

2010-2011

MASTER STVE

Sciences et Technologies du Vivant et de l'Environnement

Mention

Espaces, Ressources, Milieux

Spécialité FGE

Fonctionnement et Gestion des Ecosystèmes

**UN MODELE MECANO-EMPIRIQUE POUR MIEUX
COMPRENDRE LA STABILITE AU VENT DU HETRE SUR
PLATEAU CALCAIRE.**

VIVIEN BONNESOEUR

Mémoire de stage, soutenu à Nancy le 05/09/2011

Maître de stage : Meriem FOURNIER, Directrice du LERFoB et HDR.

Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt Bois, UMR 1092
Equipe Croissance, Production et Qualité des Bois
INRA Centre de Recherches de Nancy,
54280 Champenoux



FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVE

Master STVE d'AgroParisTech Nancy Spécialité « Fonctionnement et Gestion des Ecosystèmes »	TRAVAUX D'ÉLÈVES
TITRE : UN MODELE MECANO-EMPIRIQUE POUR MIEUX COMPRENDRE LA STABILITE AU VENT DU HETRE SUR PLATEAU CALCAIRE.	Mots-clés : Vents, modélisation statistique, biomécanique, hêtre, plateau calcaire,
AUTEUR(S) : Vivien BONNESOEUR	Année : 2011
Caractéristiques : 4 volumes ; 40 pages ; 8 figures ; 9 annexes ; 0 cartes ; bibliographie.	

CADRE DU TRAVAIL

ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT : Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt Bois, UMR 1092 Equipe Croissance, Production et Qualité des Bois INRA Centre de Recherches de Nancy, Nom du responsable : Meriem Fournier Fonction : Directrice du LERFoB et HDR		
Nom du correspondant AgroParisTech Nancy :		
Stage	x	Autre
		Date de remise : 26/08/2011
Contrat avec Gref Services Nancy		NON

SUITE À DONNER (réservé au service des études APT)

- Consultable et diffusable
- Confidentiel de façon permanente
- Confidentiel jusqu'au / / , puis diffusable

Résumé.

Les vents forts représentent la première source de dommages pour les forêts européennes. Pointer les facteurs à risque passe par la modélisation de la stabilité au vent, ce que nous avons entrepris pour les futaies régulières et taillis sous futaie de hêtres des plateaux calcaires lorrains. Etant donné la forte proportion de chablis dans notre jeu de données, seul ce type de dégâts a été pris en compte. Nous avons réalisé un modèle empirique original de stabilité au vent car davantage fondé sur des considérations mécaniques que les modèles statistiques usuels. La mise au point d'une relation linéaire élaborée à partir du modèle de rupture fragile de Weibull et d'un critère mécanique empirique a permis d'obtenir un modèle parcimonieux et relativement efficace qui n'utilise que des variables courantes en foresterie.

Les facteurs majeurs de stabilité au renversement sont le produit du diamètre du houppier par la hauteur totale de l'arbre au carré et la profondeur de sol sans roches calcaires. Aucun régime sylvicole ne peut être considéré comme plus stable a priori.

L'ajout final d'un effet aléatoire placette a nettement augmenté la qualité du modèle. Une grande partie de la variabilité inter-placette doit être liée aux conditions de vent différentes d'une placette à l'autre. Améliorer cette donnée est délicat mais permettrait peut-être de mettre en avant des facteurs de second ordre comme la sylviculture.

Summary.

Most of the damages in European forest are done by gales and strong winds. To find out risk factors needs models of wind firmness. We have realised one for the high forests and the coppice with standards from the Lorraine limestone plateau. Since the high rate of windthrow between the damaged trees, only this kind of damages has been taken into account. Our empirical windthrow model was more based on mechanical ideas than current statistical models, which make it original. The creation of a linear relation inspired from Weibull's model of brittle fracture and of a mechanically based criterion has led to a parsimonious and efficient model, which only needs variables commonly used in forestry.

The main windfirm factors are the product of the crown diameter by the square of the total tree height and the soil depth where limestone appears. Any type of silviculture seems to be more windfirm a priori.

The use of a random site effect has largely increased the model quality. Most of the between-site variability may result from the storm site windiness. Improving this data is difficult but could highlight less important factor like silviculture.

Remerciements.

Je tiens beaucoup à remercier Meriem FOURNIER, mon encadrant de stage au LERFoB, pour la confiance et l'autonomie qu'elle m'a accordées tout au long de ce stage. Je la remercie aussi pour toutes les opportunités qu'elle m'a offertes d'aller participer à des conférences ou des formations qui m'ont beaucoup apportées sur un plan personnel et professionnel. Elle a conforté mon goût pour la recherche que je vais poursuivre en réalisant un doctorat par la suite.

Je remercie également beaucoup Francis COLIN, qui m'a également encadré pendant ce stage. Il a su être très disponible et de bons conseils quand j'en avais besoin. J'ai apprécié le regard critique qu'il a porté sur mon travail ce qui m'a aidé à progresser.

Je veux aussi remercier Thierry CONSTANT, François NINGRE et Mathieu FORTIN pour leurs conseils et leur sympathie.

Je tiens à remercier Bruno MOULIA, chercheur au PIAF, pour ses idées fraîches qui ont redonné un second élan au cours de ce stage.

Je remercie Vincent BADEAU et Jérôme BOCK pour leurs données et les conversations instructives que nous avons eues.

Je remercie enfin Gérard NEPVEU pour ses caqueries.

Sans oublier les thésards et stagiaires du LERFoB, notamment Jean-Baptiste, Anthony et Romain pour leur bonne humeur et les discussions inspirées que nous avons pu avoir pendant les repas et les moments de détente.

Présentation de l'organisme d'accueil.

L'INRA a été créé après la guerre en 1946, dans le contexte de modernisation de l'agriculture française. Cet institut mène « des recherches finalisées pour une alimentation saine et de qualité, pour une agriculture compétitive et durable, et pour un environnement préservé et valorisé »

L'INRA a plusieurs missions afin d'allier la connaissance scientifique à la finalité sociale de la recherche :

- Produire et diffuser des connaissances scientifiques notamment en sciences de la vie.
- Concevoir des innovations et des savoir-faire pour la société.
- Eclairer, par son expertise, les décisions des acteurs publics et privés en leur proposant des moyens d'action dont ils pourront débattre et s'emparer.
- Développer la culture scientifique et technique et participer au débat entre la science et la société en mettant les connaissances acquises à la disposition de tous.
- Former à la recherche et par la recherche .

L'INRA s'est implanté en Lorraine en 1961. Les activités de ce centre sont principalement tournées vers la recherche forestière (<http://www.nancy.inra.fr/>).

Les équipes du LERFoB se répartissent entre l'INRA de Nancy et AgroParisTech-ENGREF. Ce laboratoire correspond à l'UMR 1092, sous la direction de Meriem FOURNIER.

Le LERFoB poursuit trois missions :

- Modéliser l'impact des évolutions climatiques et sylvicoles sur les ressources forestières pour le siècle passé et à venir.
- Des missions de développement à l'intention des gestionnaires forestiers et de milieux naturels afin de leur fournir des outils d'aide à la décision.
- Des missions d'enseignement au sein de l'ENGREF et de plusieurs universités.

Grâce à la diversité des équipes du LERFoB, la forêt est étudiée de son écologie à la transformation du matériau bois en passant par sa production.

Sommaire

Résumé.....	p3
Remerciements.....	p4
Présentation de l'organisme d'accueil.....	p4
1. Contexte, enjeux et état de l'art.....	p6
2. Objectifs poursuivis.....	p7
3. Matériel et méthodes : la construction d'un critère mécanique ajustable.....	p7
3.1. Application du modèle de Weibull.....	p7
3.2. L'arbre dans le vent, un bilan des forces et moment de flexion de la tige.....	p8
3.3. Application à la rupture de la tige ou de l'ancrage d'un arbre.....	p10
3.3.1. Casse de la tige.....	p10
3.3.2. Renversement de l'arbre.....	p10
3.3.3 Déterminisme Volis-Chablis.....	p11
3.4. Matériels disponibles.....	p11
3.4.1. Données dendrométriques et stationnelles.....	p12
3.4.2. Données météorologiques.....	p12
3.4.2.1. Le vent.....	p12
3.4.2.2. L'humidité du sol.....	p12
3.4.3. Le choix des arbres.....	p12
3.5. Construction du moment de flexion.....	p13
3.6. Construction du moment résistant critique de l'ancrage pour un arbre.....	p16
3.6.1. Enracinement.....	p17
3.6.2. Qualité du sol.....	p18
3.7. Outils statistiques.....	p19
4. Résultats et discussions.....	p19
4.1. Faut-il prendre en considération des effets additionnels de forme.....	p21
4.2. Interprétations du moment résistant.....	p21
4.3. Un modèle mixte de sensibilité au vent du hêtre.....	p23
Conclusions.....	p25
Bibliographie.....	p27
Annexes.....	p30

1. Contexte, enjeux et état de l'art .

Depuis la fin des années 50, les dégâts forestiers dûs à des vents forts en Europe n'ont cessé d'augmenter avec comme point d'orgue les 2 tempêtes de 1999, qui ont détruit plus de 200 millions de mètres cubes de bois et dont les conséquences sont encore visibles aujourd'hui (Schelhaas et al., 2003). L'augmentation des dommages reflèterait celle du stock sur pied croissant mais aussi des tempêtes hivernales violentes plus fréquentes, c'est en tout cas la conclusion de travaux récents sur l'impact des changements climatiques sur le régime des vents dans l'hémisphère nord (Della Marta and Pinto, 2009).

Ces événements catastrophiques ont permis une prise de conscience de l'importance du vent en foresterie, par les chercheurs et plus récemment par les gestionnaires. Différentes approches pour comprendre les mécanismes et prédire les risques de dégâts liés au vent ont été développées ces 20 dernières années et peuvent être séparées en 2 catégories : la modélisation mécaniste et empirique.

Les modèles mécanistes comme HWIND (Peltola et al., 1999) ou ForestGales (Gardiner et al., 2000, 2008) furent créés comme des outils pour évaluer le risque sur une parcelle, en prédisant la vitesse de vent critique nécessaire pour casser les tiges des arbres (on parle de volis) ou les déraciner (chablis). Ils peuvent être alors couplés avec l'estimation des fréquences de vent du climat local pour calculer la probabilité de dégâts à court terme. Ce type de modélisation est plus pertinent que celle empirique pour comprendre les mécanismes mis en jeu lors du déracinement ou de la casse d'une tige. Il a ainsi permis de mettre en avant l'importance des rafales et du chargement dynamique des arbres (par les oscillations qui peuvent s'amplifier) en plus du chargement statique (par le vent moyen) mieux compris. Par contre, il ne capture pas encore tous les processus en place en condition naturelle comme les interactions entre arbre (soutien entre arbres, apparitions de trouées au cours d'une tempête qui modifie le régime de vent) bien que Schelhaas et al., (2007) ait tenté d'incorporer ces mécanismes dans FORGEM-W. C'est aussi pour des raisons de simplification que les premiers modèles mécaniques HWIND et ForestGALES ont été conçus pour les peuplements avec les conditions les plus homogènes, soit la plantation résineuse. À ce jour seuls ForestGALES et HWIND ont vraiment été validés, ce qui en fait les modèles les plus connus et utilisés mondialement. D'autres modèles existent comme FOREOLE (Ancelin et al., 2004) ou WINDA (Blennow and Sallnäs, 2004), mais ils n'ont pas été proprement validés étant donné le coût important du processus. La validation est en effet coûteuse car les modèles mécanistes nécessitent d'une part des mesures fines de nombreux paramètres, notamment ceux liés au vent et d'autre part il faut « attendre » les vents forts qui provoquent des dégâts, c'est-à-dire qu'il faut des dispositifs qui peuvent rester longtemps en place avant d'obtenir des données.

La modélisation empirique passe par l'ajustement sur les dégâts d'un modèle statistique à l'aide de mesures dendrométriques et édaphiques couramment utilisées en foresterie à un niveau arbre ou peuplement. Ces modèles nécessitent de gros échantillons de données typiquement issus des inventaires nationaux, pour pouvoir être ajustés et testés car leur application est limitée aux sites où les conditions sont similaires à celles utilisées pour les construire (Hanewinkel et al., 2011). Contrairement aux modèles mécanistes, ils ne permettent pas non plus de définir un lien causal entre le chargement par le vent, les caractéristiques des arbres ou du peuplement et la probabilité de dommages mais offrent tout de même des outils pour classer les arbres ou les peuplements selon le risque encouru. L'atout principal de ces modèles est qu'ils peuvent par contre traiter les cas où les peuplements, la topographie et les sols sont hétérogènes avec des structures complexes.

Ces deux approches sont très complémentaires pourtant il manque de ponts entre elles. Si les modèles mécanistes partent d'une analyse physique des processus qui conduisent à la ruine, les modèles empiriques très souvent associent une probabilité de dégâts à une combinaison linéaire de variables sans fondement théorique, alors que des relations physiques simples et donc robustes existent. Ce constat pointe la difficulté qu'a ce type de modèle à mettre en lumière des critères efficaces de stabilité. En effet, le coefficient d'élanement H/D , souvent pris comme référence, a été remis en cause par des études récentes (Bock et al.,

2002 ; Schütz et al., 2006 ; Valinger et al., 2011). La tentative de Jérôme Bock d'ajouter une variable plus mécanique, apparentée à un moment de flexion, permet d'améliorer la qualité du modèle de stabilité au vent du hêtre (Bock et al, 2002)..

2. Objectifs poursuivis

Le but de ce stage est de ré-analyser les dégâts de la tempête de 1999 sur le hêtre en Lorraine sous un angle plus mécanique afin de mieux comprendre le risque vent individuel dans un modèle indépendant des distances. Ce modèle se veut original car il sera hybride : fondé sur des critères mécaniques mais ajusté statistiquement sur les dégâts. Cette formulation doit représenter un bon compromis entre coût en mesures et en calculs pour obtenir des variables majeures d'intérêts mécaniques et applicabilité à un contexte différent de ceux de la monoculture résineuse.

L'ajout de considérations physiques doit aboutir en un critère concis et riche en informations qui se veut facilement interprétable, notamment car on se donne un cadre théorique qui aide à l'interprétation. Le modèle est donc à but explicatif plus que prédictif et ceci est d'autant plus intéressant que le contexte de l'étude est particulier : les données proviennent d'une essence feuillue défoliée issues de 2 traitements sylvicoles différents. Ce modèle hybride doit rester parcimonieux (aussi peu de paramètres explicatifs que possible en captant les effets physiques de premier ordre) tout en étant plus générique (c'est à dire extrapolable de façon robuste à d'autres contextes et situations) que les modèles empiriques.

3. Matériel et méthodes : la construction d'un critère mécanique ajustable.

3.1. Application du modèle de Weibull

Si nous voulions apporter un sens mécanique via le critère, nous voulions aussi justifier un modèle statistique plus adéquat au problème général de la rupture. La modélisation statistique de la sensibilité des arbres au vent se fait souvent grâce au modèle logistique (Valinger et al., 1997 ; Bock et al., 2002 ; Hanewinkel et al., 2011) On estime alors la probabilité que l'arbre a d'être détruit dans certaines conditions. Ce modèle fonctionne bien car il est adapté au comportement binaire, arbre détruit ou pas, et la fonction de lien logit possède une forme sigmoïde qui peut mimer un seuil de rupture. Toutefois, il n'y a aucune considération mécanique qui justifie ce modèle statistique, notamment la symétrie de la fonction de lien. Symétriquement, les modèles mécanistes usuels fonctionnent en « tout ou rien » à partir d'un critère de force de vent critique, sans considérations statistiques d'une probabilité de dégâts (Peltola, 2006 ; Gardiner et al., 2008 ; Hanewinkel et al., 2011). Pour aller plus loin et réconcilier les deux approches, nous avons dû emprunter des méthodes utilisées en génie civil (Charmet J. C., 2007).

Lorsqu'une contrainte est appliquée sur un solide, celui-ci se déforme selon deux modes : une déformation élastique puis plastique (cf annexe 1).

À partir des dimensions d'un solide et de ses propriétés mécaniques mesurées indépendamment, il est possible de calculer la contrainte critique théorique et la force associée qui entraîne la rupture. Or si l'on multiplie les essais de flexion ou de traction d'une poutre, les valeurs de la force critique expérimentale sont très dispersées par rapport à la moyenne théorique et la dispersion dépend du volume du matériau. La théorie de Weibull interprète ce résultat comme la présence de micro-défauts invisibles et répartis dans le matériau qui le fragilisent et peuvent induire la rupture pour des contraintes nettement inférieures à la contrainte théorique (Charmet, 2007). Weibull modélisa ce phénomène : dès qu'un micro-défaut est soumis à une contrainte supérieure à un seuil d'activation, le défaut s'amplifie, se propage (il « s'active ») et provoque la ruine du matériau entier (la rupture du maillon le plus faible entraîne la rupture générale dans le cas d'un matériau fragile). En considérant que la population des défauts suit une loi de Poisson, la probabilité de rupture $Pr(\sigma)$ pour une contrainte σ vaut :

$$p_r(\sigma) = 1 - \exp\left(-\frac{V}{V_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right)$$

Avec, V le volume de la structure, V_0 un volume unitaire, σ_0 la contrainte moyenne d'activation des défauts ou contrainte moyenne critique et m paramètre important, le module de Weibull, qui représente la dispersion de leurs tailles.

Plus le module de Weibull (m) est faible et plus la dispersion sur les contraintes à rupture est grande, c'est-à-dire que la rupture peut apparaître avec une probabilité non négligeable pour des contraintes faibles (cf annexe 2).

En génie civil, on linéarise le modèle de Weibull pour avoir accès aux paramètres m et σ_0 afin de connaître les probabilités de rupture du matériau par la suite.

$$(1) \quad \log\left(\log\left(\frac{1}{1-pr}\right)\right) = m \log\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) + \log\left(\frac{V}{V_0}\right)$$

Cette relation est très intéressante car elle relie linéairement la probabilité de rupture au logarithme du rapport de la contrainte que subit le matériau par la contrainte moyenne critique et l'augmentation du risque de rencontrer un micro-défaut de grande taille avec l'extension de volume V/V_0 . Elle peut donc s'inscrire dans un modèle linéaire généralisé utilisable pour notre étude. De plus le lien « cloglog » (pour logarithme du logarithme complémentaire) est une fonction de lien connu en statistique, dans le cadre des modèles linéaires généralisés.

La valeur de la contrainte subie par un solide élancé encastré comme un arbre s'interprète à partir de la théorie des poutres en flexion. Que ce soit pour le chablis ou le volis, il est alors essentiel de déterminer le moment de flexion induit par le vent sur le tronc et l'ancrage.

3.2. L'arbre dans le vent, un bilan des forces et moment de flexion de la tige.

En suivant la méthode utilisée dans les modèles mécanistes éprouvés, nous avons choisi de modéliser le comportement d'un arbre sous le chargement quasi-statique du vent (Gardiner et al. 2000, Peltola et al, 1999 et 2006). Les effets du vent sont alors réduits à une force de traînée stationnaire sur l'arbre sans tenir compte des effets dynamiques, qui demanderaient d'une part de prendre en compte la non-stationnarité et la turbulence du vent (Raupach et al., 1996 ; Gardiner et al., Dupont et Brunet, 2006), d'autre part la réponse dynamique de l'arbre qui filtre et amplifie certaines fréquences du signal reçu (Moore et Maguire 2003 ; James et al., 2006 ; de Langre, 2008 ; Sellier et Fourcaud, 2009). Ces effets ne sont pas négligeables, mais nous ne disposons ni du temps, ni des mesures ni même des compétences pour traiter ce problème.

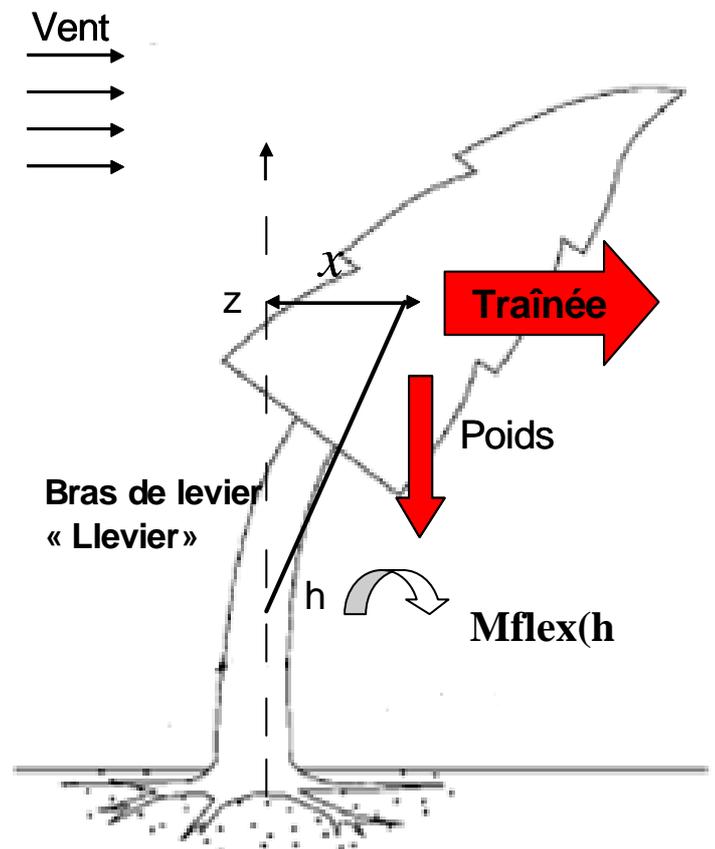


Fig1. Bilan des forces de l'arbre dans le vent

L'intégration non empiriques de ces effets dynamiques dans les modèles mécanistes de diagnostic reste actuellement une question de recherche (de Langre, 2008).

Le houppier développe une force de traînée sous l'effet du vent :

$$F_{\text{traînée}}(z) = \rho_{\text{air}} C_d A(z) V(z)^2$$

Avec ρ_{air} la densité de l'air, C_d le coefficient de traînée qui représente les propriétés aérodynamiques du houppier, $A(z)$ est la surface en prise au vent à la hauteur z et $V(z)$ la vitesse du vent à cette hauteur.

Ceci est la formule brute de la traînée, dans le cas de houppier d'arbre, un phénomène de « profilage » se produit lorsque V augmente: la surface en prise au vent diminue ainsi que le coefficient de traînée (Rudnicki et al., 2003). L'arbre devient plus aérodynamique sous vents forts et la force de traînée peut être réduite de plus de moitié pour des arbres en feuilles. La force de traînée augmente alors plutôt linéairement avec la vitesse compte tenu de la configuration initiale des autres paramètres. Dans le cas de grands arbres défoliés, cette reconfiguration du houppier n'a jamais été mesurée et bien qu'elle existe certainement, elle doit être moins importante.

Une fois que le houppier a commencé à fléchir, une deuxième force entre en jeu, celle du poids de l'arbre déjeté par le vent.

$$P(z) = M(z) \times g$$

Avec $M(z)$ la masse du houppier à z et g la constante de gravitation.

L'action de ces deux forces produit un moment de flexion qui tend à plier l'arbre. En mécanique des solides, le moment de flexion correspond au produit vectoriel d'une force par un bras de levier (Charmet, 2007). En l'occurrence, le moment de flexion dans le cas du houppier fléchi par le vent est :

$$(2) \quad M_{\text{flex}}(h) = F_{\text{traînée}}(z) \times L_{\text{levier}} + P(z) \times x \quad \text{En N.m}$$

Le moment de flexion total induit à la hauteur h est la somme des moments de flexion de la force de traînée et du poids du houppier de la tige située au-dessus de h . On peut calculer un moment de flexion tout le long de la tige. Dans le cas du chablis, on calculera un moment de flexion au niveau de l'ancrage ($h = 0$ et $L_{\text{levier}} = z$) car le bras de levier transmet la force au sol. Pour le volis, on ne connaît pas a priori la longueur du bras de levier puisque la casse peut apparaître a priori à n'importe quelle hauteur dans la tige. Il faut alors étudier le risque de casse en fonction de la hauteur le long de la tige : plus on descend vers le sol, plus le bras de levier augmente, le moment de flexion aussi, mais que la résistance de la section qui varie avec le cube du diamètre de la tige (cf Annexe 3) augmente aussi. Si ces deux valeurs augmentent proportionnellement, dans un rapport constant, le risque est uniformément réparti. C'est la thèse de la contrainte constante le long de la tige utilisée pour expliquer les lois du défilement et de l'allocation de croissance cambiale le long des tiges (Dean et Long, 1986 ; Cannell et Morgan, 1987 ; West et al., 1989) : l'arbre s'adapterait au risque mécanique car l'absence de « point faible » le long de la tige assure le plus faible risque de casse pour une allocation donnée de matière. Si on connaît par contre le défilement exact, on peut calculer la hauteur de moindre résistance. En l'absence de données précises de défilement cette thèse fut utilisée dans de nombreux modèles mécanistes existants (ForestGALES) ce qui justifie de calculer le risque à 1.30m, hauteur où l'on connaît le diamètre. Pourtant il est avéré que le modèle de contrainte constante le long de la tige est rarement valide (Niklas et al., 2000) et d'ailleurs les observations sur le terrain voient souvent les arbres cassés à des hauteurs préférentielles. Il est donc plus pertinent de partir d'un modèle de défilement élaboré indépendamment, et de calculer la hauteur de moindre résistance comme le fait FOREOLE (Ancelin et al., 2004) sur l'épicéa.

3.3. Application à la rupture de la tige ou de l'ancrage d'un arbre.

Le bois étant considéré comme un matériau fragile (en traction et donc en flexion, mais pas en compression), le modèle de Weibull doit pouvoir s'appliquer sur la rupture dans un arbre. Une différence importante apparaît cependant quand on s'intéresse au type de défauts. A l'inverse de matériau homogènes souvent utilisé en génie civil, le bois est un matériau d'origine biologique, beaucoup plus hétérogène et présentant une plus grande disparité de défauts. Ces défauts sont de taille et de nature différentes : des nœuds, des pourritures, des défauts de cohésion entre cernes ou entre parois cellulaires, des amas de rayons ligneux ou de vaisseaux ... Il en va de même dans le sol où les conditions sont extrêmement hétérogènes car la plaque sol-racine est un « matériau composite ». Cela pose alors la question de la modélisation de ces défauts d'homogénéité : Peut-on se contenter d'une loi de répartition de Poisson ou doit-on inférer d'autres lois à partir de la connaissance plus déterministe de leur présence et de leur effet? Les outils de diagnostics d'arbres urbains prennent habituellement en compte de façon déterministe les pourritures à partir d'un diagnostic visuel (Fournier et Chanson, Acta Horticultura 1999). Pour expliquer la casse de la tige, si les nœuds s'avéraient un défaut majeur, on pourrait aussi tirer parti de connaissances sur l'architecture des arbres. Dans le cas du chablis la question reste posée mais aucune piste simple de réponse n'est envisagée.

3.3.1. Casse de la tige.

Dans la tige, il est aisé de développer la théorie de Weibull en localisant des contraintes à partir du moment de flexion, en utilisant la théorie des poutres en flexion (cf Annexe 3).

La contrainte en flexion dans une section droite circulaire est maximale à la périphérie avec un maximum égal à (cf Annexe 3) :

$$\sigma_{max} (N.m^{-2}) = \frac{32M_{flex}}{\pi D^3}$$

Dans les modèles classiques non probabilistes, cette valeur est comparée à la contrainte critique, c'est à dire le maximum que le matériau peut supporter, mesurée lors d'essai mécanique en laboratoire sur petits échantillons et appelée MOR module de rupture pour des essais normalisés de flexion (Peltola, 2006). Des bases de données donnent le MOR moyen du bois vert pour différentes espèces, ce qui conduit souvent à considérer que cette valeur est constante et caractéristique de l'espèce (bien qu'il soit connu que les propriétés mécaniques du bois varie dans l'espèce et dans l'arbre, Nepveu G., 1994). Cette hypothèse est statistiquement justifiée pour traiter du diagnostic d'arbres, où la variabilité et la sensibilité des facteurs géométriques est souvent largement prépondérante.

Grâce à un profil de tige, on peut estimer le second moment d'inertie, ainsi que le moment de flexion et donc la contrainte subie par la tige à une hauteur quelconque. On peut ainsi définir un critère mécanique,

$$Critère\ mécanique = \frac{Contrainte\ max\ subie}{Contrainte\ critique} = \frac{32M_{flex}}{\pi D^3 MOR}$$

et une relation linéaire associée, dont le principale terme est celui du critère mécanique.

$$\log\left(\log\left(\frac{1}{1-pr}\right)\right) = a + m \log(Critère\ mécanique) + \log\left(\frac{Volume\ du\ tronc}{Volume\ unitaire}\right) + \varepsilon$$

3.3.2. Renversement de l'arbre.

Le cas du chablis est beaucoup plus compliqué. Si les racines qui sont sollicitées en traction et flexion-compression rentrent dans le cadre de la rupture fragile, le comportement d'un sol humide est lui

considéré comme ductile (Hallett et Newson, 2004). Le comportement général de la ruine de l'ancrage n'est donc pas forcément un comportement fragile. Nous avons néanmoins choisi de conserver la formalisation de Weibull même si elle est discutable car elle est au moins aussi pertinente qu'un modèle logistique purement empirique.

Pendant ce stage, l'absence de modèle précis de localisation des contraintes dans le sol et les racines, (à l'inverse du tronc pour le volis), a alors demandé de nouvelles simplifications. Pour un solide de dimension donnée, la contrainte est proportionnelle au moment de flexion. On assimile donc le rapport des contraintes à un rapport des moments de flexion. On assimile donc le rapport des contraintes à un rapport des moments de flexion, et nous assimilons le moment de flexion supporté par l'ancrage au moment calculé à la base du tronc. étant donnée la faible dimension en profondeur du système racinaire comparée à la longueur de la tige. On cherche donc un critère mécanique de la forme :

$$\text{Critère mécanique} = \frac{M_{flex}(h=0)}{\text{Moment résistant}}$$

Contrairement à celui du tronc, un calcul mécanique du moment résistant de l'ancrage demanderait des développements en terme de données et de modélisations, (Ennos, 2000 ; Dupuy et Fourcaud, 2007) inaccessibles dans le cadre de ce stage . Il sera donc estimé empiriquement (cf partie suivante)

$$(1) \text{ devient alors } \log\left(\log\left(\frac{1}{1-pr}\right)\right) = a + m \log(\text{Critère mécanique}) + \varepsilon$$

où, la variation du logarithme du rapport des volumes est également négligée car on ne sait pas la calculer pour le chablis.

3.3.3 Déterminisme Volis-Chablis.

Les modèles mécanistes ont un fonctionnement similaire : pour chaque arbre on calcule le moment de flexion induit par le vent que l'on compare au moment résistant de la tige et de l'ancrage. Le moment résistant le plus faible détermine le mode de ruine .

$M_{res} > M_{flex}$	Arbre intact
$M_{flex} > M_{reStige} > M_{resancrage}$	Arbre chablis
$M_{flex} > M_{resancrage} > M_{reStige}$	Arbre Volis

Dans le cas de notre modèle, la méthode est proche. On calibre une première relation, sur les chablis par exemple, entre tous les arbres intacts et les arbres chablis, en excluant les arbres volis. On calibre une seconde relation pour les arbres volis. Les deux relations nous donnent la probabilité d'apparition des chablis et des volis ce qui permet la discussion sur le type de dégâts.

3.4. Matériels disponibles

Le but du modèle est de construire un critère mécanique de stabilité à partir de données dendrométriques et stationnelles qui proviennent de 2 études antérieures, la thèse de Vincent Badeau (1995)

sur les hêtraies des plateaux calcaires lorrains et la partie « stabilité au vent des futaies régulières et des taillis sous futaie » du rapport ONF de Jérôme Bock (2002) qui travailla à partir des placettes de Badeau situées dans un rayon de 60 km à l'ouest de Nancy.

3.4.1. Données dendrométriques et stationnelles.

La thèse de Vincent Badeau s'intéresse à l'existence d'une tendance à long terme sur la croissance radiale du hêtre en taillis sous futaie (TSF) dans le but de la comparer à celle du hêtre de futaie régulière (FR). Pour cela il fallait réaliser un échantillonnage avec des conditions stationnelles très homogènes entre taillis sous futaie et futaie régulière, ce qui fut délicat car les TSF sont souvent situés sur de mauvais sols.

Les placettes que Badeau a utilisées en 1992 « sont en fait des points autour desquels on pouvait sélectionner au minimum une dizaine d'arbres bien conformés parmi la strate dominante dans un peuplement homogène au niveau sylvicole et stationnel, et elles n'ont pas de surface bien définie ; pour les taillis sous futaie, une priorité avait été donnée aux parcelles où les arbres dominants de la réserve avaient des âges variés. » Il effectua de nombreuses mesures dendrométriques mais également stationnelles (cf annexe 4).

3.4.2. Données météorologiques.

3.4.2.1. Le vent.

Les conditions de vent local (vitesse moyenne sur 1h, vitesse instantanée des rafales, durée de la tempête, etc) peuvent varier fortement d'un site à un autre, même s'ils sont très proches, à cause de changements locaux de l'environnement (topographie, obstacle comme par exemple une forêt). En conséquence il est extrêmement difficile la vitesse de vent locale par interpolations entre plusieurs stations météorologiques, d'autant plus que les stations sont souvent proches d'une ville et loin des forêts. Accéder à la vitesse de vent local est un problème majeur auquel nous avons été confrontés. Les plateaux calcaires à l'ouest de Nancy, ont subi des vents très forts, avec des vitesses maximales instantanées supérieures à 140 km/h. Il est par contre très probable que des sites ont bénéficié de conditions abritantes et d'autres d'une plus forte exposition au vent. Bock essaya de calculer la vitesse à une échelle plus fine grâce au modèle Mésos-NH de météo France (la résolution des modèles méso-échelle peut aller jusqu'à quelques kilomètres) mais sans succès. Même si les modèles physiques de vent se sont améliorés depuis (Dupont et Brunet, 2006), nous n'avons pas essayé de recalculer les vitesses de vent car cela représentait beaucoup de travail pour un résultat toujours incertain étant donné l'échelle à laquelle nous travaillons (Suarez et al., 2000). Comme Bock, nous avons considéré que les vitesses de vents étaient uniformément très fortes dans une première partie, et que les conclusions de l'étude ne s'appliquent qu'à ces conditions.

3.4.2.2. L'humidité du sol.

Plus un sol est humide et plus sa résistance mécanique diminue. Le mois de décembre 1999 avait été particulièrement pluvieux, aussi tous les sols étaient détrempés au moment de la tempête, expliquant la grande proportion de chablis en Lorraine. Il n'y a donc pas lieu de prendre en compte une éventuelle variabilité de ce facteur mais il faut rester conscient que le modèle ne s'appliquera que pour des sols très humides.

3.4.3. Le choix des arbres.

Après la tempête, Bock revint sur les placettes de l'étude de Badeau, afin de quantifier les dégâts. À part les placettes non retrouvées situées dans des parcelles largement rasées, pour lesquelles les arbres sont considérés comme chablis, tous les arbres des autres placettes firent l'objet d'une visite. Il nota l'état de l'arbre (intact, volis, chablis, penché ou défourché, c'est-à-dire qui ont subi des dégâts importants au niveau

des branches, notamment la casse d'un brin de fourche) et apprécia qualitativement le pourcentage de dégâts sur la placette et dans les environs. Il effectua aussi des mesures de plaque sol-racine (cf annexe 5) sur 222 chablis.

Bock ne portera son analyse que sur 78 des 99 placettes initiales afin de garder des conditions stationnelles sensiblement comparables entre placettes de futaie régulière et celles de taillis sous futaie. Sur les 784 arbres des 78 placettes mesurées en 1992, 656 sont retrouvés et 620 arbres correspondent à son jeu de données initiales (TSF : 297, FR :323). Il enlèvera en effet 36 arbres provenant de placettes de futaies régulières de faible hauteur moyenne (inférieure à 15 m en 1992) qui ne furent pas endommagées et qu'il considéra comme non sensible. Le nombre de volis (18 arbres) et autres types de dégâts (20 arbres) étant très faible par rapport aux chablis (319 arbres), Bock ne retiendra que 2 modalités, détruit (en confondant chablis, volis...) ou non.

J'ai choisi un jeu de données initiales légèrement différent. Etant donné la forte proportion de chablis, nous ne nous sommes finalement intéressés qu'à ce type de dégâts pour ajuster notre modèle. Contrairement à Bock, je ne voulais pas que les types de dégâts soient confondus car les mécanismes de casse ou de déracinement ne sont pas les mêmes, et pour cette raison, j'ai exclu tous les arbres volis ou défourchés ainsi que tous les arbres présumés chablis des parcelles rasées, afin d'exclure les quelques volis et arbres qui seraient restés debout.

Je n'ai pas non plus écarté les arbres de hauteur inférieure à 15 m conservant ainsi une gamme large de dimensions des arbres (cf annexe 6).

Enfin comme je voulais comparer mes résultats avec le modèle de Bock j'ai repris dans un premier temps sa sélection de stations. Après avoir créé un premier modèle (487 arbres), je l'ai testé sur le jeu de données élargies, c'est-à-dire toutes les stations de Badeau qui ont bénéficié d'un retour sur le terrain soit 98 sur 99 initiales (une des placettes est en régénération et toutes les mesures dendrométriques n'existent pas). Cet ajout de 146 arbres, très majoritairement de FR, était encourageant car les variables testées restaient très significatives. Ce déséquilibre stationnel est justifié par la prise en compte des profondeurs de sol dans le modèle hybride, car nous assumons qu'il s'agit de l'effet station le plus déterminant dans la stabilité du hêtre sur plateaux calcaires (Bock et al., 2002). Nous avons toutefois gardé un œil sur d'éventuels problèmes dus à ce déséquilibre tout au long de l'étude (cf annexe 6).

3.5. Construction du moment de flexion.

Le fait de ne pas bien connaître les mécanismes de chablis dans les forêts de hêtres nous poussent à effectuer de nombreuses hypothèses notamment sur la force de traînée, certaines vérifiables et d'autres pas.

Nous rappelons ici sa formule : $F_{\text{traînée}}(z) = \rho_{\text{air}} C_d A(z) V(z)^2$

- D'après la littérature, on suppose la densité de l'air constante le long de l'arbre et entre les arbres (Gardiner et al., 2000 ; Peltola et al., 1999).
- N'ayant aucune information sur la branchaison, il est très difficile d'évaluer la surface réelle de branches en prises au vent. La méthode employée est d'assimiler le contour de l'arbre à une forme géométrique. On assume alors que la surface réelle est proportionnelle à la surface « pleine », via un coefficient de porosité du houppier inclus dans le coefficient de traînée C_d . La forme géométrique couramment employée pour le hêtre et les feuillus à faible contrôle apical dans la modélisation de l'interception de la lumière (Pouderoux et al., 2001) consiste en une partie elliptique posée sur une partie triangulaire. Par contre la forme géométrique souvent retenue par les physiciens est une forme en « diamant » (Gardiner et al., 2000) ; 2 triangles posés l'un sur l'autre. Même sur les arbres feuillus, c'est la forme qui induit le moins de biais pour accéder à la force de traînée (Kane et al., 2007). Pour des grands hêtres cette forme est peut-être moins sensible à la reconfiguration des petites

branches du houppier. Pour satisfaire ces deux points de vue, on garde une liberté sur le houppier en introduisant un paramètre f de forme. Pour $f = 0$ le houppier est en diamant, pour $f=1$ le houppier est rectangulaire sur une base triangulaire et pour f intermédiaire, la base et le haut du houppier sont triangulaires, le centre étant rectangulaire. Pour $f = 0.57$, on retrouve la même aire qu'un houppier « ellipse sur triangle », expression plus facile à intégrer par la suite. Sans information additionnelle, on suppose dans un premier temps que la forme du houppier reste la même que l'arbre soit de futaie régulière ou de taillis sous futaie, seules les dimensions plus importantes des houppiers de taillis sous futaie permettant de les distinguer de ceux des futaies. Dans l'hypothèse où les différences de dimensions ne suffiraient pas à expliquer les différences entre TSF et futaie, l'ajustement statistique nous informera de la nécessité de revenir sur cette hypothèse.

- On considère le coefficient de traînée comme constant le long du houppier et entre les arbres par manque d'informations sur cette variable (hypothèse également faite par les modèles ForestGALES et HWIND).
- La vitesse de vent est la variable déterminante car c'est son carré qui joue dans la force de traînée. On ne connaît pas bien sa distribution le long de l'arbre, surtout dans une canopée sans feuille. Le profil de la vitesse moyenne de vent le long du houppier est pourtant bien connu dans le cas d'un arbre isolé (profil logarithmique) ou d'une canopée dense (profil en décroissance exponentielle) (Raupach et al., 1996). Quelques auteurs, (Poggy et al., 2003 et Dupont et Brunet, 2008) énoncent néanmoins que moins la canopée est dense et plus l'arbre dans le vent se comporterait comme s'il était isolé soit une décroissance moins rapide de la vitesse moyenne le long du houppier. La forme du profil de vitesse moyenne du vent que nous avons choisi veut tenir compte de ces remarques :

$$V(z) = V_{Htot} \times \left(\frac{z}{Htot} \right)^\alpha$$

La vitesse augmente avec une puissance α de z , jusqu'à la hauteur de la canopée où elle atteint une valeur standard V_{Htot} commune à toutes les canopées. α contrôle la décroissance plus ou moins forte à l'intérieur de la canopée. Au-dessus de la canopée, la vitesse moyenne croît lentement avec le logarithme de l'altitude. On considère donc qu'il n'y a pas de différence de vitesse moyenne significative entre une canopée située à 20 m de hauteur et une autre à 40 m. Comme, nous ne prenons pas en compte la différence d'altitude entre les forêts, qui elle varie de plus de 200 m, il serait impertinent de considérer des variations de 20 m. V_{Htot} est donc constant par rapport à la hauteur de la canopée, par contre V_{Htot} dépend fortement de sa position dans l'espace : les placettes ont subies des conditions différentes de vent. Dans un premier temps on considèrera que le vent était unanimement très fort partout puis nous tenterons de prendre en compte ce facteur vent dans la partie 4.3. Faute d'information, on ne considèrera pas par contre de variations entre arbres et entre sites du facteur de forme α . Les deux points précédents sont résumés sur la figure 2 ci-dessous.

Une autre hypothèse implicite a été faite, la contribution de la traînée induite par le tronc est négligée car la vitesse de vent y est faible, le bras de levier plus petit et la surface en prise au vent aussi.

Le moment de flexion à la base de la tige ($h=0$) s'écrit :

$$M_{flex}(z) = \rho_{air} C_d A(z) V(z)^2 \times z + P(z) \times x \quad \text{En N.m}$$

Par hypothèse sur la force de traînée,

$$M_{flex} = \rho_{air} C_d \left(\frac{V_{Htot}}{Htot} \right)^\alpha \int_{Hbh}^{Htot} A(z) z^{2\alpha+1} dz + \int_{Hbh}^{Htot} P(z) x dz$$

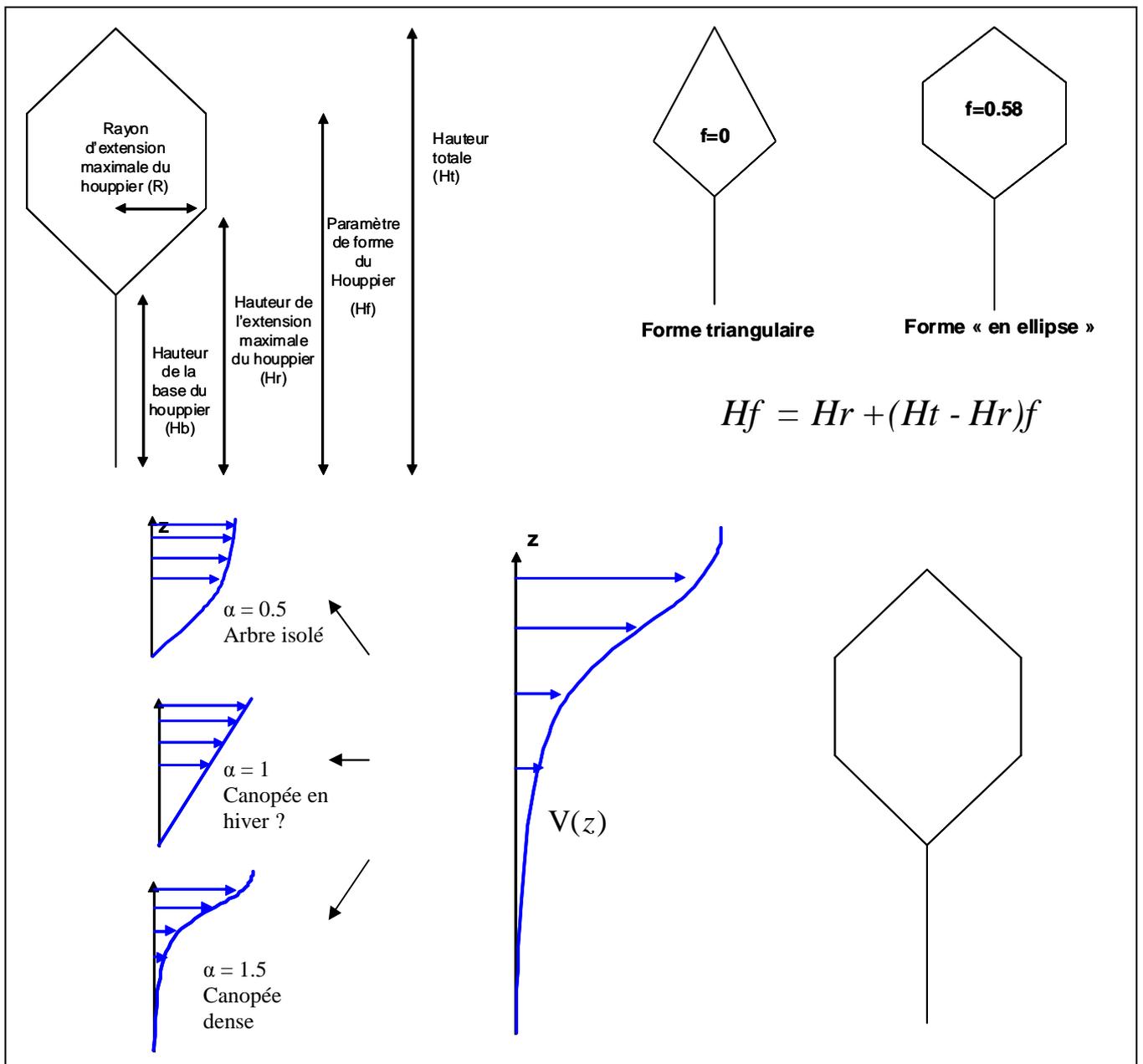


Fig2. Profil de vitesse de vent et forme des houppiers.

On va considérer comme Gardiner et al. (2000), pour ForestGALES que le moment dû au poids du houppier est proportionnel à celui de la force de traînée. La thèse de Patrick Langbour (1989), montre que cette simplification n'est pas rigoureuse, la formule liant les deux moments étant plus complexe. Toutefois l'erreur commise n'est pas importante, ce que confirment les résultats d'Ancelin et al. (2004), sur épicéa. De toute façon, la contribution finale du poids du houppier dans le moment totale est au maximum de 30% pour des tiges très fléchies, ce qui minimise la sensibilité de ce paramètre.

Le résultat de l'intégration donne :

$$M_{flex} = 2\rho_{air} C_d C_{Poids} V_{Htot}^2 \frac{RHf^2}{xy \left(1 - \frac{Hr}{Ht}\right) (1-f)} \left[1 - \left[\frac{Hr}{Ht} (1-f) + f \right]^y - \left[\left(\frac{Hr}{Ht} \right)^y - \left(\frac{Hb}{Ht} \right)^y \right] \frac{Ht - Hr}{Hr - Hb} (1-f) \right]$$

Avec $x = 2\alpha + 2$
 $y = 2\alpha + 3$

La formule du moment de flexion est complexe mais peut se simplifier facilement, on voit notamment qu'il semble très lié au rayon du houppier et au carré de la hauteur totale, qui représentent le dimensionnement de l'arbre, les autres termes constituant des paramètres de répartition du vent sur le houppier. Pour vérifier ceci, 6 régressions linéaires entre le moment de flexion et RH_{tot}^2 ont été effectuées pour 6 couples (f, α).

k(f, α)		α		
		0,5	1	1,5
f	0	0,25	0,18	0,13
	0,58	0,41	0,31	0,23

Tab1. Valeurs de k pour différents f et α .

L'effet dimensionnel sur la variabilité du moment est énorme puisque le coefficient de détermination r^2 est supérieur à 0.97 dans tous les couples (f, α). Les variations de dimensions des arbres (RH_{tot}^2) gouvernent le moment de flexion. Les rapports de dimensions H_b/H_t et H_r/H_t n'apportent pas grand chose.. La fonction k augmente avec f (prise au vent plus importante) et diminue avec α (décroissance plus rapide de la vitesse avec la distance à la canopée à cause d'une traînée plus forte et donc une quantité de vent reçue moindre). L'influence de ces deux paramètres est a priori forte (pour un même arbre passer du couple (f=0, α =1.5) à (f=0.58, α =0.5) augmente le moment de flexion par 3). Sans moyen d'estimer comment f et α varient entre arbres et sites, ils seront pour l'instant considérés constants, la qualité de l'ajustement statistique nous amènera à revoir cette hypothèse si besoin.

3.6. Construction du moment résistant critique de l'ancrage pour un arbre.

Une zone d'ombre entoure la résistance de l'ancrage : les processus y sont beaucoup plus complexes, la difficulté de mesure réelle... Ennos (1993) avait conceptualisé les différentes forces mises en jeu mais seulement de façon théorique. Plus récemment des progrès ont été réalisés grâce à des simulations numériques sur de vrais systèmes racinaires numérisés (Dupuy et al., 2007, Dupuis et Fourcaud, 2005). Ils ont notamment mis en lumière les différents mécanismes en présence liés à la résistance des racines (à la flexion-compression sous le vent, à la traction côté au vent), à celle du sol (résistance au cisaillement et à la traction lors de la création de la plaque sol-racine...) ainsi qu'à l'interaction des deux (transmissions des contraintes des racines vers le sol, poids de la plaque sol-racine...). Tous mettent en évidence un effet dimensionnel lié au volume du système racinaire.

Devant tant de complexité, Fraser et Gardiner, (1967), Ray et Nicoll, (1998) et Gardiner et al., (2000), ont préféré calibrer un moment résistant en fonction du poids de la tige, grâce à des expériences de déracinement. L'approche est cohérente pour la mécanique des structures qui caractérise de toutes façons expérimentalement le comportement du matériau, sans revenir à la modélisation des phénomènes fins aux échelles inférieures. Pour un sol donné, il y a une très bonne relation linéaire pour les résineux, qui peut s'interpréter comme le signe d'une bonne allométrie entre le volume du système racinaire et celui du système aérien.

Contrairement au moment de flexion où moyennant quelques hypothèses on a réussi à calculer une valeur conséquente d'un point de vue mécanique, les données disponibles pour le sol ne nous permettent pas d'en faire autant, au mieux de sélectionner et d'agencer quelques variables supposées importantes. Le terme

de moment résistant est donc un peu abusif. L'ancrage va dépendre de l'enracinement et des propriétés du sol. On peut résumer en 2 formules empiriques cette conception :

Enracinement d'ancrage = potentiel P(Diamètre, Hauteur) x réducteur R(Obstacle)

Moment résistant = enracinement d'ancrage x qualité du sol Q(texture, pierrosité...)

L'allométrie partie aérienne-partie racinaire correspond à un potentiel d'enracinement, plus l'arbre étant volumineux et plus son système racinaire doit être développé, soit en nombre de racines, soit en taille des racines plus conséquente (Ennos, 1993). Le travail d'Ennos est intéressant pour conceptualiser les rapports parties aériennes-parties racinaires, mais il ne prend en compte que des sols « parfaits » où il n'y a pas de contrainte à l'enracinement, ici nommé réducteur. Le réducteur est typiquement un obstacle (absolu ou relatif) à l'enracinement qui empêche l'arbre d'atteindre son potentiel de prospection en profondeur. Il faut ajouter à cela un facteur de qualité mécanique du sol pour vraiment apprécier le moment résistant.

3.6.1. Enracinement.

Bock n'avait utilisé qu'une variable édaphique dans son modèle, la profondeur d'apparition de l'horizon C, roche mère peu ou pas altérée, limite « absolue » à l'enracinement (Becker et al., 1980). C'est une variable logique car la dimension « profondeur » de l'enracinement est bien connue comme un facteur déterminant de l'ancrage. Les études statistiques mais aussi les études mécaniques démontrent l'importance de cette dimension devant les dimensions latérales. Ainsi sur pin maritime, Danjon et al., (2005) ne s'intéresse qu'à la partie proximale des racines latérales. Stokes et al., (1996) dans ses expériences de déracinements de systèmes racinaires idéalisés montre que les systèmes qui développent un enracinement dans la partie profonde du sol plutôt que dans celle superficielle, sont les plus résistants. Je disposais en plus d'autres profondeurs caractéristiques intéressantes.

- La profondeur d'enracinement totale (racine de structure et racine « fine », c'est-à-dire dont le diamètre < 2mm). Celle-ci correspond plus ou moins à la profondeur de l'horizon C, les racines pouvant prospecter quelques centimètres après l'apparition de l'horizon C.
- Sur plateaux calcaires, de fortes charges en éléments grossiers (que l'on appellera pierrosité) sont considérées comme un obstacle fort au développement racinaire (Lucot., 1994). J'ai donc créé une deuxième profondeur d'obstacle possible, le minimum de la profondeur de l'horizon C et de celle où la pierrosité dépassait 50%. Cette valeur est un peu arbitraire mais c'est sans conséquence car la limite sur les profils de sol était dans la plupart des cas bien nette, inférieure à 25 % dans les premiers horizons et augmentant brutalement à plus de 50 % dans les horizons profonds (généralement à l'apparition de l'horizon B/C). La prospection par les racines est d'ailleurs plus gênée quand la transition est brutale. C'est donc plus une profondeur de transition entre un horizon peu pierreux et un avec beaucoup d'éléments grossiers (EG).
- Cette profondeur de forte charge en éléments grossiers est proche de la profondeur de décarbonatation sur plateau calcaire (corrélation $r=0.84$), qui correspond à la profondeur à laquelle le calcaire apparaît. La pédogénèse sur plateau calcaire est très dépendante du processus de décarbonatation, c'est-à-dire de la disparition du calcaire à partir des horizons supérieurs, que ce soit par dissolution ou réaction chimique avec les nitrates ou des acides organiques (Becker et al., 1980).
- Une deuxième source d'obstacle à l'enracinement est constituée par les horizons engorgés (Lebourgeois et Jabiol, 2002). Il y en a très peu parmi les placettes inventoriées, mais j'ai tout de même créé une 3^{ème} variable profondeur d'obstacle, celle du minimum entre une forte pierrosité et des conditions d'hydromorphie fortes par rapport aux conditions hydromorphiques des autres placettes. C'est plus une variable de contrôle car même si ces conditions ne sont pas très fortes, le hêtre s'enracine mal dans les horizons engorgés.

Obstacle par Horizon C

Obstacle par une forte pierrosité

Obstacle par apparition du calcaire

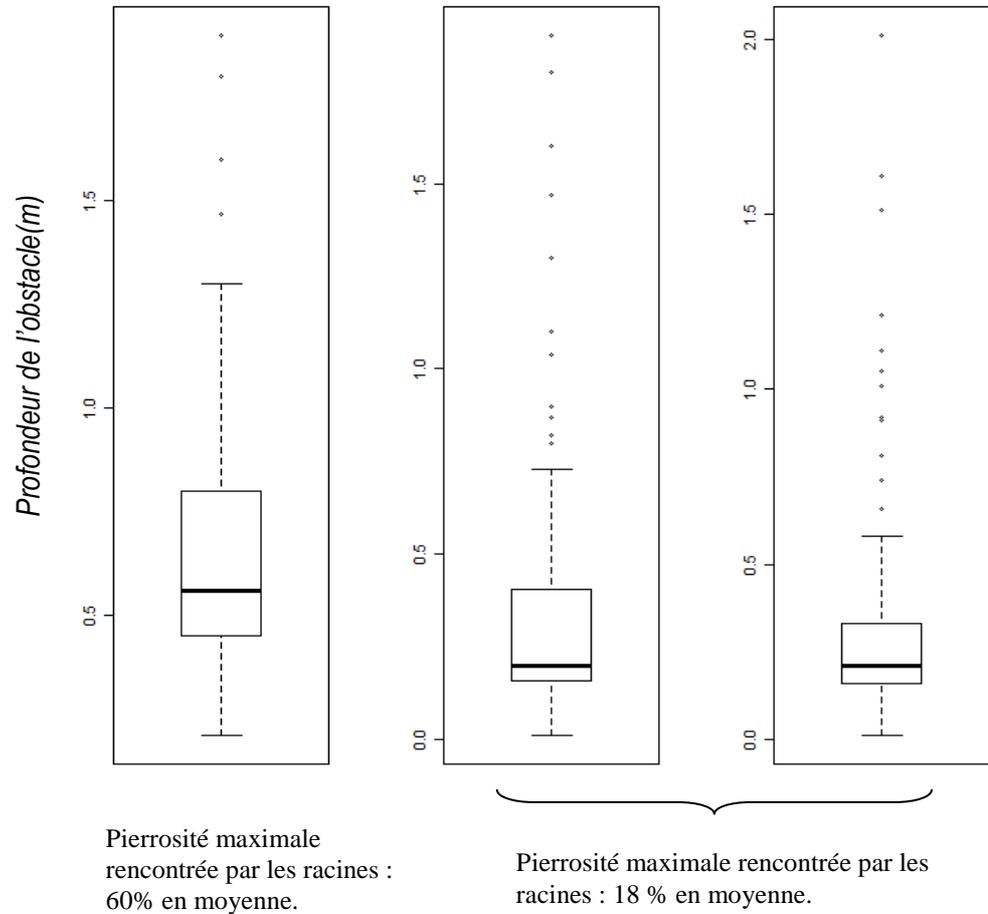


Fig3. Comparaison des différents obstacles.

Les obstacles dès la surface posent problème pour utiliser le logarithme et se voit donc attribuer une valeur minimale de 1cm, soit la valeur de l'erreur de mesure.

Nous évaluerons aussi l'effet « potentiel racinaire » en testant dans le modèle final l'impact de l'ajout du diamètre et de la hauteur par leur logarithme.

3.6.2. Qualité du sol.

Les propriétés mécaniques du sol dépendent de sa composition et également de son humidité. Les conclusions que nous tirerons de ce modèle ne vaudront que pour des sols humides, c'est-à-dire avec une résistance faible.

On aurait pu prendre en compte la composition du sol, c'est-à-dire la texture des horizons et leur pierrosité mais 2 problèmes se sont posés. D'une part il est difficile de synthétiser en quelques valeurs la composition d'un sol structuré en strate de composition bien différente. D'autre part, la texture, variable qualitative, est placette-dépendant, il y a donc un risque de confusion de facteur, notamment avec la position topographique qui influence à la fois la composition du sol et le régime de vent. S'intéresser à la qualité du sol nécessite donc beaucoup de temps pour un résultat difficilement interprétable.

En ajustant sur les dégâts le modèle statistique précédemment décrit, on va sélectionner le meilleur critère mécanique, en faisant varier les paramètres f et α pour le moment de flexion et en ce qui concerne le moment résistant, en testant les différentes variables présentées.

3.7. Outils statistiques.

L'analyse statistique a été réalisée sur la version 2.12 du logiciel gratuit R.

Pour juger de la qualité des différentes variables possibles, nous nous sommes appuyés sur deux indicateurs souvent utilisés pour juger de la qualité d'une régression logistique, l'AIC (Akaike information criterion) et la courbe ROC (Receiver operating classifier) (cf annexe 9).

L'utilisation des courbes ROC et de l'AUC (Area under curve) était quasiment optimale car la quantité d'arbres chablis et d'arbres intacts était identique (communication personnelle de V.Badeau) On aurait pu choisir le BIC (bayesian information criterion) à la place de l'AIC, une façon plus conservatrice de pénaliser le nombre de variables. La pénalisation est non pas égale à $2k$ (où k est le nombre de variables) mais à k fois le logarithme du nombre d'observations. Etant donné le peu de variables en jeu, il n'était pas très utile d'effectuer une forte pénalisation, et comme l'AIC est plus facile à utiliser sur le logiciel R, on a gardé cet indicateur.

Les courbes ROC et l'AUC sont plus pertinents pour juger de la qualité de modèle de type logistique, le but in fine étant de classer les arbres. On ne pourra pas par contre se passer de l'AIC pour travailler sur le modèle mixte 5 (cf partie 4.3).

Pendant mon stage, je disposais aussi des modèles statistiques de Bock comme modèle de référence. Il s'agit plus exactement d'une version légèrement modifiée de son travail ; Bock utilisait en effet des classes de profondeurs de l'horizon C (0-50 cm, 50-70 cm et supérieur à 70 cm).

Modèles de Jérôme Bock.

Il créa un premier modèle très empirique :

$$\log\left(\frac{P}{1-p}\right) = a + b\text{Horizon}C_{0-50cm} + c\text{Horizon}C_{50-70cm} + d\text{Horizon}C_{>70cm} + e\log(Ht) + f\frac{Ht}{D}$$

Puis un second avec plus de considérations mécaniques :

$$\log\left(\frac{P}{1-p}\right) = a + b\text{Horizon}C_{0-50cm} + c\text{Horizon}C_{50-70cm} + d\text{Horizon}C_{>70cm} + e \underbrace{\log\left(\log\left(Ht - \frac{\text{Longueur}_{\text{houppier}}}{2}\right)\right)}_{\text{Analogue à un moment de flexion}} \times \log(R)$$

4. Résultats et discussions

Après différents essais dont la discussion sera présentée plus loin, le meilleur modèle de risque individuel est donné par :

$$\log\left(\log\left(\frac{1}{1-p}\right)\right) = a + m \log\left(\frac{\text{Mflex}}{\text{Prof décarbonatation}}\right) + \varepsilon$$

Coefficients:

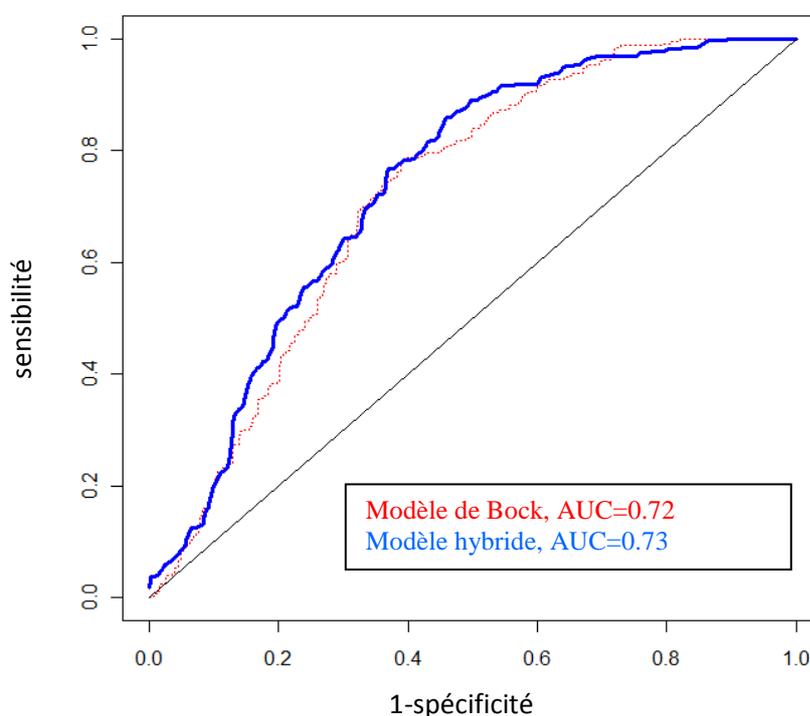
	Estimation	Ecart-type	p-value
a	-2.88858	0.38	<2e-14 ***
m	0.35216	0.05	<2e-12 ***

Le critère mécanique ainsi que l'ordonnée à l'origine sont très hautement significatifs et le signe de m est positif, ce qui est conforme au signe du module de Weibull. La valeur m est très faible, ce qui témoigne d'une grande disparité de défauts (le module de Weibull du bois est plutôt compris entre 4 et 10). Ce n'est pas surprenant dans le cas du composite sol-racine.

La recherche de points influents, par la distance de Cook, a mis en avant l'arbre 171, un arbre de futaie régulière de très grande taille (>35m) et sur un sol très peu profond, donc un arbre très sensible au chablis qui pourtant n'est pas tombé contrairement à tous les autres arbres de la placette. J'ai donc décidé de supprimer cet arbre qui a de l'influence sur la régression, en considérant qu'il est extrêmement sensible et qu'il aurait dû tomber mais qu'un événement que le modèle ne peut pas prendre en compte (vent très localement plus faible, soutien mécanique par d'autres arbres, etc) l'a maintenu sur pied.

La qualité du modèle est satisfaisante, l'AUC étant de 0.73, ce qui est très légèrement meilleur que le 2nd modèle de Jérôme Bock. Le modèle hybride est aussi plus parcimonieux que le modèle statistique de Bock car seuls 2 paramètres sont nécessaires contre 3 pour Bock.

Fig4. Courbes ROC des modèles.

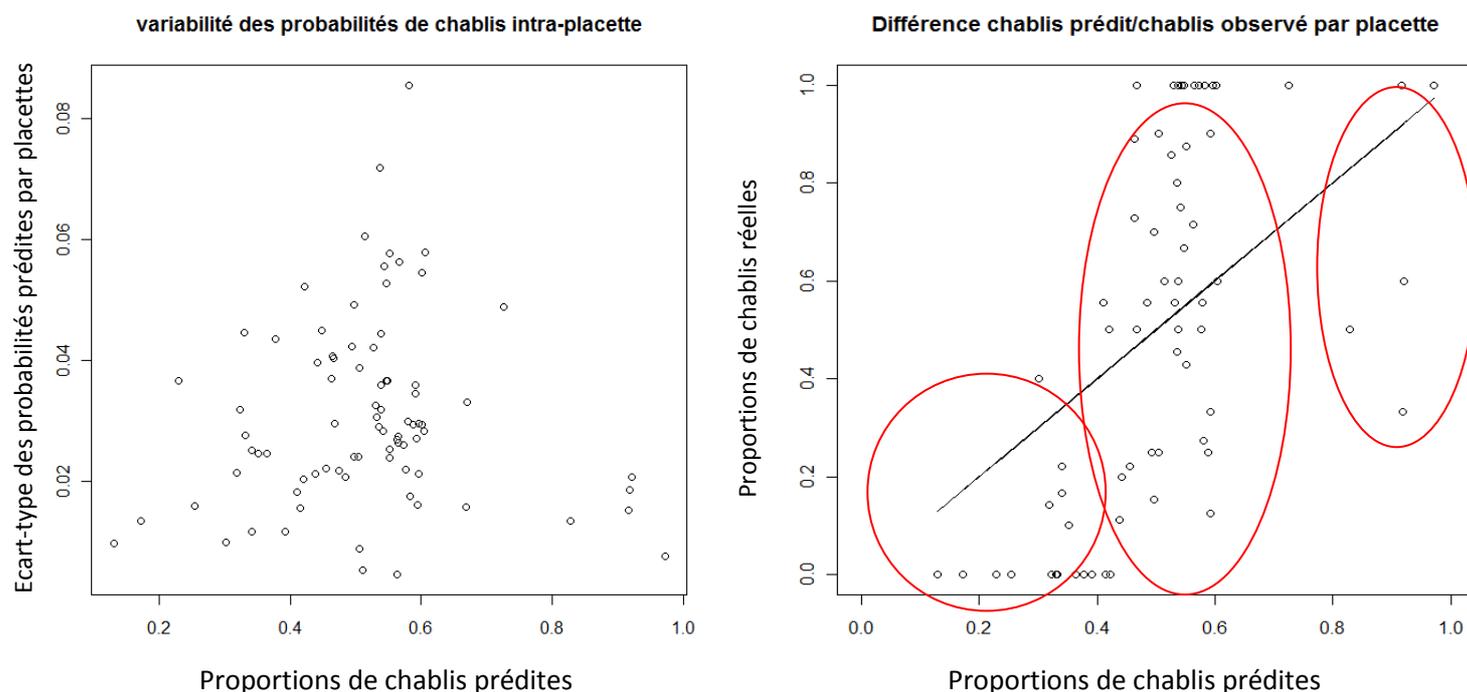


Un examen plus attentif de la courbe ROC montre que les prédictions sont meilleures pour les arbres peu susceptibles de tomber, alors que la prédiction pour les arbres « à risque » est beaucoup moins bonne. Pour aller plus loin, il est bon de s'intéresser aux prédictions et aux observations sur les placettes ayant un nombre suffisant d'arbres (au moins 5), soit 79 sur 98.

Tout d'abord le graphe de la variabilité de chablis intra-placette (voir ci-dessous, à gauche) montre une forme triangulaire : la variabilité intra-placette est maximum pour les probabilités de chablis compris entre 40 % et 60 %, c'est-à-dire au niveau du seuil de rupture, zone où le modèle est le plus « indécis ». Pour les probabilités extrêmes, la variabilité intra-placette est faible ; tous les arbres tombent ou restent debout. Le deuxième graphe (voir ci-dessous, à droite) confronte les prédictions aux observations. On peut dégager 3 groupes : les placettes prédites « à faible risque », les placettes prédites « à risque moyen » et les placettes prédites « à fort risque ». Les placettes à faible risque ont subi peu de dégâts : les prédictions sont assez bonnes. Dans la fourchette comprise entre 40% et 60% de probabilités, la différence prédit/réelle est la plus forte ce qui est logique car le modèle est plus indécis, à cause entre autre de la plus forte variabilité intra-placette. Les arbres de ces placettes, à la limite de la rupture pour le vent moyen de la tempête, sont sensibles

à des sur-expositions ou sous-expositions au vent qui pourraient entraîner des taux de dégâts bien éloignés de 50%. La prise en compte d'un effet placette devrait corriger ce type de problème.

Peu de placettes ont été prédites à fort risque et les prédictions sont bien souvent surestimées par rapport à la réalité, ce qui pourrait être dû à un effet placette également.



4.1 Faut-il prendre en considération des effets additionnels de forme ?

Les paramètres f et α du moment de flexion ont peu d'influence sur la régression, car on ne tient pas compte de variations entre arbre et sites (m est donc ajusté à l'identique quelque soit le couple f et α choisi)., Pour distinguer les arbres les uns des autres sur des critères de forme du houppier ou de profil de vent dans la canopée, il semble logique de choisir alors le régime sylvicole comme critère distinctif, les TSF ayant des canopées moins régulières, avec des arbres plus espacés, que les futaies et peut-être aussi des formes d'arbres différentes. L'ajustement statistique montre que l'ajout d'une variable indicatrice du traitement sylvicole n'est pas significatif, ce qui confirme les travaux de Jérôme Bock. Il n'y aurait donc pas un comportement différent du vent dans les FR et les TSF pas plus que des changements dans la forme du houppier qui amèneraient des risques différents à dimensions d'arbres et qualités de sol identiques.

4.2. Interprétations du moment résistant.

La meilleure variable d'obstacle est celle de la décarbonatation (AUC = 0.73), puis vient la profondeur de forte charge en éléments grossiers (AUC = 0.72) et la profondeur de l'horizon C (AUC = 0.70). Les résultats des mesures sur les 222 chablis mettent en lumière un détail intéressant. La profondeur de la plaque est environ 1.2 fois plus élevée que l'horizon C et 2.5 fois plus que l'apparition du calcaire. La profondeur de la plaque sol-racine est donc beaucoup plus liée à la profondeur de prospection racinaire qu'à celle de l'apparition de forte charge en éléments grossiers. Or la profondeur de l'horizon C n'est pas la meilleure variable d'obstacle, ce qui laisse penser que la variation du volume total de la plaque sol-racine n'a pas tant d'importance dans ce contexte de sol très peu profond alors que c'est un mécanisme pointé comme important dans beaucoup d'étude. Ceci ne veut pas dire qu'elle n'a pas d'importance, car la profondeur de l'horizon C a tout de même un effet très significatif. Simplement l'information délivrée par cette variable est

en grande partie contenue dans la variable profondeur de décarbonatation (corrélation assez forte entre ces différentes variables = 0.8). Par contre la variable profondeur de décarbonatation contient une information supplémentaire intéressante que l'on va tenter d'interpréter.

Cette profondeur caractéristique est très liée à celle de forte charge en cailloux ce qui a été confirmé par un test bilatéral de comparaison de moyenne avec un risque de première espèce de 5% et une corrélation entre les 2 variables de $r=0.8$.

Sur plateau (voir graphe ci-dessous, stations 3,4,5,6,7 profondeur de décarbonatation croissante), les 2 profondeurs sont similaires pour les stations 3,4,5, le mécanisme qui cause la gêne racinaire est très certainement la charge en éléments grossiers. Pour la 6 et la 7, où les profondeurs sont les plus importantes, on constate des différences : de forte charge en cailloux apparaissent avant le calcaire. Comment expliquer alors que la profondeur de forte charge en cailloux n'explique pas aussi bien la résistance des chablis ? Y a-t-il un changement de processus ? Une explication plausible est que sur les situations de plateau, la décarbonatation correspond très bien à la dissolution de la dalle calcaire, processus qui aboutit aux différentes charges en éléments grossiers, mais peut-être aussi à la forme des ces éléments, ainsi qu'à leur disposition. Or une disposition horizontale des pierres est beaucoup plus difficile à traverser pour les racines qu'une disposition verticalement. Pour de faibles profondeurs de décarbonatation, la nuance est faible, par contre pour les stations 6 et 7, ce n'est plus négligeable, les horizons superficiels même s'ils sont pierreux sont tout de même plus facilement prospectés.

La décarbonatation n'a par contre plus le même sens dans les stations de bas de pente et de fond de vallon (stations 16, 17, 18), car un phénomène supplémentaire vient s'ajouter à la dissolution du calcaire, l'apport de matériel qui peut être très chargé en EG en provenance des versants. La décarbonatation ne revêt plus alors du tout les idées de disposition et de forme des EG qu'elle avait sur plateau. Il vaut mieux alors utilisé directement la mesure de forte charge en éléments grossiers. Ce changement améliore le modèle puisque l'AUC passe à 0.74 ; on conserve cette profondeur d'obstacle par la suite.

Sur les stations de versant (9, 10, 14 et 15), on attache la même valeur à la profondeur de décarbonatation que sur plateau car il n'y a pas de remaniement profond du sol.

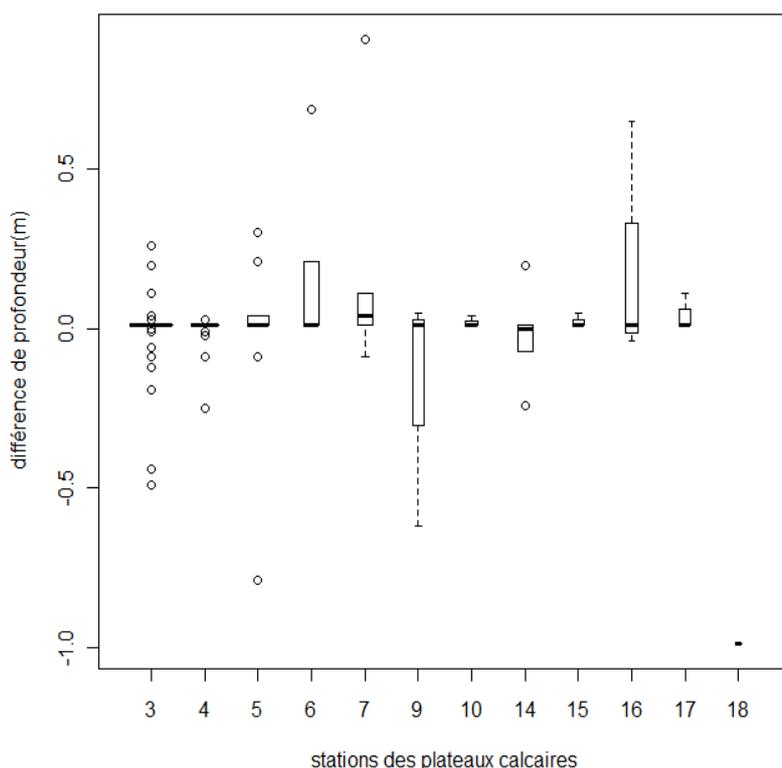


Fig5. Différence de profondeurs de sol entre apparitions du calcaire et apparition de forte charge en EG (La largeur de la boîte représente le nombre de placettes de chaque station).

Derrière cette variable « profondeur d'apparition du calcaire » se cache très certainement un frein relatif à l'enracinement comme on l'a supposé, plutôt que de meilleure propriété mécanique d'un sol sans caillou (si c'était le cas, le chêne qui développe sur plateau calcaire des racines plus profondes que le hêtre aurait dû tomber tout autant). L'idée la plus plausible est que l'arbre développe des racines « efficaces », avec des propriétés mécaniques plus élevées. Kodrik et al.,(2002) avait trouvé des résultats similaires lors de déracinement de hêtres en Slovaquie : les arbres qui avaient résisté à des vents violents étaient ceux qui possédaient proportionnellement plus de grosses racines (diamètre à mi-longueur > 3cm) dans les horizons profonds (supérieur à 50 cm). L'étude manque par contre d'information sur les conditions édaphiques ce qui est dommageable pour pousser les conclusions, notamment s'il existe un obstacle à l'enracinement dans les sols et quelles sont les interactions entre cet obstacle et l'enracinement. D'un point de vue mécanique, la résistance d'une racine en traction et en flexion augmente avec le carré et le cube de son diamètre, une grosse racine est donc beaucoup plus résistante à la casse (Ennos et al.1993)

Les racines « efficaces » seraient de grosses racines qui assurent un rôle important dans l'ancrage. Elles seraient par contre gênées dans leur prospection par la forte concentration de roches et ne peuvent pas plonger aussi profondément que les racines fines. Les racines fines joueraient le rôle d'une armature et permettraient la cohésion de la plaque jusqu'à l'horizon C, par contre les racines efficaces auraient un rôle déterminant plutôt dans la résistance aux efforts en traction et en flexion-compression. Si c'est le cas, ce mécanisme confirmerait que la ruine de l'ancrage est d'abord causée par la casse des racines et donc que le comportement général de l'ancrage est plutôt de type fragile. Cela constituerait également une justification théorique de l'utilisation des formules de Weibull dans le cas du risque chablis.

L'ajout brut du diamètre ou de la hauteur par leur logarithme n'apporte rien au modèle. Il n'y aurait pas d'effet potentiel racinaire, et l'effet réducteur par l'obstacle est donc déterminant. Cela confirme la dissociation connue productivité/stabilité du hêtre (Lebourgeois et Jabiol, 2002). *Fagus sylvatica* peut en effet assurer ses besoins en eau et minéraux (et suffisamment de soutien mécanique dans des conditions peu venteuses) sur des sols superficiels en compensant sa prospection en profondeur par un développement latéral des racines. Si allométrie il y a entre les dimensions aérienne et racinaire, elle porte alors sur la fonction d'absorption des racines plutôt que sur celle de la résistance de l'ancrage par grand vent. Il est alors possible de voir de très grands hêtres très vulnérables sur des sols très superficiels.

4.3. Un modèle mixte de sensibilité au vent du hêtre.

La comparaison par placette des chablis prédits et observés laisse penser qu'il existe un fort effet placette. Il est dû en grande partie à la vitesse de vent local qui n'a pas été prise en compte dans le modèle. L'ajout d'un effet aléatoire « placette » peut nous permettre de prendre en compte une vitesse de vent local, qui sera malheureusement confondue avec d'autres effets placettes-dépendant (sylviculture, conditions stationnelles...).

Il convient de placer l'effet aléatoire sur la partie constante du modèle, car elle comprend le carré de la vitesse du vent.

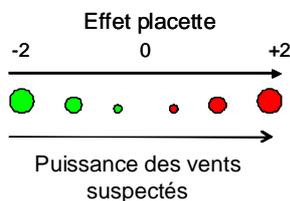
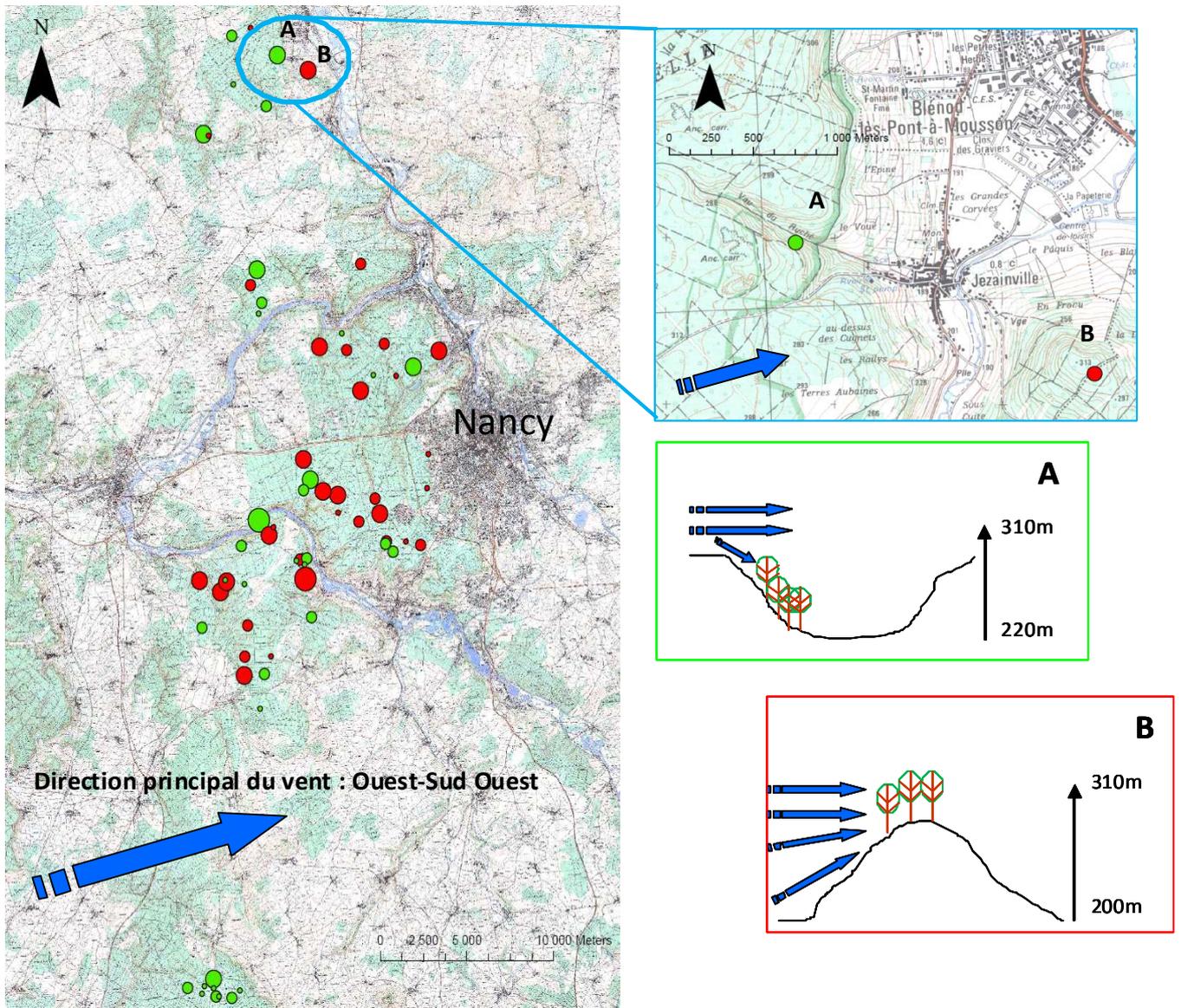
$$\log \left(\log \left(\frac{I}{I - pr} \right) \right) = a + m \log(\text{Critère mécanique}) + z \text{Placette} + \varepsilon$$

Nous avons testé ce modèle mixte grâce à la procédure lme4 du logiciel R. Le fait d'avoir un nombre hétérogène d'arbres (absence des volis, arbres penchés, martelés...) par placette ne pose pas de problème sous lme4, car la procédure effectue un calcul de vraisemblance qui n'est pas faussé par des problèmes d'hétérogénéité. Par contre l'estimation de l'effet aléatoire est peu précise pour les placettes avec peu d'arbres.

L'ajout d'un effet placette permet de diminuer l'AIC de 120 points par rapport à une déviance du modèle nul d'environ 890 ce qui représente une amélioration très significative de la qualité du modèle. L'erreur standard sur les estimations de l'effet placette aléatoire est de 1.16 d'où une très grande dispersion de l'effet aléatoire, qui peut conduire à des différences maximales de l'ordre de 0.6 entre la probabilité de chablis du modèle à effets fixes et celle du modèle mixte. Il y a donc de très fortes disparités d'un site à l'autre.

Nous avons représenté les effets aléatoires de chaque site sur une carte IGN pour voir s'il existe soit une structuration géographique des points, soit des explications topographiques. Notre hypothèse est que plus un site a un effet aléatoire fort et plus il a subi des vitesses de vent fortes.

Fig6. Structuration géographique et topographique de l'effet aléatoire placette reporté sur un fond de carte IGN.



Sous ces conditions, la région proche de Nancy a été la plus touchée, comparativement aux forêts du Nord (proche de Pont-à-Mousson) et du Sud (forêt domaniale de Saint-Amond). À l'intérieur de ces zones, il existe une grande hétérogénéité qui doit être plus liée à la topographie. Nous avons pris l'exemple de 2 sites proches avec une exposition au vent opposée dans la direction principale des vents de la tempête. La placette en haut de colline est très exposée au vent, qui est notamment accéléré sur les pentes (B) alors que la placette A est bien abritée du vent. Ce cas n'est pas isolé car l'examen qualitatif de l'ensemble des points sur la carte laisse penser que la topographie pourrait expliquer une partie de l'effet aléatoire. Pour valider cette idée, il faudrait créer un indice topographique d'exposition au vent dans la direction Ouest-Sud-Ouest, similaire à l'indice Topex utilisé dans ForestGales (Quine et al., 1998), et tester sa significativité.

Conclusions.

Ajouter plus de mécaniques dans un modèle empirique de stabilité au vent s'est révélé fructueux. Nous avons établi un modèle parcimonieux théoriquement fondé et proposé un critère mécanique efficace pour expliquer statistiquement les dégâts dans une situation complexe, critère relativement simple mais riche en informations. L'utilisation de variables habituellement utilisés en foresterie le rend aussi facilement utilisable en pratique. Plusieurs points importants sont à retenir :

- La relation statistique de Weibull pour modéliser la rupture de matériaux fragiles a pu être appliquée au cas du chablis de hêtre sur plateau calcaire, ce qui laisse penser que le comportement général de ce type de rupture pourrait être fragile. Cette formulation est très intéressante car elle est applicable à d'autres modes de casse, comme le volis et permet d'interpréter plus facilement le sens des paramètres, notamment celui associé au module de Weibull m , qui traduit la dispersion des défauts.
- La relation établie ne distingue pas les arbres de taillis sous futaie de ceux de futaies régulières. Les différences qui peuvent exister entre ces deux régimes sylvicoles, que ce soit en terme de forme des arbres ou de vitesses de vent régnant à l'intérieur de la canopée ne semblent pas significatives, une fois extraits les effets dimensionnels de premier ordre lié à la hauteur totale et à la largeur du houppier.
- L'ancrage racinaire efficace du hêtre sur plateau calcaire est limité par la profondeur de décarbonatation, très proche de celle d'apparition de forte charge en éléments grossiers. Il est certainement constitué par de grosses racines, plus résistantes aux efforts. Les racines plus fines assurent la cohésion de la plaque sol-racine jusqu'à la roche mère peu altérée ce qui contribue dans une moindre mesure à la résistance au renversement.
- Ajouter un effet aléatoire placette améliore beaucoup la qualité du modèle. Celui-ci intègre certainement une combinaison de facteurs, sylvicoles, édaphiques mais surtout météorologiques. Les conditions de vent sur le site sont les seuls paramètres déterminants dans le chargement de l'arbre n'ayant pas été pris en compte. La validation de cette idée passe par la construction d'indices topographiques, qui prennent en compte la direction des vents de la tempête. Les modèles complexes de l'écoulement turbulent à l'échelle des paysages tels que ceux développés à l'INRA de Bordeaux pourront alors apporter des idées théoriques pour justifier ou améliorer ces indices.

Ces résultats sont suffisamment encourageants pour continuer à inclure des processus mécaniques dans les modèles empiriques. La méthode employée peut servir de base à d'autres études de stabilité des arbres au vent. Il faut en effet tester la validité d'un modèle hybride non seulement sur des échantillons similaires mais extérieur au jeu de données pour la calibration afin de tester leur robustesse, mais surtout dans des contextes différents. En l'absence de modélisation mécaniste de l'ancrage, il serait tout particulièrement intéressant de tester l'adaptabilité du modèle à d'autres situations : hêtre dans d'autres

conditions (sol moins humide, casse des perches après détourage), pin maritime avec ou sans alios, chêne, etc.

Un tel modèle validé et étendu permettra de discuter de :

- la résistance d'essences différentes ou de traitements sylvicoles différents avec des perspectives d'amélioration sylvicoles.
- l'effet de la qualité du sol, notamment des sols gelés ou non humides.
- le mode de casse privilégié d'un arbre qui doit évoluer avec l'âge du fait des relations allométriques entre système aérien et racinaire.

D'une manière générale et dans une perspective future, mieux comprendre les mécanismes de résistance au vent, c'est aussi mieux comprendre l'acclimatation (processus physiologiques) et l'adaptation (processus génétiques) des arbres au vent. Ces phénomènes naturels pourraient en effet être un levier très intéressant pour la sylviculture afin d'améliorer à l'avenir la résistance des nos forêts.

Bibliographie.

- Ancelin, P., B. Courbaud, et T. Fourcaud. 2004. Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands. *Forest ecology and management* 203, no. 1-3: 101-121.
- Badeau, V. and M. Becker (1995). "Etude dendroécologique du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) sur les plateaux calcaires de Lorraine. Influence de la gestion sylvicole."
- Becker, M., F. Le Tacon, et al. (1980). "Les plateaux calcaires de Lorraine." Types de stations et potentialités forestières, ENGREF, Nancy.
- Blennow, K. and O. Sallnas (2004). "WINDA--a system of models for assessing the probability of wind damage to forest stands within a landscape." *Ecological Modelling* 175(1): 87-99.
- Bock, J., P. Duplat, J. P. Renaud, et I. Vinkler. 2002. Influence des paramètres sylvicoles et stationnels sur l'intensité des dégâts provoqués par la tempête du 26 décembre 1999 dans les hêtraies du quart nord-est de la France. Dans *Rapport de l'étude conduite en application de la convention de recherche ECOFOR/ONF "Effet des caractéristiques dendrométriques des hêtraies du quart Nord-Est sur le niveau des dégâts"*(ECOFOR n 2000-39), Nancy, Fontainebleau.
- Charmet, J. C. (2007). "Mécanique du solide et des matériaux: élasticité-plasticité-rupture." Industrial Physics and Chemistry Higher Educational Institution (ESPCI) Teaching.
- Danjon, F., T. Fourcaud, et al. (2005). "Root architecture and wind firmness of mature *Pinus pinaster*." *New Phytologist* 168(2): 387-400.
- Dean, T.J. and Long, J.N. (1986). "Validity of constant-stress and elastic-instability principles of stem formation in *Pinus contorta* and *Trifolium pratense*." *Annals of Botany* 58(6): 833
- de Langre, E. (2008). "Effects of wind on plants." *Annu. Rev. Fluid Mech.* 40: 141-168.
- Della-Marta, P. M. and J. G. Pinto (2009). "Statistical uncertainty of changes in winter storms over the North Atlantic and Europe in an ensemble of transient climate simulations." *Geophysical Research Letters* 36(14): L14703.
- Dupont, S. et Brunet, Y. (2006). "Simulation of turbulent flow in an urban forested park damaged by a windstorm." *Boundary-layer meteorology* 120(1) : 133-161
- Dupont, S. and Y. Brunet (2008). "Influence of foliar density profile on canopy flow: a large-eddy simulation study." *Agricultural and Forest Meteorology* 148(6-7): 976-990.
- Dupuy, L., T. Fourcaud, et al. (2007). "A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage." *Eco-and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability*: 175-189.
- Dupuy, L. X., T. Fourcaud, et al. (2007). "A generic 3D finite element model of tree anchorage integrating soil mechanics and real root system architecture." *American Journal of Botany* 94(9): 1506.
- Ennos, A. R. (1993). "The scaling of root anchorage." *Journal of Theoretical Biology* 161(1): 61-75.
- Ennos, A. R. (2000). "The mechanics of root anchorage." *Advances in Botanical Research* 33: 133-157.
- Fournier-Djimbi, M., and B. Chanson. (1999). "Biomechanics of trees and wood for hazardous tree assessment", pp 197-208. In Lemattre, M., P. Lemattre, and F. Lemaire (Eds.). *Proceedings of an International Symposium on Urban Tree Health*, Paris, 22-26, September 1997. *Acta Horticulturae* 496.

- Fraser, A. I. and J. B. H. Gardiner (1967). "Rooting and stability in Sitka spruce." *For. Comm. Bull*: 331-4.
- Gardiner, B., K. Byrne, S. Hale, K. Kamimura, S. J. Mitchell, H. Peltola, et J. C. Ruel. (2008). "A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests. *Forestry*. »
- Gardiner, Barry, Heli Peltola, et Seppo Kellomäki. (2000). « Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees." *Ecological Modelling* 129, no. 1 (Mai 3): 1-23. DOI: 10.1016/S0304-3800(00)00220-9.
- Gardiner, B., Stacey, G., Belcher, R. et Wood, C. (1997). "Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree stability." *Forestry* 70(3): 233-252.
- Hallett, P. D. and T. A. Newson (2005). "Describing soil crack formation using elastic-plastic fracture mechanics." *European journal of soil science* 56(1): 31-38.
- Hanewinkel, M., S. Hummel, et al. (2011). "Assessing natural hazards in forestry for risk management: a review." *European Journal of Forest Research*: 1-23.
- James, K. R., N. Haritos, et al. (2006). "Mechanical stability of trees under dynamic loads." *American Journal of Botany* 93(10): 1522.
- Kane, B. K. B., M. P. M. Pavlis, et al. (2008). "Crown reconfiguration and trunk stress in deciduous trees." *Canadian Journal of Forest Research* 38(6): 1275-1289.
- Kodrik, J. and M. Kodrik (2002). "Root biomass of beech as a factor influencing the wind tree stability." *J. For. Sci* 48(12): 549-564.
- Langbour, P. (1989). *Rigidité de l'arbre sur pied, indicateur de l'élasticité longitudinale du bois: Application aux peupliers.*
- Lebourgeois, F. and B. Jabiol (2002). "Enracinements comparés des chênes (sessile et pédonculé) et du hêtre sur différents matériaux. Réflexions sur l'autécologie des essences." *Rev. For. Fr* 54: 17-42.
- Lucot, E. (1994). "Rôle de la fissuration des roches et de la pierrosité des sols sur la prospection racinaire et l'alimentation hydrique: application au fonctionnement des écosystèmes forestiers." PhD Diss., Univ. Besançon.
- Moore, J. R. and D. A. Maguire (2004). "Natural sway frequencies and damping ratios of trees: concepts, review and synthesis of previous studies." *Trees-Structure and Function* 18(2): 195-203.
- Morgan, J. and M. G. R. Cannell (1994). "Shape of tree stems—a re-examination of the uniform stress hypothesis." *Tree physiology* 14(1): 49.
- Nepveu G., 1994. Variabilité, dans *Le Bois Matériau d'Ingénierie*. Pub. ARBOLOR. pages 127-182.
- Niklas, K. and Spatz, H. (2000). "Wind-induced stresses in cherry trees: evidence against the hypothesis of constant stress levels." *Trees* 14: 230-237.
- Peltola, H., S. Kellomäki, H. Väisänen, et V. P. Ikonen. 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, no. 6: 647-661.
- Peltola, H. M. 2006. Mechanical stability of trees under static loads. *American Journal of Botany* 93, no. 10: 1501.
- Poggi, D., G. G. Katul, et al. (2004). "A note on the contribution of dispersive fluxes to momentum transfer within canopies." *Boundary-Layer Meteorology* 111(3): 615-621.

- Pouderoux, S., C. Deleuze, et al. (2001). "Analyse du rendement des houppiers dans un essai d'éclaircie de hêtre grâce à un modèle à base écophysiological." *Annals of forest science* 58(3): 261-275.
- Quine, C. P. and I. M. S. White (1998). "The potential of distance-limited topex in the prediction of site windiness." *Forestry* 71(4): 325.
- Raupach, M. R., J. J. Finnigan, et al. (1996). "Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing-layer analogy." *Boundary-Layer Meteorology* 78(3): 351-382.
- Ray, D. and B. C. Nicoll (1998). "The effect of soil water-table depth on root-plate development and stability of Sitka spruce." *Forestry* 71(2): 169.
- Rudnicki, M., S. J. Mitchell, et al. (2004). "Wind tunnel measurements of crown streamlining and drag relationships for three conifer species." *Canadian Journal of Forest Research* 34(3): 666-676.
- Schelhaas, M. J., G. J. Nabuurs, et al. (2003). "Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries." *Global Change Biology* 9(11): 1620-1633.
- Schelhaas, M. J., K. Kramer, H. Peltola, D. C. van der Werf, et S. M. J. Wijdeven. 2007. Introducing tree interactions in wind damage simulation. *Ecological Modelling* 207, no. 2-4: 197-209.
- Schütz, J. P., M. Götz, W. Schmid, et D. Mandallaz. 2006. Vulnerability of spruce (*Picea abies*) and beech (*Fagus sylvatica*) forest stands to storms and consequences for silviculture. *European Journal of Forest Research* 125, no. 3: 291-302.
- Sellier, D. et Fourcaud, T. 2009. "Crown structure and wood properties: Influence on tree sway and response to high winds." *American Journal of Botany* 96(5) : 885
- Stokes, A., J. Ball, et al. (1996). "An experimental investigation of the resistance of model root systems to uprooting." *Annals of botany* 78(4): 415.
- Suárez, J. C., B. A. Gardiner, et al. (1999). "A comparison of three methods for predicting wind speeds in complex forested terrain." *Meteorological Applications* 6(04): 329-342.
- Valinger, E. and J. Fridman (1997). "Modelling probability of snow and wind damage in Scots pine stands using tree characteristics." *Forest Ecology and Management* 97(3): 215-222
- Valinger, E. and J. Fridman (2011). "Factors affecting the probability of windthrow at stand level as a result of Gudrun winter storm in southern Sweden." *Forest Ecology and Management*.
- West, P. W., D. R. Jackett, et al. (1989). "Stresses in, and the shape of, tree stems in forest monoculture*." *Journal of theoretical biology* 140(3): 327-343.

Annexes

Annexe 1

Déformation ε d'un solide engendrée par une contrainte σ p31

Annexe 2

Le modèle de Weibull..... p32

Annexe 3

Mécanique des poutres..... p33

Annexe 4

Principales mesures réalisées par Vincent Badeau (1995) p34

Annexe 5

Description des mesures réalisées sur les chablis..... p35

Annexe 6

Comparaison des dimensions des arbres de
Taillis sous futaie et de futaie régulière..... p36

Annexe 7

Comparaison des conditions stationnelles entre arbres
de Taillis sous futaie et de futaie régulière..... p37

Annexe 8

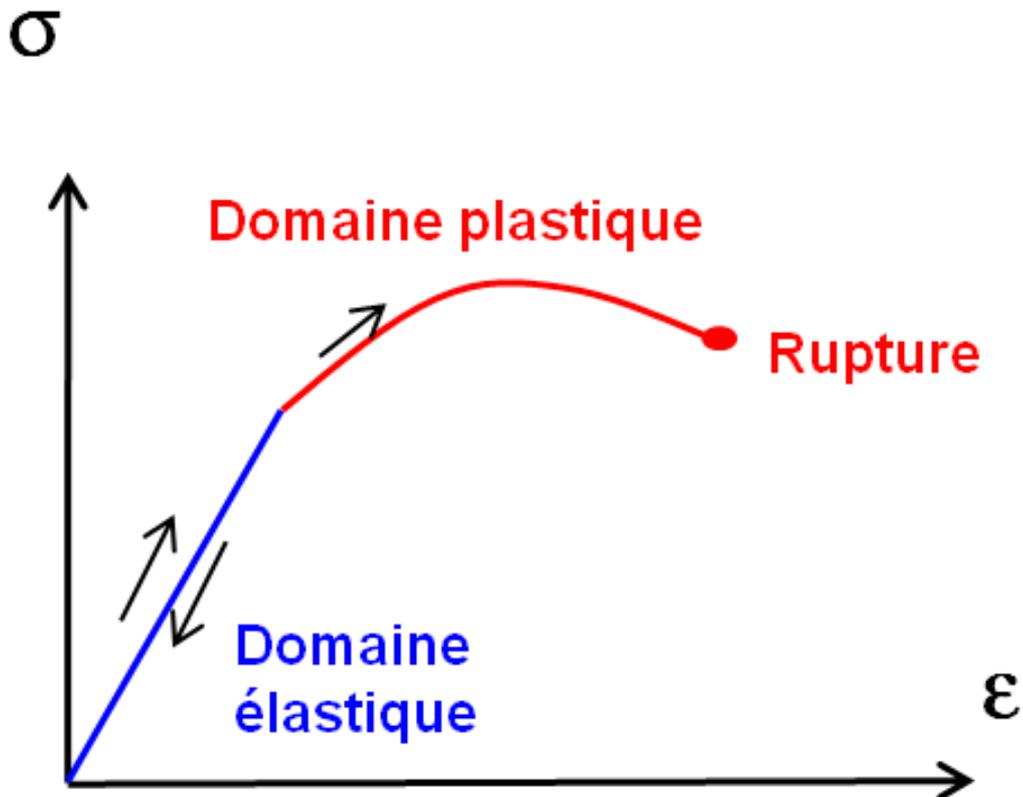
Déformations du sol ayant lieu lors du renversement d'un arbre..... p38

Annexe 9

Outils d'analyse de la qualité d'un modèle de type logistique..... p39

Annexe 1

Déformation ε d'un solide engendrée par une contrainte σ (MPa)(Cours de J.C Charmet, 2007).



La contrainte est analogue à la pression, c'est une force par unité de surface. La contrainte engendre des déformations d'un solide qui sont d'abord élastiques, c'est-à-dire réversibles (double flèche) et proportionnelles à la contrainte :

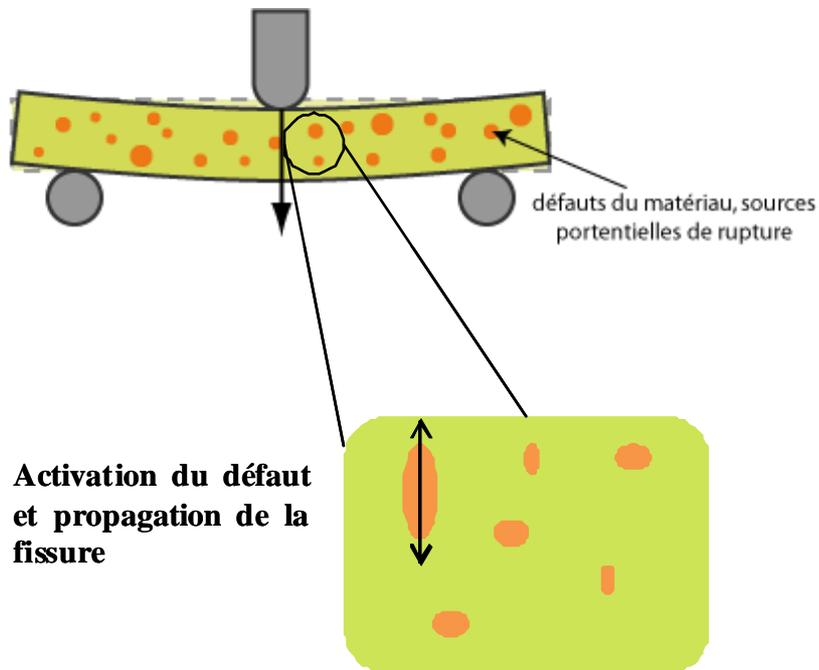
$$\sigma = E \times \varepsilon$$

E est le module d'élasticité ou module d'Young (MPa).

Les déformations sont par contre irréversibles une fois le stade plastique atteint et si la contrainte est prolongée, le matériau va rompre. La rupture ductile est propre aux matériaux très plastiques, qui sont capables de se déformer beaucoup avant de rompre ; un exemple typique est celui du plastique. La rupture fragile concerne les matériaux avec une faible plasticité : une fois rentrée dans le domaine plastique la capacité de déformation avant que n'arrive la rupture est faible. Le verre, par exemple, a un mode fragile de rupture. Une petite précision linguistique, un matériau fragile ne signifie pas qu'il casse facilement, car il peut résister à de très fortes contraintes avant d'arriver dans le domaine plastique. Par contre, à niveau de contrainte de rupture égal, la quantité d'énergie nécessaire pour rompre un matériau fragile est beaucoup plus faible que pour un matériau ductile

Annexe 2

Le modèle de Weibull (d'après le cours du site internet de l'ENS Cachan, Rupture des matériaux et théorie de Weibull, http://www.si.ens-cachan.fr/accueil_V2.php?page=affiche_ressource&id=108).



Exemple de répartition des défauts pour un matériau de module de Weibull élevé.

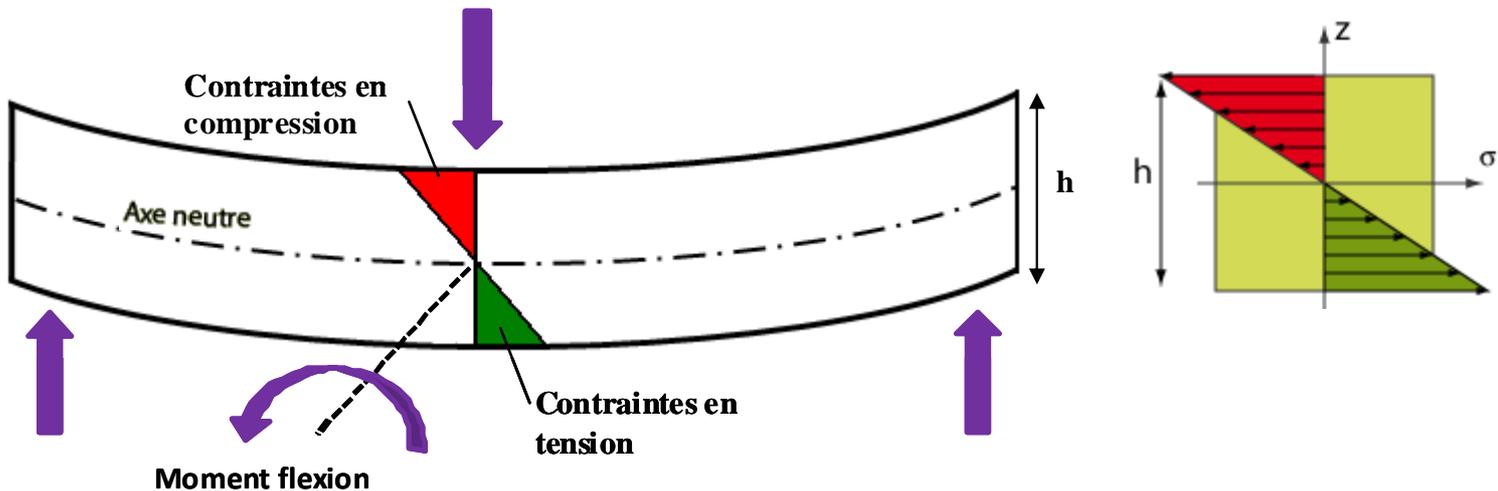


Exemple de répartition des défauts pour un matériau de module de Weibull faible.

Annexe 3

Mécanique des poutres (Cours de J.C Charmet, 2007).

1) Flexion d'une poutre, et répartition des contraintes normales (σ) dans une section normale de la poutre. La contrainte est nulle au niveau de l'axe neutre et maximale à la périphérie.



2) Second moment d'inertie d'une section circulaire et rectangulaire. Caractérise la résistance à la déformation par rapport à la géométrie de la section pour un axe donné



3) Calcul de la contrainte critique avant rupture d'une poutre circulaire.

À l'intérieur de la poutre, la contrainte est distribuée selon la formule suivante :

$$\sigma = \frac{M_{flex} \times \text{distance à l'axe neutre}}{\text{Second Moment d'inertie}}$$

On cherche la contrainte maximale, qui se trouve au centre de la poutre (maximum du moment de flexion) au niveau de la périphérie (distance à l'axe neutre = $D/2$)

$$\sigma_{max} = \frac{64M_{flex} \times D}{2\pi D^4} = \frac{32M_{flex}}{\pi D^3}$$

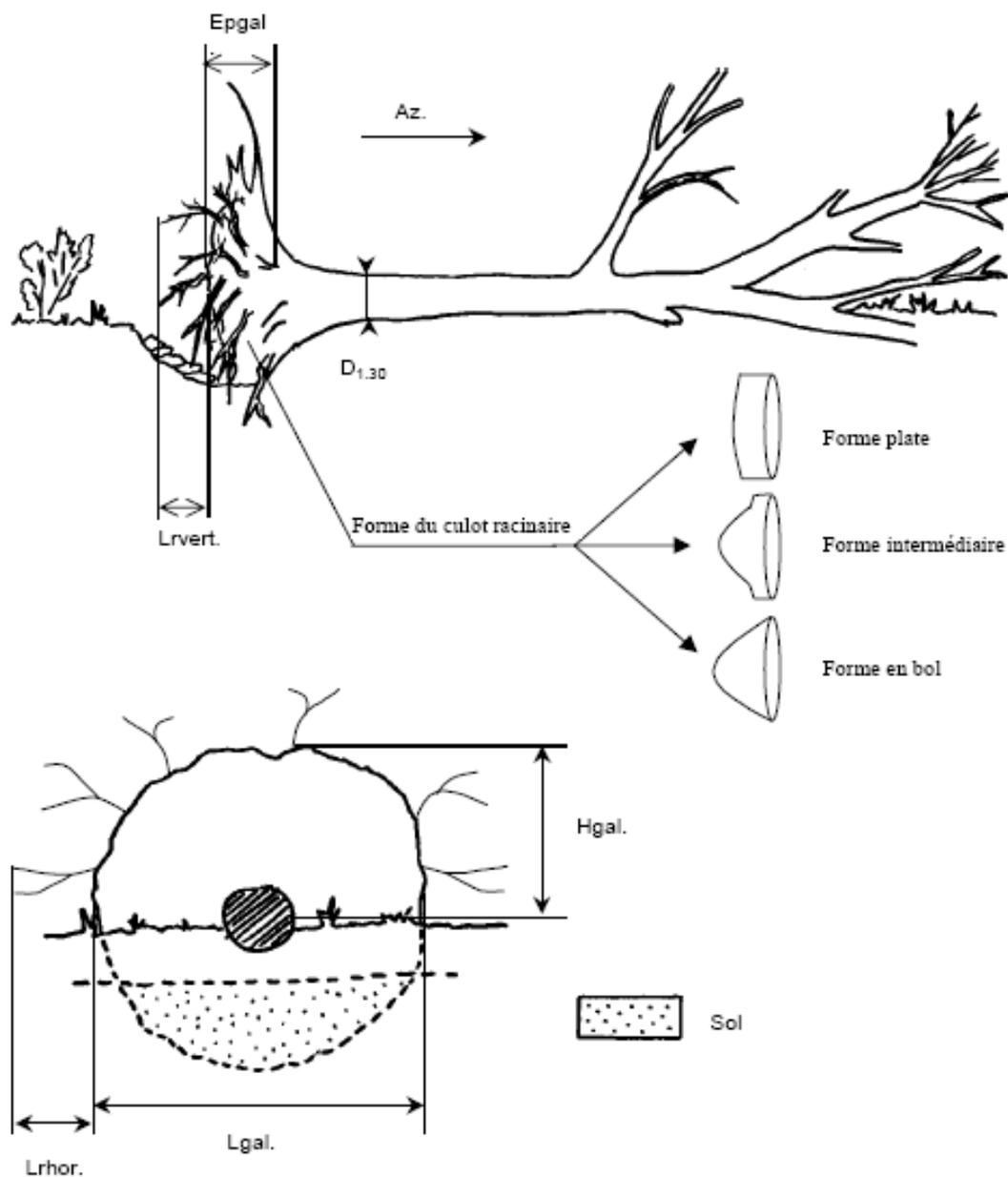
Annexe 4

Principales mesures réalisées par Vincent Badeau (1995).

mesures dendrométriques	Méthode
âge	carrotage à cœur avec une tarière de Presler
circonférence à 1,30m	mètre ruban
hauteur totale	dendromètre Blum-Leiss
hauteur de l'extension maximale du houppier	
hauteur de la base du houppier	
projections du houppier	2 diamètres perpendiculaires, le premier correspondant à l'élongation maximale du houppier
mesures stationnelles	
mesures stationnelles	Méthode
coordonnées géographiques de la placette	système de projection lambert 2
profondeur de chaque horizon	ouverture d'une fosse pédologique au centre de la placette et sondage à la tarière pour détecter une éventuelle hétérogénéité de la profondeur de sol facilement exploitable par les racines. Fosse ouverte jusqu'à la roche mère peu ou pas altérée ou jusqu'à ce que l'enracinement des arbres ne soit plus perceptible
texture et structure de chaque horizon	
pourcentage et nature des éléments grossiers de chaque horizon	
taille et densité des racines dans chaque horizon	
type de transition entre chaque horizon	
pourcentage, taille et couleur des taches d'oxydoréduction dues à des phénomènes hydromorphiques	

Annexe 5

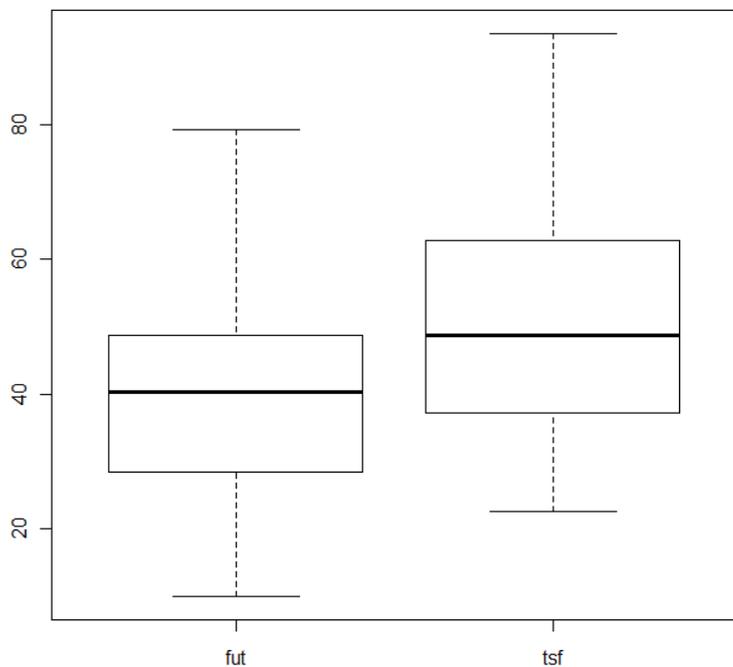
Description des mesures réalisées sur les chablis (dessins in Lemarchand, 2000).



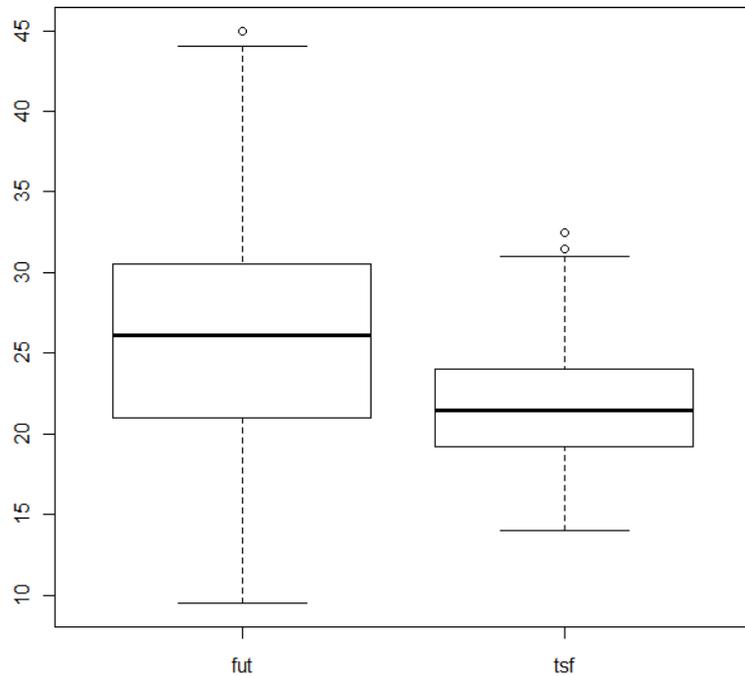
- Az. : Azimut de chute.
 D_{1.30} : Diamètre à 1.30m.
 Epgal. : Epaisseur de galette.
 Hgal. : Hauteur de galette (rayon supérieur de la galette).
 Lgal. : Longueur de galette.
 Lrhor. : Longueur de racines horizontales.
 Lrvert. : Longueur de racines verticales.

Annexe 6

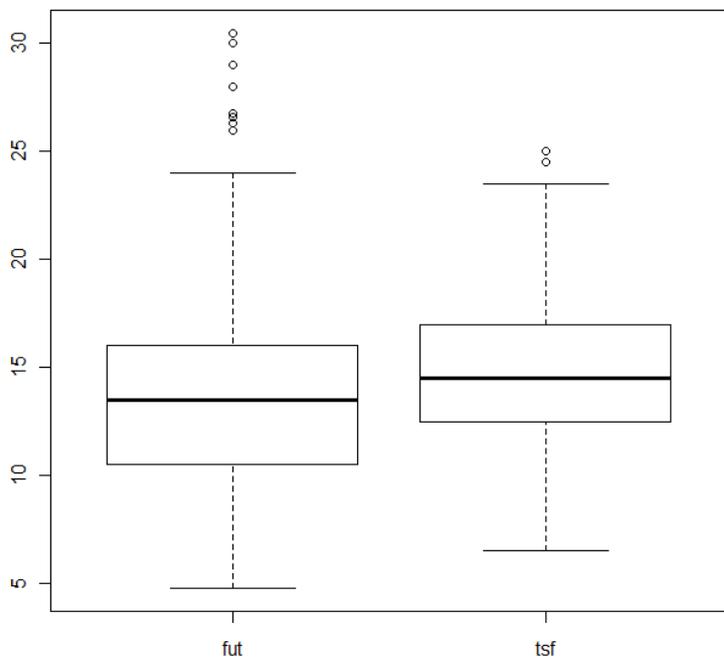
Comparaison des dimensions des arbres de Taillis sous futaie et de futaie régulière.



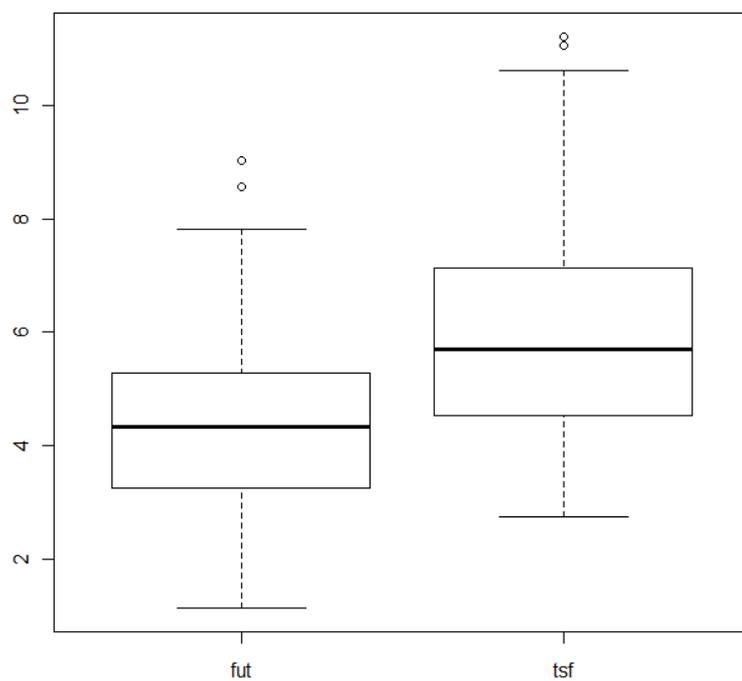
Diamètre à 1.3m (cm)



Hauteur totale (m)



Longueur du houppier (m)



Rayon du houppier (m) issu d'une projection au sol.

Annexe 7

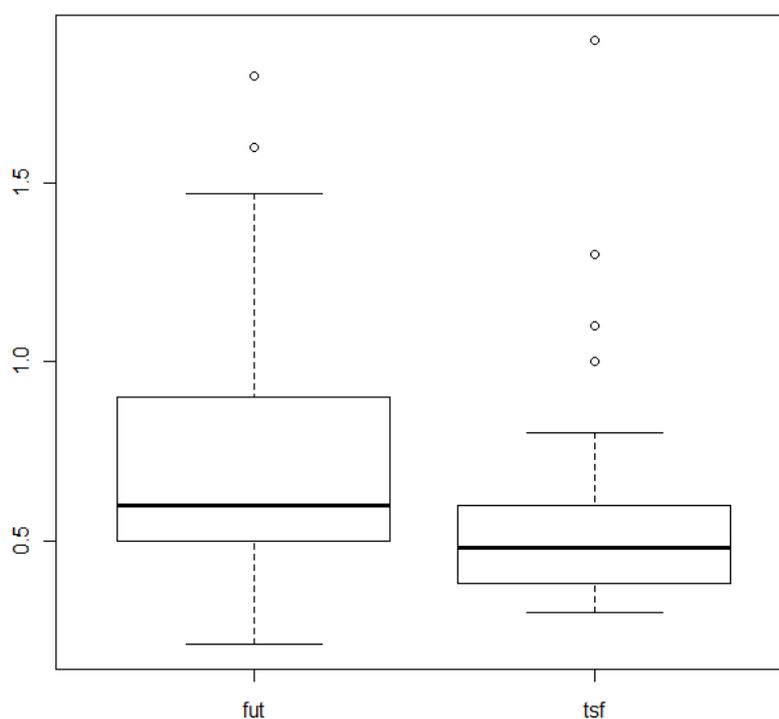
Comparaison des conditions stationnelles entre arbres de Taillis sous futaie et de futaie régulière.

Situations topographiques

	bas de pente et fond de vallon	plateau	versant sud	versant nord	versant est et ouest	versants	total
TSF	0	31	2	1	3	1	38
FR	7	46	2	3	0	2	60

Types de sols

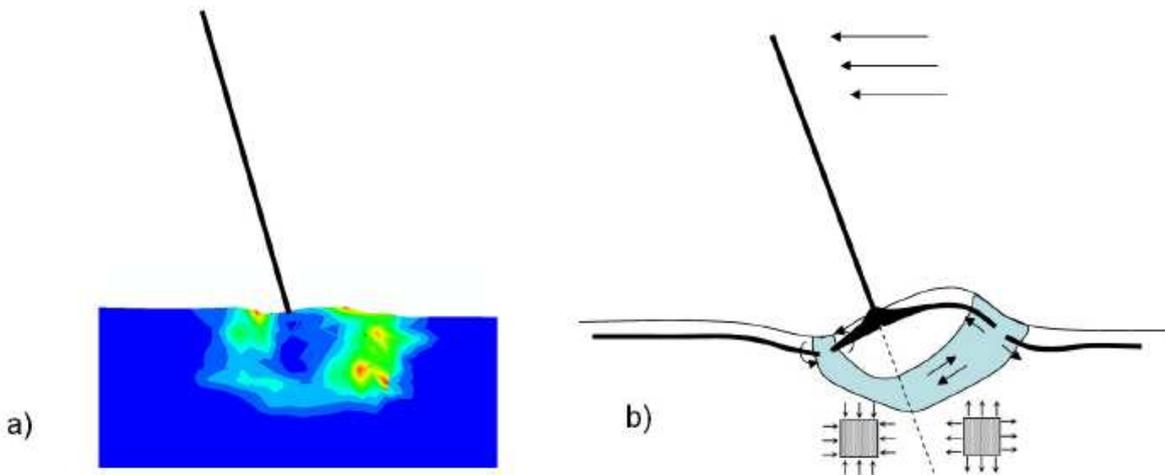
	brun calcaire colluvial	Brun calcique	Brun eutrophe	brun eutrophe colluvial	Brun lessivé à lessivé	Lessivé	Rendzine brunifiée	Rendzine et rendzine brunifiée	variable	total
TSF	0	5	2	0	0	1	23	3	4	38
FR	3	12	8	1	5	4	17	4	6	60



Profondeur d'apparition de l'horizon C (m)

Annexe 8

Déformations du sol ayant lieu lors du renversement d'un arbre (Dupuy et Fourcaud et al., 2007).



a) Résultat d'une simulation par éléments finis du mécanisme de déracinement sur pin maritime. Le gradient de couleur du bleu au rouge traduit l'intensité des dommages. Les zones jaunes et rouges indiquent les endroits du sol où les dommages sont les plus importants (déformations plastiques).

b) Interprétation biomécanique simplifiée qui s'en déduit. La zone de rupture i.e. plus faible résistance, prend la forme d'une bande (zone bleutée) où divers mécanismes prennent place. Sous le vent, les particules de sol sont comprimées (cf. figuré gris) et résistent mieux au cisaillement et donc la rupture a lieu près du tronc là où les racines sont rigides et se cassent en flexion. Dans le vent, le sol est en détente (cf. figuré gris) et les zones de rupture ont lieu à plus grande distance du tronc, là où les racines sont plus flexibles et cassent en traction (Schéma et simulation : L. Dupuy, T. Fourcaud, A. Stokes*).

Annexe 9

Outils d'analyse de la qualité d'un modèle de type logistique.

(d'après le cours sur la régression logistique multiple de Pierre-Louis Gonzalez disponible sur le site http://maths.cnam.fr/IMG/pdf/Regression_logistique_multiple.pdf)

Les paramètres ROC mesurent la performance des classifieurs binaires, c'est-à-dire leur capacité à catégoriser des entités en deux groupes distincts (arbres chablis ou pas) sur la base d'une ou plusieurs de leurs caractéristiques. Graphiquement, on utilise souvent la courbe ROC qui donne le taux de classifications correctes dans un groupe (dit taux de vrais positifs ou sensibilité) en fonction du nombre de classifications incorrectes (taux de faux positifs ou 1-spécificité) pour ce même groupe. La courbe du modèle parfait passe alors par le point (0,1), alors qu'un modèle qui discriminerait au hasard passerait par la droite sensibilité=1-spécificité.

L'AUC (« area under curve ») résume en un paramètre la qualité de la courbe ROC, car il correspond à l'aire sous la courbe ROC. Un modèle parfait a un AUC de 1, alors qu'un très mauvais modèle aura un AUC proche de 0.5. Entre 0.7 et 0.8, le modèle est correct.

L'AIC est une mesure de la bonne adéquation d'un modèle statistique. Il consiste à pénaliser la déviance du modèle (égale à $-2 \log(\text{Vraisemblance})$) par le nombre k de paramètres utilisés pour le créer :

$$AIC = 2k - 2 \log(\text{Vraisemblance})$$

En effet la mesure de déviance seule ne suffit pas car elle ne peut que s'améliorer si l'on ajoute des paramètres supplémentaires. L'AIC permet de choisir des modèles plus parcimonieux, l'ajout d'un paramètre supplémentaire n'étant vraiment intéressant que s'il fait baisser l'AIC de 2 points (Bock et al.,). La comparaison de l'AIC de 2 modèles n'a de sens que s'ils possèdent le même nombre de données.

Résumé.

Les vents forts représentent la première source de dommages pour les forêts européennes. Pointer les facteurs à risque passe par la modélisation de la stabilité au vent, ce que nous avons entrepris pour les futaies régulières et taillis sous futaie de hêtres des plateaux calcaires lorrains. Etant donné la forte proportion de chablis dans notre jeu de données, seul ce type de dégâts a été pris en compte. Nous avons réalisé un modèle empirique original de stabilité au vent car davantage fondé sur des considérations mécaniques que les modèles statistiques usuels. La mise au point d'une relation linéaire élaborée à partir du modèle de rupture fragile de Weibull et d'un critère mécanique empirique a permis d'obtenir un modèle parcimonieux et relativement efficace qui n'utilise que des variables courantes en foresterie.

Les facteurs majeurs de stabilité au renversement sont le produit du diamètre du houppier par la hauteur totale de l'arbre au carré et la profondeur de sol sans roches calcaires. Aucun régime sylvicole ne peut être considéré comme plus stable a priori.

L'ajout final d'un effet aléatoire placette a nettement augmenté la qualité du modèle. Une grande partie de la variabilité inter-placette doit être liée aux conditions de vent différentes d'une placette à l'autre. Améliorer cette donnée est délicat mais permettrait peut-être de mettre en avant des facteurs de second ordre comme la sylviculture.

Summary.

Most of the damages in European forest are done by gales and strong winds. To find out risk factors needs models of wind firmness. We have realised one for the high forests and the coppice with standards from the Lorraine limestone plateau. Since the high rate of windthrow between the damaged trees, only this kind of damages has been taken into account. Our empirical windthrow model was more based on mechanical ideas than current statistical models, which make it original. The creation of a linear relation inspired from Weibull's model of brittle fracture and of a mechanically based criterion has led to a parsimonious and efficient model, which only needs variables commonly used in forestry.

The main windfirm factors are the product of the crown diameter by the square of the total tree height and the soil depth where limestone appears. Any type of silviculture seems to be more windfirm a priori.

The use of a random site effect has largely increased the model quality. Most of the between-site variability may result from the storm site windiness. Improving this data is difficult but could highlight less important factor like silviculture.