29, 647-661.

Quine C.P., 1995. Assessing the risk of wind damage to forest: practice and pitfalls. In : Coutts M.P., Grace J. (Eds.), Wind and Trees, Cambridge University Press, Cambridge, p. 379-403.

Quine C.P., White I.M.S., 1993. Revised windiness scores for the Windthrow Hazard Classification: the revised scoring method. Forestry Commission Research Division, Information Note 230 (6).

Quine C.P., Coutts M., Gardiner B.A., Pyatt G., 1995. Forest and wind: management to minimise damage. Forestry Commission Bulletin No. 114, London, 24 p.

Riou-Nivert P., 2009. Vers une prise en compte du risque de tempête dans la gestion forestière. In : Y. Birot, G. Landmann, I. Bonhême (Eds.), La forêt face aux tempêtes. Quae Editions, Paris, p. 387-410.

Saunderson S.E.T., England A.H., Baker C.J., 1999. A dynamic model of the behaviour of sitka spruce in high winds. Journal of Theoretical Biology 200, 249-259.

Sellier D., Fourcaud T., 2005. Relationship between the oscillations of young pines (*Pinus pinaster* Ait.) and their aerial architecture. Journal of Experimental Botany 56 (416), 1563-1573.

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.

Valinger E., Fridman J., 1997. Modelling probability of snow and wind damage in Scots pine stands using tree characteristics. Forest Ecology and Management 97, 215-222.

Valinger E., Fridman J., 1999. Models to assess the risk of snow and wind damage in pine, spruce and birch forests in Sweden. Environmental Management 24, 209-217.