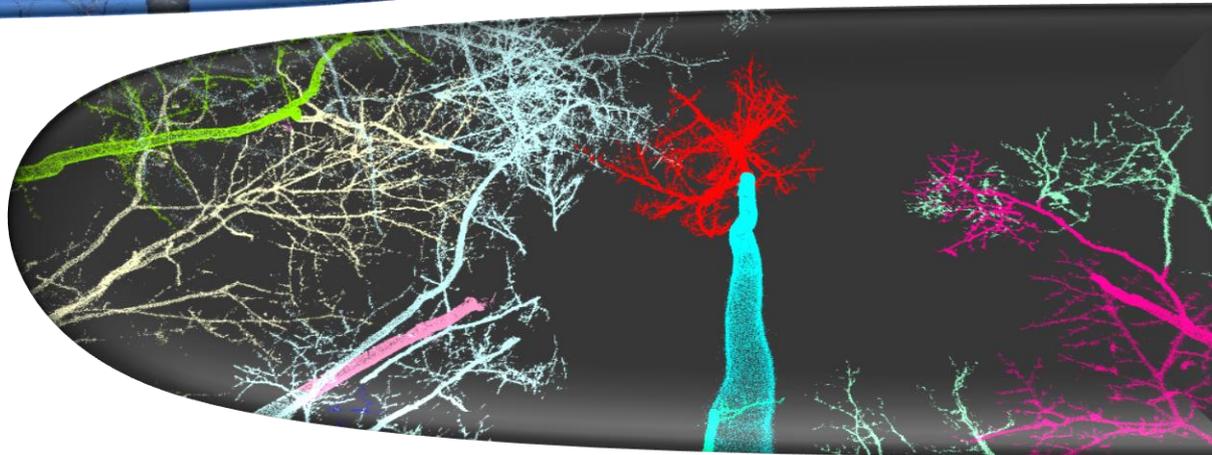


Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur Agroparistech

Comportement du hêtre au vent suite à une éclaircie : Déformation et réponse de croissance



Dominante d'approfondissement

Ressources forestières et filière bois

Marin Chaumet

François Ningre Ingénieur de recherche INRA

Mérim Fournier enseignant chercheur Agroparistech

Yves Ehrhart enseignant chercheur Agroparistech

INRA LERFoB Rue d'Amance 54280 Champenoux

Année 2014 / 2015

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVE AgroParisTech

Formation des ingénieurs forestiers d' <u>AgroParisTech</u> -	TRAVAUX D'ÉLÈVES
TITRE : Comportement du hêtre au vent suite à une éclaircie : Déformation et réponse de croissance	Mots clés : Hêtre, vent, sylviculture, déformation, croissance, Lidar
AUTEUR(S) : Marin Chaumet	Promotion : 187
Caractéristiques : 1 <u>volume-s</u> ; 59 pages ; 33 figures ; 14 annexes ; 0 cartes ; bibliographie.	

CADRE DU TRAVAIL

ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT : INRA Lerfob

Nom du responsable : François Ningre
Fonction : ingénieur de recherche

Nom du correspondant AgroParisTech : Yves Ehrhart

Option D. d'approfondissement CEI	<input type="checkbox"/>	Stage 2A Stage fin d'études Date de remise : 12/10/2015	<input type="checkbox"/>	Autre <input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	
	<input type="checkbox"/>			

SUITE À DONNER (réservé à la Direction des études)

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

Remerciements

Je tiens à remercier toute l'équipe du LERFoB et d'Agroparistech pour le bon déroulement du stage, et plus particulièrement François Ningre, Thiery Constant et Vivien Bonnesoeur sans qui Vent Eclair n'aurait certainement jamais vu le jour. Mais aussi Mériem Fournier en tant que coordinatrice du projet ANR Forwind qui a permis le financement du matériel. Je remercie également Frédéric Bordat, Florian Vast et Loïc Dailly pour la réalisation de l'éclaircie et le haubanage des arbres. Sans oublier Etienne Farre pour son assistance dans la partie électronique mais aussi dans le suivi du dispositif ainsi que Ruben Manso et Cyrille Rathgeber pour l'aide apportée dans mes réflexions statistiques.

Table des matières

Résumé.....	6
Summary	6
Avant-propos	7
1. Contexte et objectifs.....	8
1.1 La stabilité des forêts, un enjeu d'actualité.....	8
1.2 Les modèles à l'échelle de l'arbre et du paysage sont complémentaires	8
1.3 Les arbres perçoivent le vent et s'acclimatent	9
1.4 Vent Eclair, Un dispositif pour étudier l'acclimatation des arbres au vent à la suite d'une éclaircie.....	10
2. Matériels et méthodes.....	11
2.1 Le site	11
2.1.1 Le peuplement.....	11
2.1.2 Conditions stationnelles	11
2.1.3 Les traitements expérimentaux.....	12
2.2 L'échantillon.....	13
2.1 Mise en place du dispositif.....	15
2.1.1 L'éclaircie :.....	15
2.1.2 Le haubanage :.....	16
2.2 Matériels utilisés pour le suivi du dispositif	16
2.2.1 LIDAR terrestre	16
2.2.2 Les dendromètres.....	17
2.2.3 Les capteurs de déformations et V-link.....	17
2.2.4 Les bases WSDA	17
2.2.5 La station météo	18
2.3 Démarche et traitement des données.....	18
2.3.1 Les scans LIDAR	18
2.3.2 Les mesures de vent	22
2.3.3 Les données de déformation	22
2.3.4 Les données de croissance	23
3. Résultats.....	25
3.1 L'éclaircie augmente les déformations perçues par l'arbre	25
3.2 Le vent stimule la croissance en diamètre.....	27
3.2.1 Croissance en fin de période.....	27
3.2.2 Vitesse de croissance	29

4. Discussion des résultats	33
4.1 Déformations	33
4.1 Croissance et vitesse de croissance	35
4.2 Acclimatation des arbres au vent	38
Conclusion	39
Bibliographie	40
Annexes	44

Table des annexes

Annexe 1: Protocole des placettes	45
Annexe 2 : Carte du dispositif	46
Annexe 3 Analyse de sensibilité du volume du houppier sur les 10% supérieur du houppier.....	47
Annexe 4 Analyse de sensibilité du volume du houppier sur les 50% supérieur du houppier.....	48
Annexe 5 Analyse de sensibilité sur la taille des voxels sur les 10% supérieur du houppier	49
Annexe 6 Analyse de sensibilité sur la taille des voxels sur les 50% supérieur du houppier	50
Annexe 7 Déformations et prédictions pour les arbres éclaircis	52
Annexe 8 Déformations et prédictions pour les arbres Non éclaircis	53
Annexe 9 Déformations et prédictions pour les arbres éclaircis intermédiaire	54
Annexe 10 Estimation de la moyenne de la vitesse de croissance et de l'intervalle de confiance à 95% associé	55
Annexe 11 Modèle de la vitesse de croissance sur la période d'étude	56
Annexe 12 Modèle de la vitesse de croissance sur la première période	57
Annexe 13 Modèle de la vitesse de croissance sur la deuxième période	58
Annexe 14 Modèle de la vitesse de croissance sur la troisième période	59

Table des tableaux

Tableau 1 Vents mensuels à Nancy, source : infoclimat.fr	11
Tableau 2 Traitements réalisés	12
Tableau 3 Estimations des paramètres du modèle de déformation	26
<i>Tableau 4 Estimations des paramètres du modèle de l'accroissement en surface terrière</i>	27
Tableau 5 Estimations des paramètres du modèle de vitesse de croissance.....	30
Tableau 6 Estimations des paramètres du modèle de vitesse de croissance sur la première période.....	31
Tableau 7 Estimations des paramètres du modèle de vitesse de croissance sur la deuxième période.....	31
Tableau 8 Estimations des paramètres du modèle de vitesse de croissance sur la troisième période	32

Table des illustrations

Figure 1 Situation Forêt de Haye, source : google.maps maps.....	11
Figure 2 Direction des vents à Nancy, source : windfinder.com.....	11
Figure 3 Diagramme ombrothermique Nancy, source : Wikipédia	11
Figure 4 Perche non éclaircie et haubanée.....	12
Figure 5 Perche non éclaircie libre.....	12
Figure 6 Perche éclaircie libre	12
Figure 7 Perche éclaircie et haubanée	12
Figure 8 Caractéristiques de l'échantillon pour chaque traitement expérimental.....	14
Figure 9 Perche détournée 4m	15
Figure 10 Perche détournée 2m	15
Figure 11 Perche non éclaircie	15
Figure 12 perche témoins non détournée	15
Figure 13 Haubanage d'un arbre	16
Figure 14 Acquisition d'une scène au LIDAR Terrestre	16
Figure 15 Capteurs de déformation	17
Figure 16 Vlink, source : microstrain.com.....	17
Figure 17 Base WSDA 1500 LXRS, source : microstrain.com	17
Figure 18 Mât	18
Figure 19 Scans LIDAR en vue planaire sur Faro Scene.....	18
Figure 20 Projections de houppier pas = épaisseur = 10cm	19
Figure 21 Différentes étapes du processus d'isolement d'une perche.....	19
Figure 22 Profil de la surface du houppier (couleurs aléatoires).....	20
Figure 23 Profil cumulé (du haut du houppier vers le bas) du volume du houppier (couleurs aléatoires).....	20
Figure 24 Voxelisation et projection (taille = 50cm)	21
Figure 25 Projections des voxels avec différentes tailles	21
Figure 26 Fréquence des vents mesurée à 15m	22
Figure 27 Prédiction de l'effet fixe du modèle de déformations	26
Figure 28 Accroissement en surface terrière en fin de période d'étude	27
Figure 29 illustration des différents effets observés	28
Figure 30 Vitesse de croissance sur la période étudiée.....	29
Figure 31 Observations et prédictions du modèle de vitesse de croissance pour chaque arbre.....	30
Figure 32 Caractéristique du vent et de l'arbre.....	33
Figure 33 Accroissement en diamètre cumulé sur la période d'étude.....	35

Résumé

Le vent est un facteur écologique souvent omis des forestiers du point de vue de la croissance des peuplements. Il y a pourtant des preuves évidentes que le vent, à travers les stimulations biomécaniques qu'il induit, impacte les relations allométriques entre les différents organes des arbres. Le dispositif Vent Eclair permet d'étudier en détail les interactions existantes entre sylviculture et force de traînée des arbres. L'éclaircie, effectuée dans un perchis de Hêtre (*Fagus sylvatica* L.), augmente les déformations perçues par l'arbre. Les arbres non éclaircis présentent des déformations réduites de 30 % comparés aux arbres éclaircis et donc totalement libre de mouvement. Le haubannage de certains arbres a permis de quantifier l'effet des stimulations biomécaniques sur la croissance en diamètre des arbres. Le haubannage réduit rapidement et considérablement la croissance des arbres non éclaircis et éclaircis. Le vent est donc responsable d'une part importante de la croissance observée. Pour l'arbre moyen de l'échantillon, cette part s'élève à 43 % de la réaction de croissance observée suite à l'éclaircie mais n'est pas liée à l'augmentation de la prise au vent. L'analyse plus approfondie de la vitesse de croissance le long de la période d'étude révèle en fait que l'effet des stimulations biomécanique intervient seulement en situation de stress (forte concurrence, sécheresse) mais reste relativement important. Ces résultats impliquent d'être prudent quant à l'étude inter-sites ou inter annuelles de la croissance mais aussi lors de l'utilisation des tables de production et de cubages.

Summary

When they consider forest growth, foresters often omit the wind as an ecological factor. There are evidences that wind impacts allometrical relations between the different parts of the trees. The forest experimentation Vent Eclair is designed to explore interactions between silviculture and the trees swaying induced by the wind in a pole-size beech (*Fagus sylvatica* L.) stand. Thinning increases tree swaying. Un-thinned trees biomechanical stimulations are 30% lower than thinned trees which can freely move. Guying trees permit to quantify the biomechanical stimulations effect on trees diameter growth. Guyed trees, quickly and strongly, reduce their diameter growth for both thinned and un-thinned trees. These findings led to establish the wind as a key factor on the observed growth. For the average tree of the plot, this part reached 43% of the growth reaction observed after thinning but this result is not caused by the increasing sway. Detailed analysis on growth rates along the study period reveal that the effect of biomechanical stimulations is only visible under stress conditions (competition, drought) but remain relatively important. This results imply to take precautions in inter-annual or inter-site growth study but also in the use of yields or volumes tables.

Avant-propos

Le présent rapport clôt 3 années d'apprentissage effectuées au LERFoB. Il présente les travaux réalisés au cours de la dernière période en entreprise équivalent au stage classique de la formation d'ingénieur. Le sujet s'intègre à la thématique de la dominante d'approfondissement de 3^e année « Ressources Forestières et Filière bois » puisqu'il repose sur l'observation d'un phénomène pouvant influencer directement la croissance des arbres et permet d'apporter des pistes de réflexion quant aux interactions entre vent et sylviculture.

1. Contexte et objectifs

1.1 La stabilité des forêts, un enjeu d'actualité

La fréquence des tempêtes risque d'augmenter avec le changement climatique (Pryor et *al.* 2005) et les forestiers sont particulièrement préoccupés par les problématiques de dégâts liés au vent. La forêt se retrouve également au cœur des discussions sur le changement climatique et de nombreuses questions se posent quant à l'évolution des forêts en termes de productivité et de composition. Le protocole de Kyoto met plus fortement en avant la capacité des forêts à séquestrer du carbone pour réduire le taux de CO₂ dans l'atmosphère. Ils soulèvent de nombreuses questions quant aux méthodes de comptabilisation mais aussi quant aux moyens de stocker plus de carbone en forêt (Fortin et *al.* 2014). Or les dernières tempêtes Klaus en 2009 ainsi que Lothar et Martin en 1999 avec respectivement plus de 43 millions de m³ et plus de 140 millions de m³ de bois touchés par la tempête, démontrent les limites du stockage durable du carbone en forêt. Ainsi la stabilité des forêts se révèle être un axe stratégique de recherche pour assurer les fonctions traditionnelles des forêts (production, protection, accueil du public) mais aussi pour les enjeux liés au changement climatique.

Pour faire face aux tempêtes et limiter leurs impacts sur la ressource et les enjeux précédemment évoqués, il y a plusieurs façons d'agir :

- augmenter la stabilité des arbres
- augmenter la résilience des peuplements
- aider à la reconstitution des peuplements après tempête

Pour inciter les propriétaires forestiers à agir dans ce sens il est de plus en plus question de mettre en place des assurances (de Perthuis et *al.* 2010 ; Brunette, Couture 2008), mais ces dernières ne semblent pas convaincre les propriétaires forestiers privés (Brunette et *al.* 2009) et restent compliquées à mettre en place aussi bien du point de vue de l'intervention publique que du calcul économique. Il est donc essentiel d'étudier la stabilité des peuplements forestiers afin d'élaborer des stratégies efficaces pour limiter les dégâts de tempêtes.

1.2 Les modèles à l'échelle de l'arbre et du paysage sont complémentaires

Les modèles à l'échelle du paysage tel que HWIND (Peltola et *al.* 1999) et GALES (Cucchi et *al.* 2005), mais aussi FOREOL (Ancelin et *al.* 2004) qui descend à l'échelle de l'arbre, permettent d'appréhender l'impact de la sylviculture sur les dégâts subis par les massifs forestiers lors des tempêtes. L'intensification de la sylviculture ainsi que la réduction des diamètres d'exploitabilité de 10% serait un bon compromis pour optimiser la production tout en minimisant les risques (Albrecht et *al.* 2015). Mais pour aller plus loin, les modèles se heurtent au manque de données, dû au caractère aléatoire et peu fréquent des tempêtes. Le vent est en particulier un facteur complexe à mesurer et à modéliser car il est influencé par le paysage et notamment par la canopée (Dupont, Brunet 2008). Les modèles décrivant les dégâts de tempêtes sont généralement très sensibles au facteur de rafale, une variable difficile à bien caractériser. Ils ne permettent pas non plus d'expliquer les variations intra peuplements des arbres touchés, bien qu'ayant des morphologies similaires. Descendre à l'échelle de l'arbre devrait permettre d'apporter des éléments de compréhension important (Gardiner et *al.* 2008) quant aux facteurs de stabilité mais aussi quant à la capacité d'adaptation des arbres et des peuplements au vent.

1.3 Les arbres perçoivent le vent et s'acclimatent

Il n'y a pas actuellement de consensus sur l'évolution de la vitesse du vent (hors tempêtes) sous l'effet du changement climatique, pour Pryor et Barthelmie (2010) elle augmenterait pour Barton (2014) elle diminuerait. Quel que soit le scénario envisagé des changements dans le régime du vent, ils influenceront vraisemblablement la croissance des arbres. En effet, de nombreux auteurs ont mis en évidence l'effet du vent sur la morphologie des arbres, et plus précisément sur : le diamètre (Moore et al. 2014), la hauteur (Meng et al. 2006), les racines (Stokes et al. 1995), la conicité du tronc (Holbrook, Putz 1989), la longueur des branches (Meng et al. 2006) mais aussi sur l'anatomie du bois (Burton, Smith 1972).

Un mécanisme identifié montre que la perception du vent se fait aussi bien en saison de végétation qu'en dormance (Lundqvist, Valinger 1996) et que la réaction implique un mécanisme lié à l'éthylène à la suite de stimulations biomécaniques (Telewski 1990; Moulia et al. 2011; Moulia et al. 2015). Ce phénomène, permettant aux plantes de répondre à l'intensité des déformations perçues, est appelé thigmomorphogénèse (Jaffe 1973).

Dans le cas du vent, ces stimulations sont issues de la force de traînée qui s'applique sur le houppier. Les houppiers et les feuilles sont également susceptibles de se reconfigurer directement sous l'effet du vent, ce qui diminue cette force de traînée (Vogel 1989). Il a par ailleurs été montré que l'augmentation de la compétition diminuait le moment de flexion subit par un arbre (Hale et al. 2012) et que les collisions entre houppiers augmentaient la fréquence des oscillations des arbres (Webb et al. 2013). Outre l'amplitude du mouvement de l'arbre, la fréquence des oscillations semble avoir une importance prépondérante dans la résistance des arbres au vent (Fournier et al. 1993), surtout si la fréquence des oscillations rentre en résonance avec la fréquence des rafales.

En revanche, haubaner les arbres limite les stimulations biomécaniques et réduit ainsi la croissance en diamètre sur la partie immobilisée du tronc. Ce résultat a déjà été observé pour des pins radiata (*Pinus radiata D Don*) de 13 ans, d'une hauteur comprise entre 17 et 23 m et d'un diamètre moyen de 39.5 cm (Moore et al. 2014), des Pins taeda (*Pinus taeda L.*) de 19 ans, d'une hauteur moyenne de 14.5 m et d'un diamètre moyen de 18 cm (Burton, Smith 1972), des plants de *Liquidambar Styraciflua L.* d'une hauteur comprise entre 50 et 75 cm (Holbrook et Putz 1989), des épicéas de Sitka (*Picea sitchensis Bong. Carr.*) de 10 ans d'une hauteur moyenne de 5.3m et de diamètre moyen 7.5 cm (Bruce et Gardiner 2012).

La réaction des plantes à un stress mécanique a plus précisément été décrite par Moulia et al. 2011 avec le « Sum of Strain Sensing model » et met en avant le fait que la réaction de croissance observée dépend de l'intensité de la stimulation mais également de l'historique des stimulations déjà perçues. Les arbres s'acclimatent à un certain niveau de stimulation, et c'est un changement de l'environnement bouleversant ce niveau de stimulation qui induit une modification de la croissance.

Il reste cependant beaucoup à faire concernant la quantification de ces effets pour pouvoir apporter des éléments de réponses sur la capacité d'adaptation des arbres au vent en peuplement mais aussi sur la relation entre sylviculture et déformations perçues. Le rapport hauteur sur diamètre (H/D) est un premier indicateur des déformations perçues par les arbres, cependant il surestime la stabilité des arbres (Gardiner et al. 2005) et donc les déformations. Il est nécessaire de prendre en compte des variables liées aux houppiers afin de mieux décrire les déformations perçues par les arbres.

1.4 Vent Eclair, Un dispositif pour étudier l'acclimatation des arbres au vent à la suite d'une éclaircie

Les relations entre stimulations biomécaniques et croissance de l'arbre ont le plus souvent été mises en évidence sur des plants ou des arbres de petites tailles, ou des résineux. La question de la réactivité, sur le plan de la croissance, aux stimulations biomécaniques de feuillus de tailles conséquentes est ainsi largement ouverte.

L'expérimentation mise en place par le LerFob, appelée « Vent Eclair » est ainsi à plusieurs titres originale, à la fois par l'espèce concernée : le Hêtre (*Fagus sylvatica L.*), par le stade développement étudié : le stade perchis, et enfin parce qu'elle combine éclaircie et haubanage pour augmenter les stimulations biomécaniques d'une part et les diminuer d'autre part.

Le Hêtre (*Fagus sylvatica L.*) a été choisi, pour de nombreuses raisons : son importance en volume avec 262 millions de m³, soit la deuxième espèce en France après les Chênes (*Quercus sp.*), sur le plan économique, du fait des connaissances accumulées sur cette espèce, en particulier par le LerFob, et enfin du fait de sa forte réactivité aux changements d'environnement.

Le modèle Fagacées (Dhôte 1991; Le Moguédec, Dhôte 2012) fait référence concernant l'étude de la croissance du Hêtre et de nombreuses études reposent également sur la qualité des bois (bois de tension, cœur rouge, propriétés mécaniques et durabilité du bois), et de l'évolution de son aire de répartition avec le changement climatique. Les enjeux sylvicoles sont également bien identifiés (Bastien et al. 2005).

Le perchis est un stade de développement déterminant dans l'évolution future du peuplement, les peuplements de hêtre ont en moyenne une hauteur de 12 à 15m, c'est le plus souvent à ce stade que l'orientation vers une sylviculture dynamique se décide.

Sur le plan expérimental, il est original de manipuler l'environnement par l'éclaircie, comme en gestion forestière, pour augmenter les stimulations biomécaniques, et de combiner éclaircie et haubanage (plus usuellement utilisé pour au contraire limiter les stimulations).

Le rôle de l'éclaircie dans la croissance est surtout discuté et quantifié en termes de diminution de la compétition pour les ressources du milieu que sont l'eau, la lumière et les éléments nutritifs. Or l'éclaircie augmente également les stimulations biomécaniques perçues, sans que la contribution du vent à la croissance en diamètre ou en hauteur ne soit discutée.

L'objectif de Vent Eclair est donc d'étudier et de quantifier l'impact des stimulations biomécaniques sur la croissance en diamètre et en hauteur de jeunes hêtres en dissociant le facteur « levée de compétition » du facteur « stimulations biomécaniques ». L'hypothèse testée à terme avec le dispositif Vent Eclair est :

« la diminution des stimulations par le haubanage réduit la croissance en diamètre et augmente la croissance en hauteur des arbres éclaircis et non éclaircis »

Le dispositif Vent Eclair en suivant les déformations et la croissance de perches de Hêtre (*Fagus sylvatica L.*), sur plusieurs années va également permettre d'étudier l'acclimatation des arbres au vent à la suite d'une éclaircie, c'est-à-dire comment évolue les niveaux de déformations en fonction des réactions de croissance.

Dans ce mémoire les hypothèses testées sont :

- i) Le haubanage réduit la croissance en diamètre des arbres dès la première année
- ii) L'éclaircie augmente l'exposition de l'arbre au vent, ce qui augmente l'intensité des déformations perçues.
- iii) L'exposition accrue au vent, des arbres éclaircis, augmente leurs croissance en diamètre.

2. Matériels et méthodes

2.1 Le site

Le dispositif expérimental a été mis en place dans le Nord Est de la France en forêt domaniale de Haye (46,671230° N 6,084482°E) pendant l'hiver 2014/2015. Le Hêtre (*Fagus sylvatica* L.) est l'espèce dominante du massif, il y est bien en station avec un accroissement moyen de 6.5 m³/ha/an.



Figure 1 Situation Forêt de Haye, source : google.maps

2.1.1 Le peuplement

Le peuplement choisi est un perchis pur de Hêtre (*Fagus sylvatica* L.) de 13.3 m de hauteur dominante et de 13 cm de diamètre dominant. Le peuplement est en retard d'éclaircie et présente une densité très forte (rdi=0.87), les arbres sont donc supposés parfaitement acclimatés aux conditions de vent. Il est issu d'une régénération naturelle âgée en moyenne de 30 ans. La zone d'étude choisie, homogène sur le plan des hauteurs des hêtres, couvre une surface d'environ 2 ha.

2.1.2 Conditions stationnelles

Climat :

Le climat est océanique dégradé à influence continentale, la température moyenne annuelle est de 10°C avec une forte amplitude thermique (1.8°C en janvier, 18.3°C en juillet) avec 73 jours de gel, la pluviométrie est de 763 mm/an bien répartie sur l'année. L'ensoleillement est de 1 638 heures par an et la saison de végétation dure environ 180 jours (ONF 2014).

Nancy est assez peu exposé au vent, il y a 38 jours par an où le vent est supérieur à 16 m/s (à comparer aux 142 jours au Cap de la Hague dans la Manche et aux 25 jours à Agen dans le Lot-et-Garonne). Certaines rafales peuvent cependant atteindre 100km/h.

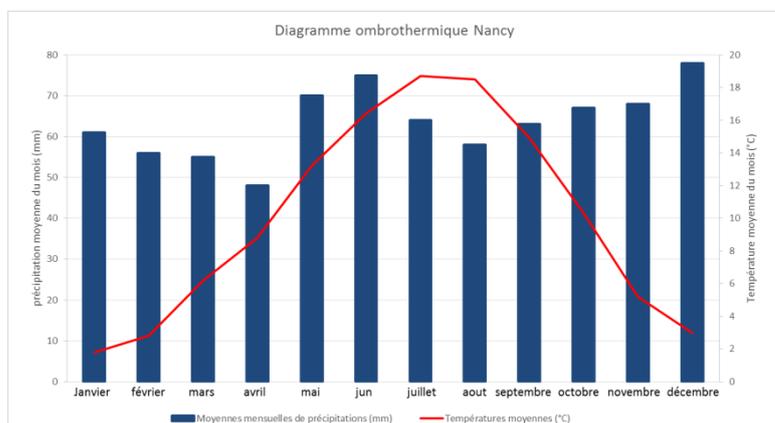


Figure 3 Diagramme ombrothermique Nancy, source : Wikipédia

Wind direction distribution in (%)

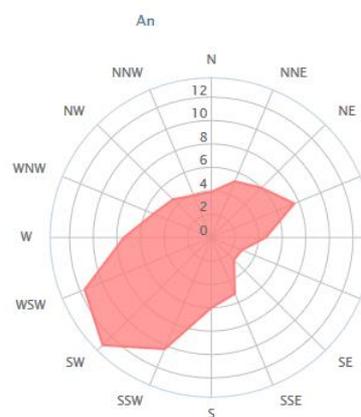


Figure 2 Direction des vents à Nancy, source : windfinder.com

Tableau 1 Vents mensuels à Nancy, source : infoclimat.fr

vent maximal m/s	Nombre moyen de jours / an												
	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	an
16	5,5	4,2	6,3	2,8	1,6	2,7	2,4	1,5	1,7	3,3	2,3	3,8	38,1
28	0,3	0,4	0	0,1	0	0	0,1	0	0	0	0,2	0,1	1,2

Sol :

Le plateau de Haye fait partie de la sylvoécocorégion des plateaux calcaires du Nord-Est (IGN 2013), formation de calcaires durs du jurassique moyen, recouverts d'argiles de décarbonatations et de limons éoliens (Becker et *al.* 1977). Sur notre zone d'étude le sol est de type sol brun calcique, les nombreuses excavations réalisées pour installer les appareillages de mesures ou les haubans ainsi que 3 fosses pédologiques indiquent une profondeur de sol très variable allant de 10 cm à 1m, ce qui est représentatif de la variabilité intra-parcellaire sur l'ensemble du massif. Dans la zone d'étude la pente est nulle.

2.1.3 Les traitements expérimentaux

Le dispositif comporte deux facteurs expérimentaux, l'éclaircie (niveau de compétition) et le haubanage (niveau de stimulations biomécaniques). L'éclaircie comporte deux modalités : aucune éclaircie (maintien d'une compétition maximale) et détournage sur un rayon de 4 m (élimination de la compétition aérienne). Le Haubanage comporte deux modalités : haubanage à la base du houppier (absence de déformations dues au vent sous le houppier) et aucun haubanage.

Tableau 2 Traitements réalisés

		Haubanage	
		haubané	non haubané (Libre)
Eclaircie	non éclairci	NeH	NeL
	éclairci	eH	eL

Remarque : l'intensité des stimulations biomécaniques est différente entre NeL et eL

Le plan d'échantillonnage fixe un effectif de 10 perches pour chacun des 4 traitements soit 40 perches au total pour le dispositif expérimental.

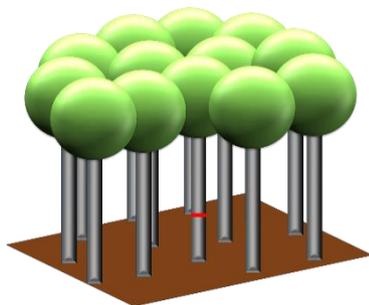


Figure 5 Perche non éclaircie libre

Les perches non éclaircies et non haubanées (NeL) ne bénéficient **pas d'apport de lumière** et les troncs subissent des **stimulations biomécaniques** dues au vent en forte interaction avec les voisins

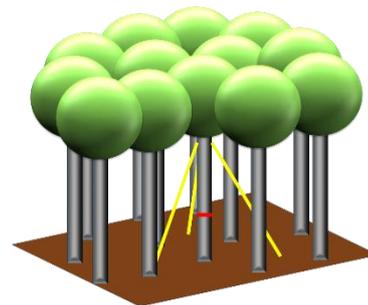


Figure 4 Perche non éclaircie et haubanée

Les perches non éclaircies et haubanées (NeH) ne bénéficient **pas d'apport en lumière** et les troncs ne subissent **pas de stimulations biomécaniques** dues au vent.

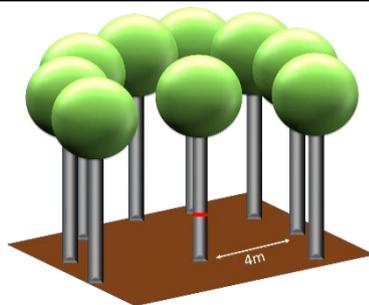


Figure 6 Perche éclaircie libre

Les perches éclaircies et non haubanées (eL) bénéficient d'un **apport en lumière** et les troncs subissent de **fortes stimulations biomécaniques**

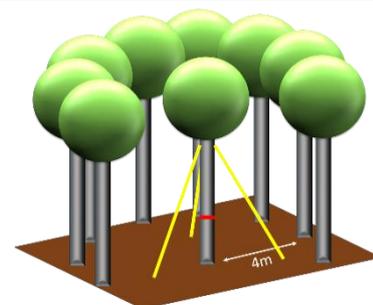


Figure 7 Perche éclaircie et haubanée

Les perches éclaircies et haubanées (eH) bénéficient d'un **apport en lumière** et les troncs ne subissent **pas de stimulations biomécaniques**

2.2 L'échantillon

Bien réparties dans la zone d'étude, un maximum de 56 perches dominantes présentant un tronc non flexueux et peu incliné, sans branche basse, avec un houppier bien développé et équilibré, ont pu être repérées spatialement. Chaque perche a été décrite (hauteur totale, circonférence à 1,3 m, hauteur de base du houppier).

Autour de chaque perche tous les arbres voisins vivants de diamètre supérieur à 2.5 cm ont été inventoriés sur une placette de 4 m de rayon (circonférence à 1,3m, distance à la perche centrale, statut concurrentiel). Les rares concurrents directs au-delà de 4m ont également été inventoriés (voir protocole Annexe 1)

Les circonférences des 56 perches repérées varient de 30 cm à 50 cm, les hauteurs totales de 10.5 m à 16 m, les densités (diamètre de pré comptage 2.5 cm) à l'hectare de 4000 tiges/ha à 9500 tiges/ha.

L'appartenance d'une perche à un traitement expérimental est issue d'un tirage aléatoire après stratification des 56 perches en 3 groupes de circonférences (< 37 cm ; < 43cm ; > 43cm). La circonférence moyenne des perches de l'échantillon final est de 40.3 cm et la hauteur moyenne est de 13.3 m. Quelques ajustements ont été nécessaires pour éviter de trouver dans l'échantillon de 40 arbres finalement défini, un arbre non éclairci proche d'un arbre éclairci.

Sur la Figure 8 on peut observer l'équivalence des échantillons de chaque traitement aussi bien du point de vue des variables de peuplement calculées sur chaque placette (densité, indice de concurrence : somme des ratios surface terrière sur distance de tous les arbres) que des variables arbres (circonférence, hauteur totale, hauteur de base du houppier, facteur d'élancement H/D).

Les traitements sont bien dispersés sur l'ensemble du dispositif (Annexe 2 : Carte du dispositif).

Echantillon supplémentaire

Un traitement expérimental, correspondant à une éclaircie d'intensité plus faible et sans haubanage (eintL), (détourage sur un rayon de 2m uniquement) a été mise en place sur un échantillon supplémentaire de 6 arbres, il est destiné à explorer la question de l'influence de l'intensité d'éclaircie sur la perception du vent par les arbres.

Ces arbres ont été choisis à proximité (environ 10 m) d'arbres du dispositif expérimental pour bénéficier de l'installation des capteurs pour suivre les déformations.

Pour que le détourage d'intensité faible réalisé n'ait pas d'impact sur le dispositif expérimental, les 6 arbres supplémentaires ont été choisis à proximité d'arbres du traitement éclairci non haubané, où les stimulations biomécaniques sont supposées être plus fortes.

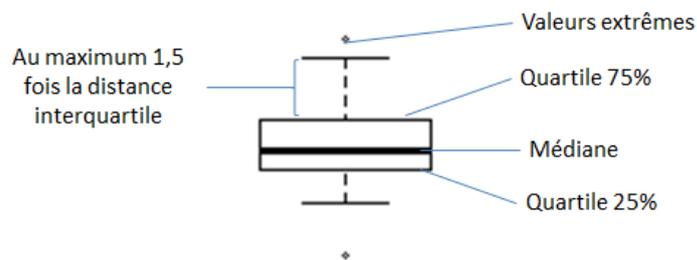
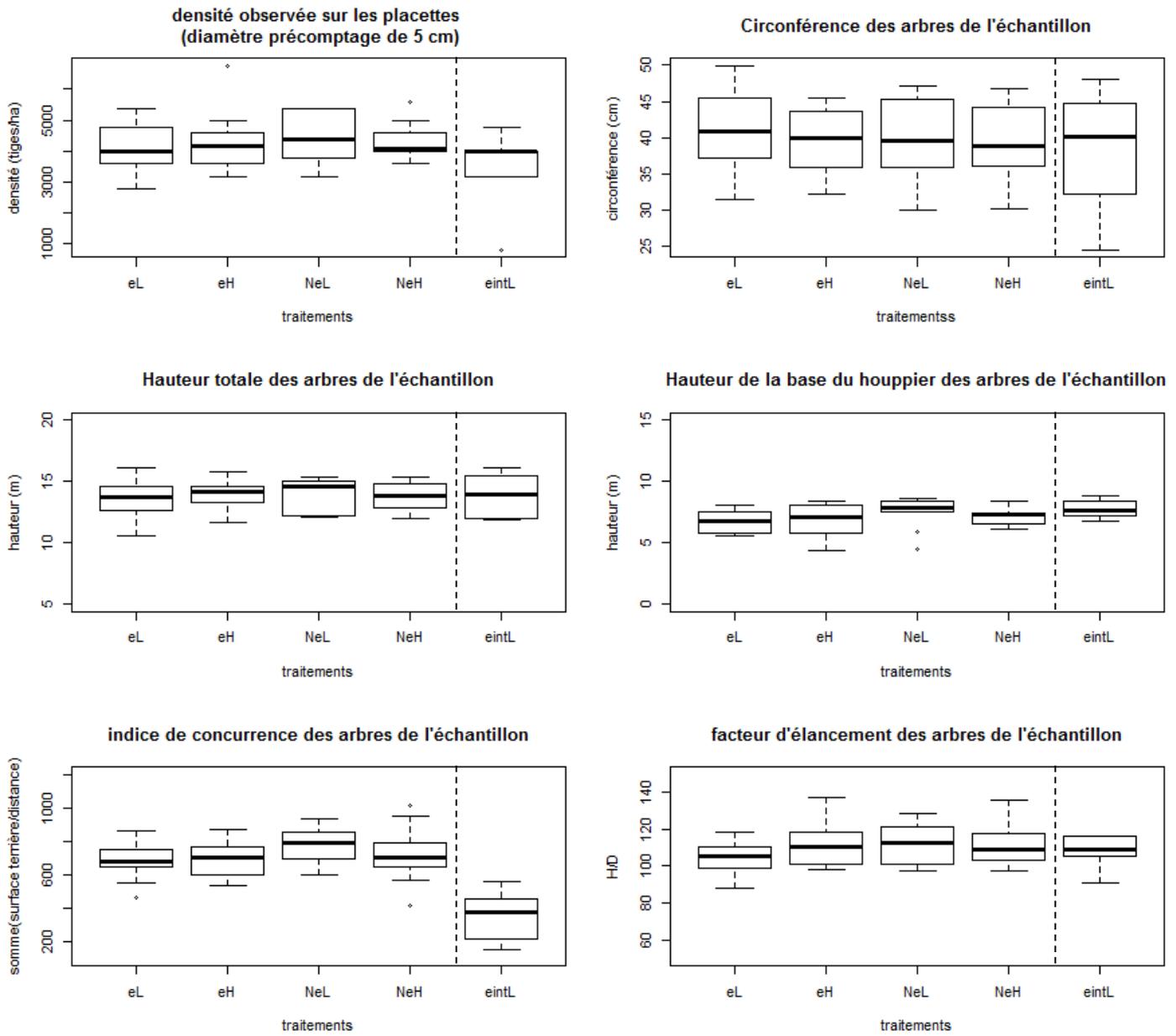


Figure 8 Caractéristiques de l'échantillon pour chaque traitement expérimental

2.1 Mise en place du dispositif

2.1.1 L'éclaircie :

L'éclaircie a été réalisée début mars 2015, les 20 arbres éclaircis sont détourés sur un rayon de 4 m c'est-à-dire que tous les arbres se situant dans ce rayon sont coupés, sous étage y compris. Il peut arriver que des concurrents directs se situent à plus de 4 m, ils sont alors également coupés puisque l'objectif est de suffisamment dégager le houppier de l'arbre pour que son mouvement soit totalement libre et non amorti par les houppiers des arbres voisins et ce, pendant plusieurs années. Le choix d'un détourage plutôt que d'une éclaircie classique ainsi que le choix d'une intensité unique confère une grande homogénéité à cette modalité conduisant tous les arbres éclaircis au même environnement compétitif.

L'éclaircie d'intensité plus faible, réalisée sur un échantillon supplémentaire de 6 arbres, consiste à un détourage sur un rayon de 2 m ainsi qu'au prélèvement des 2 plus proches concurrents directs. Cette modalité représente un niveau d'éclaircie faible, le houppier n'est pas totalement libre de mouvement, il y a donc des chocs et un amortissement du mouvement au contact des houppiers voisins.

20 arbres ne sont pas éclaircis, les houppiers sont enchevêtrés dans les houppiers voisins, le mouvement du houppier est donc fortement contraint par le peuplement, c'est l'effet peuplement



Figure 9 Perche détournée 4m

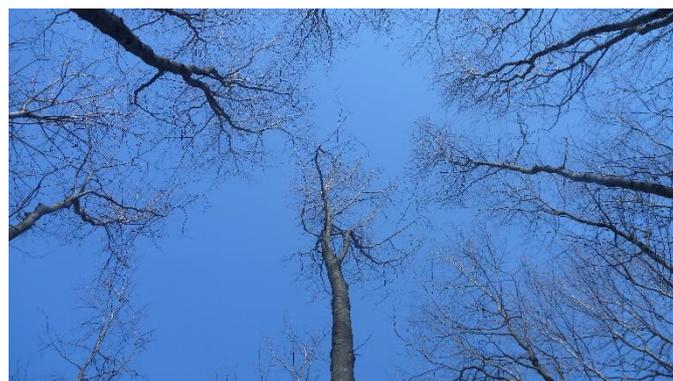


Figure 10 Perche détournée 2m



Figure 11 Perche non éclaircie

2.1.2 Le haubanage :

L'objectif du haubanage est d'empêcher le mouvement de l'arbre dans la partie basse du tronc, la difficulté est de réussir à suffisamment tendre les haubans dans cet objectif sans pour autant modifier l'état initial des contraintes de déformation de l'arbre. Cette technique avait déjà été mise en œuvre et validée à l'aide de capteurs de déformations (Bonnesoeur et *al.* en préparation).

Les arbres ont été haubanés début mars (juste après l'éclaircie) avec 3 câbles d'acier d'environ 12 m et positionnés à 120° les uns des autres. Les haubans sont fixés à la base du houppier à l'aide d'équerres métalliques à 120° vissées directement dans le tronc. Les haubans sont ensuite fixés directement au sol par une boucle passant autour d'un fer à béton d'un mètre de long enfoncé directement dans la dalle calcaire du sol. L'installation de tendeurs permet de régler la tension des haubans.



Figure 13: Haubanage d'un arbre

2.2 Matériels utilisés pour le suivi du dispositif

2.2.1 LIDAR terrestre

Toutes les perches de l'échantillon (46 au total en incluant les 6 perches supplémentaires) ont été scannées à l'aide d'un LIDAR-Terrestre FARO® focus (Light Detection And Ranging) en résolution ½ à 360° pendant la période hors feuille. Le temps de scan est de 4 min ce qui est suffisamment lent pour assurer une bonne qualité de scans et assez rapide pour limiter les acquisitions perturbées par le mouvement des arbres par le vent.

Une première acquisition des 46 arbres a été effectuée avant éclaircie avec 4 scans par perche échantillon afin d'assurer une bonne description du houppier et de limiter les occultations par les arbres voisins. Puis, pour les 26 arbres éclaircis, une seconde acquisition est réalisée avec seulement 3 scans par perche échantillon car les points de vue sont bien dégagés. Pour chaque scan l'azimut magnétique de début de scans est relevé, les mesures sont ainsi orientées.



Figure 14: Acquisition d'une scène au LIDAR Terrestre

Remarque : les sphères blanches Figure 14 permettent le recalage des scans d'une même scène

2.2.2 Les dendromètres

Des dendromètres manuels sont installés à 1.30 m sur les 40 arbres de l'échantillon. Ils sont précis au dixième de mm et permettent de calculer la variation de la circonférence. Ils seront relevés deux fois par semaine au même moment (le matin) pour limiter les sources de variations autres que la croissance : gonflement ou retrait journalier du tronc.

2.2.3 Les capteurs de déformations et V-link

Les capteurs de déformations ont été élaborés et usinés spécialement pour le dispositif. Ils sont vissés directement dans le tronc à 1m de hauteur sur les 20 arbres non haubanés. D'après Fournier et *al.* 1993 un seul niveau de mesure suffit pour caractériser les déformations perçues par l'arbre.

Le capteur est écarté du tronc par une entretoise de 8mm afin d'éviter que le capteur ne soit absorbé par la croissance de l'arbre. Il y a 2 capteurs par arbres positionnés à 90° afin de pouvoir reconstituer la déformation dans le plan horizontal. Les capteurs sont positionnés du côté Nord et Est du tronc pour limiter l'exposition directe avec le soleil et donc la dilatation des matériaux susceptibles de bruite la mesure. La mesure repose sur le principe du pont de jauge, c'est donc une variation de résistance électrique qui est enregistrée 8 fois par seconde, cette fréquence élevée est un bon compromis pour bien mesurer les déformations maximales subies lors des rafales tout en restant raisonnable du point de vue du stockage des données.

Ces capteurs sont reliés par des fils à des V-link LXRS (Microstrain®) se situant à proximité. Ils sont chargés de transmettre les données mesurées (codés en bit) à une base WSDA (Microstrain®) via un réseau Wi-Fi. Il y a 14 Vlinks mesurant les déformations de 20 arbres, chaque Vlink possède 4 voies d'enregistrement et peut potentiellement enregistrer les déformations de deux arbres simultanément.



Figure 15 : Capteurs de déformation



Figure 16: Vlink, source : microstrain.com

2.2.4 Les bases WSDA

Les bases WSDA 1500 LXRS (Microstrain®) permettent de collecter les données des Vlinks en continu par un réseau Wi-Fi, cependant il arrive parfois qu'il y ait des trous dans les données lorsque le Vlink n'arrive plus à communiquer avec la base (moins de 1% des mesures). En forêt, les divers obstacles ainsi que l'humidité réduisent la portée du réseau Wi-Fi à environ 100m, il y a donc 2 bases sur le dispositif qui fonctionnent sur des fréquences et réseaux différents et collectent les données de 7 Vlinks chacune.



Figure 17 : Base WSDA 1500 LXRS, source : microstrain.com

2.2.5 La station météo

La station météo est composée de 3 anémomètres situés à 12 m (au niveau du houppier), 15 m (juste au-dessus du houppier) et 20 m. Ils mesurent en continu (moyenne sur 3 secondes) la vitesse et la direction du vent (sauf à 20 m). Ils sont fixés sur un mât de 20 m dressé au milieu du dispositif. Les données sont collectées par une base Campbell Scientific® CR1000.

2.3 Démarche et traitement des données

2.3.1 Les scans LIDAR

Avant de pouvoir effectuer des mesures sur les arbres grâce aux scans LIDAR les opérations suivantes sont nécessaires :

Recalage des scans

Les 3 ou 4 scans d'un même arbre sous des points de vue différents, vont permettre de reconstituer une scène (nuages de points issue des scans fusionnés) représentant l'arbre et son environnement. Les sphères de recalage d'un diamètre de 14 cm (Figure 14) permettent de recaler les scans avec le logiciel SCENE version 4.8 (FARO®). Il faut au minimum 3 sphères visibles pour effectuer un recalage (ou 2 en utilisant la mesure de l'inclinomètre du LIDAR). L'exactitude du recalage est mesurée par l'erreur sur la distance, l'angle entre les sphères ainsi que sur l'orthogonalité des scans. Pour chaque scène, les recalages effectués sont de bonne qualité, ce qui permet d'être confiant sur les mesures effectuées par la suite.



Figure 18 : Mât



Figure 19 Scans LIDAR en vue planaire sur Faro Scene

Isolement de la perche

Cette étape est essentielle car elle permet de limiter la taille du nuage de points manipulé et donc de diminuer les temps de chargement et fluidifier l'affichage graphique. Elle nécessite l'utilisation d'un ordinateur puissant. Les scans effectués au LIDAR Terrestre font entre 600 mo et 700 mo. L'ouverture des scans sous le logiciel SCENE permet d'éliminer le bruit (points mesurés sans réalité) avec l'application de filtres portant sur la réflectance du point ainsi que de sa proximité avec d'autres points. Cette opération permet de diviser la taille du scan par deux. Un premier détourage est effectué afin de ne garder que la perche et son environnement, cela permet d'avoir accès aux variables peuplements, ces scans font environ 200 mo. Un second détourage au plus près de la perche est ensuite réalisé, l'export (au format .xyz) de ces 3 ou 4 scans fusionnés permet ensuite de travailler sur Computree (v3.191) pour isoler finement le houppier de l'arbre avant d'effectuer les mesures sur les houppiers. Cette étape est longue puisque qu'il y a 262 scans pour 72 scènes, la création d'une scène

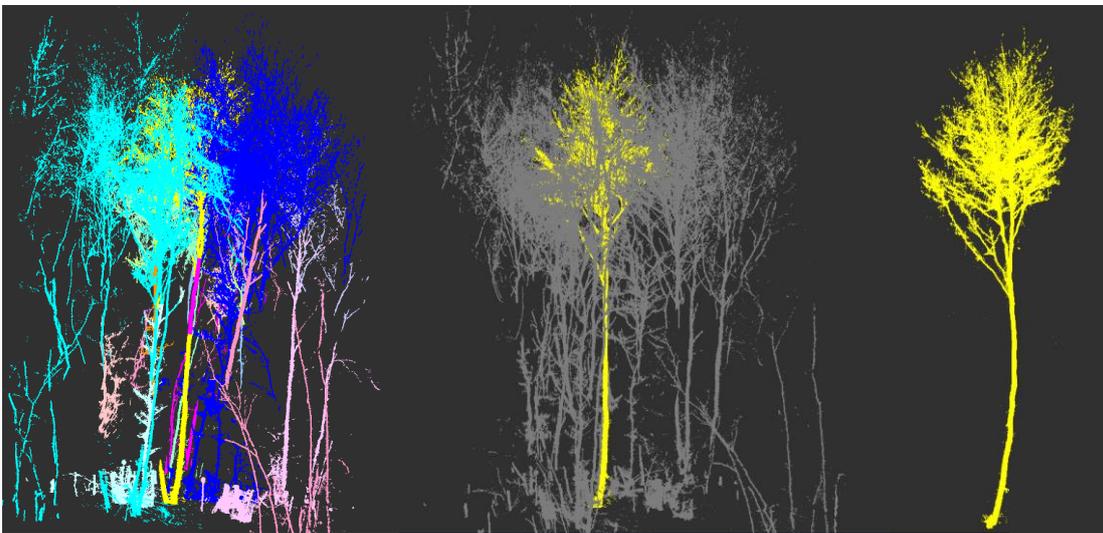


Figure 21 Différentes étapes du processus d'isolement d'une perche

nécessite 3 chargements par scan (de 3 min à 1min selon la taille du scan) ainsi qu'au moins 2 sauvegardes et un export. Le temps de chargement estimé pour le traitement de tous les scans est de 90h. La manipulation du logiciel est cependant assez rapide.

Mesures des variables houppier sur Computree :

Volume de houppier: Le volume du houppier est calculé grâce à des projections horizontales de tranches de houppier effectuées avec un pas et une épaisseur fixée. Dans cette étude le nombre de scans par arbre permet d'avoir une bonne description du houppier, il n'est donc pas nécessaire d'utiliser une épaisseur de tranche de projection supérieure au pas définissant l'occurrence des projections. L'analyse de sensibilité réalisée à plusieurs hauteurs relatives (Annexe 3 et Annexe 4) permet de définir un pas et une épaisseur de 10 cm et d'obtenir des valeurs et une hiérarchie entre les arbres stables (notamment lorsqu'on considère la partie supérieure du houppier) quelle que soit la hauteur relative. Une épaisseur inférieure au pas ne permet pas de décrire entièrement le houppier. Une épaisseur supérieure au pas

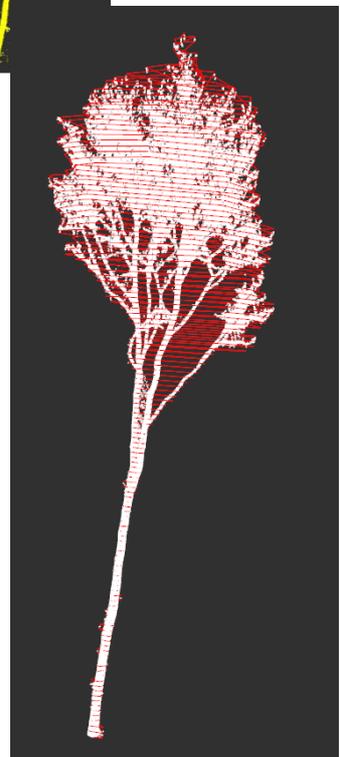


Figure 20 Projections de houppier
pas = épaisseur = 10cm

permet de lisser la forme du houppier en cas de scans de moindre qualité. Un pas faible permet de coller au plus proche du houppier mais nécessite un temps de calcul important à l'inverse un pas élevé ne fournit qu'une description grossière du houppier. Le volume de houppier de chaque arbre peut par la suite être calculé pour différentes longueurs du houppier selon que l'on veuille caractériser l'ensemble du houppier (de 1 à 0.6 de hauteur relative) ou simplement la partie supérieure exposée au vent (de 1 à 0.9 de hauteur relative)

Profil de la surface de la projection horizontale du houppier

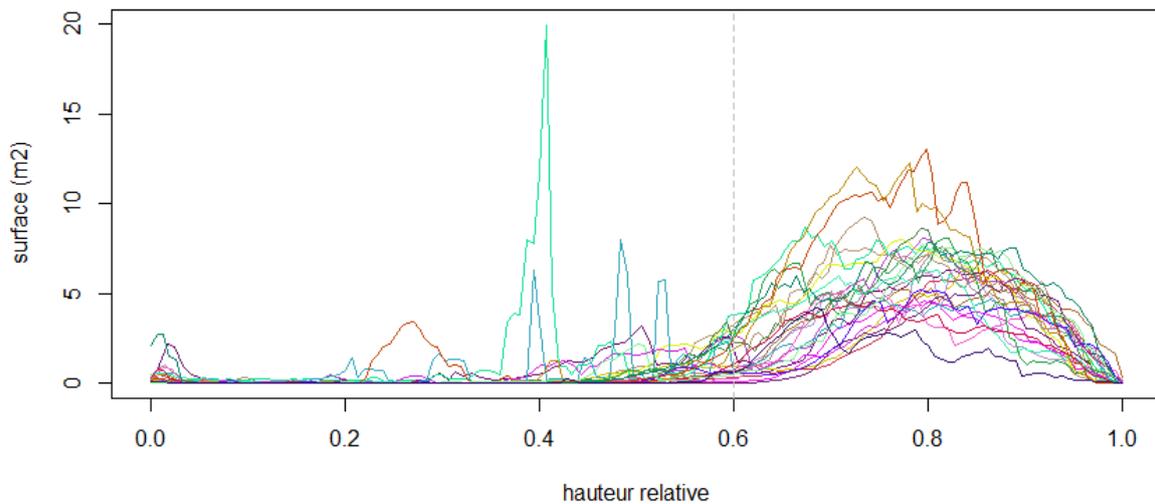


Figure 22 Profil de la surface du houppier (couleurs aléatoires)

profil volume cumulé de houppier

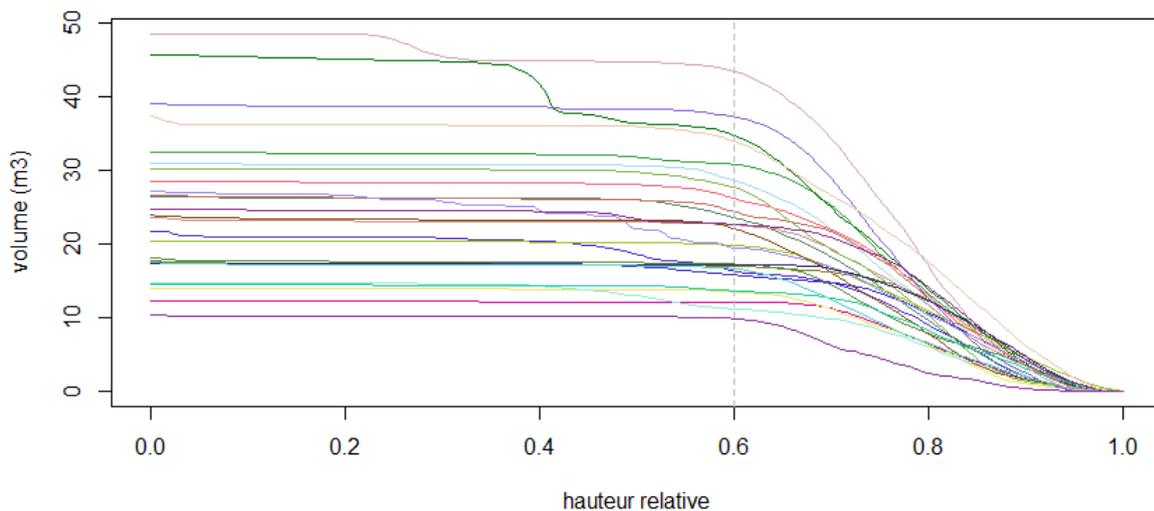


Figure 23 Profil cumulé (du haut du houppier vers le bas) du volume du houppier (couleurs aléatoires)

Remarque : la base du houppier est très homogène sur l'échantillon et peut-être fixé à 0.6 de hauteur relative, les pics de surface apparaissant en dessous de 0.6 de hauteur relative sont dus aux quelques branches basses.

Surface et densité du houppier : Pour accéder à ces valeurs il faut passer par un processus de voxelisation, matrice 3D composée de cubes, les voxels. Les voxels (volumetric pixel) peuvent être considérés comme l'équivalent des pixels appliqué à une image 3D. Chaque voxel est défini par sa position dans l'espace ainsi que par la densité de point de scans qu'il englobe. La voxelisation permet d'une part d'accéder au nombre de point décrivant le houppier (ce qui peut être considéré comme un indicateur de la densité du houppier quand ce nombre est divisé par la surface de houppier considéré) et d'autre part à la surface du houppier par projection verticale des voxels dans un plan. La surface de houppier est calculée dans le plan perpendiculaire aux 8 directions (la surface de houppier étant identique dans la direction opposée cela permet bien de coller aux 16 directions de vents définies). Comme précédemment une analyse de sensibilité est réalisée à différentes hauteurs relatives sur la taille des voxels (Annexe 5 et Annexe 6), une taille de 15 cm sera retenue. Si les voxels sont trop petit les vides entre les branches ne seront pas pris en compte et la surface du houppier est sous-estimée, à l'inverse des voxels trop gros surestime largement la surface de houppier (du fait de la forme cubique des voxels)

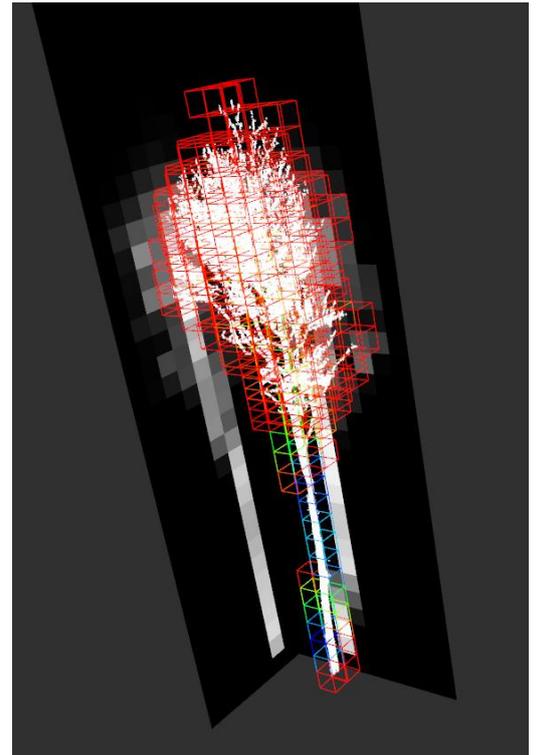


Figure 24 Voxelisation et projection (taille = 50cm)

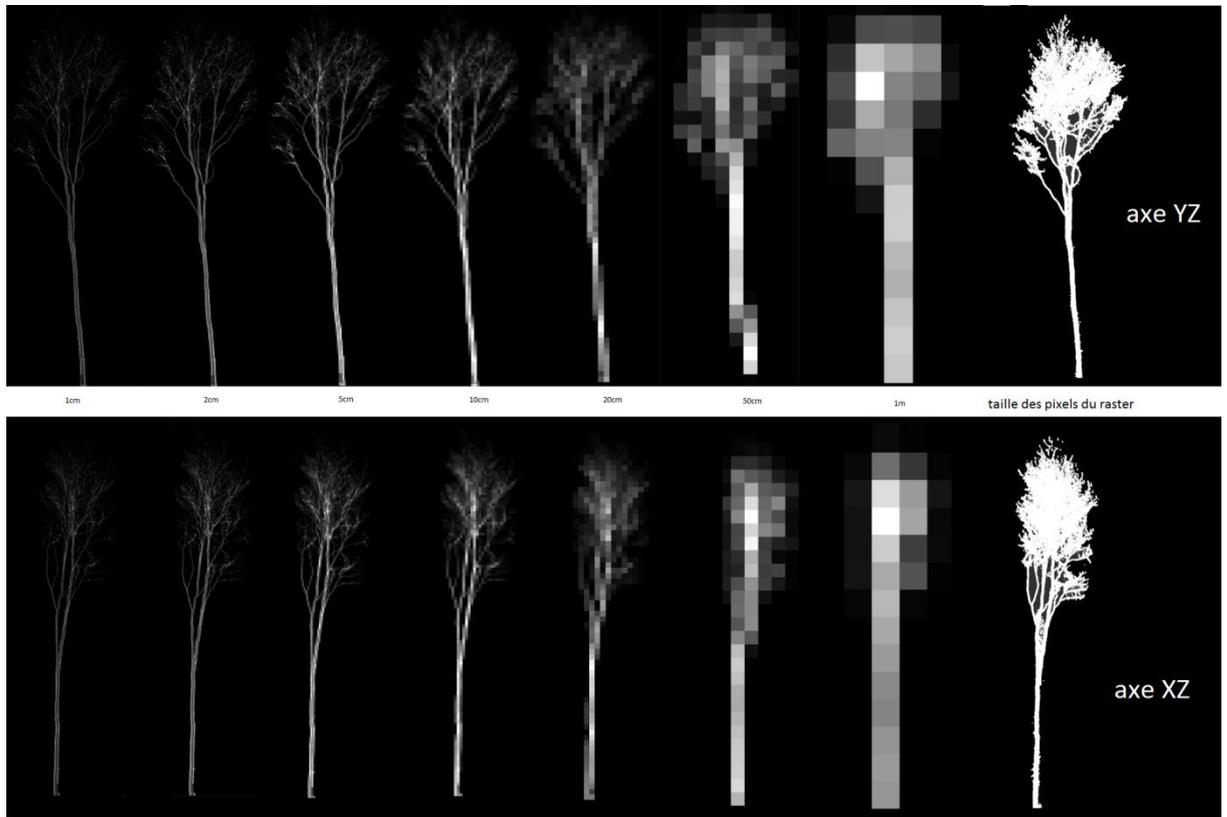


Figure 25 Projections des voxels avec différentes tailles

2.3.2 Les mesures de vent

Les données de vents : direction, vitesse moyenne ainsi que vitesse maximale sont synthétisées par plage de 30 minutes (comme les données de déformations).

Les mesures de vent effectuées à différentes hauteurs sont fortement corrélées mais la plus grande variabilité est observée à 20 m. C'est cette mesure à 20m qui sera retenue pour l'étude des déformations. Sur le site d'étude, le vent moyen est de 7 m/s et la vitesse maximale enregistrée est de 21 m/s. Bien que les vents les plus forts soient très importants pour la thigmomorphogénèse, pour l'étude des déformations, seuls les vents inférieurs à 15m/s sont conservés. En effet le nombre d'enregistrements par vitesse de vent au-delà de 15 m/s étant insuffisant et apportant beaucoup trop de variabilité. De plus les vitesses élevées sont généralement atteintes lors d'épisodes de vent rares et très irréguliers. Ils ne sont de ce fait pas forcément représentatifs du phénomène étudié d'adaptation au vent chronique.

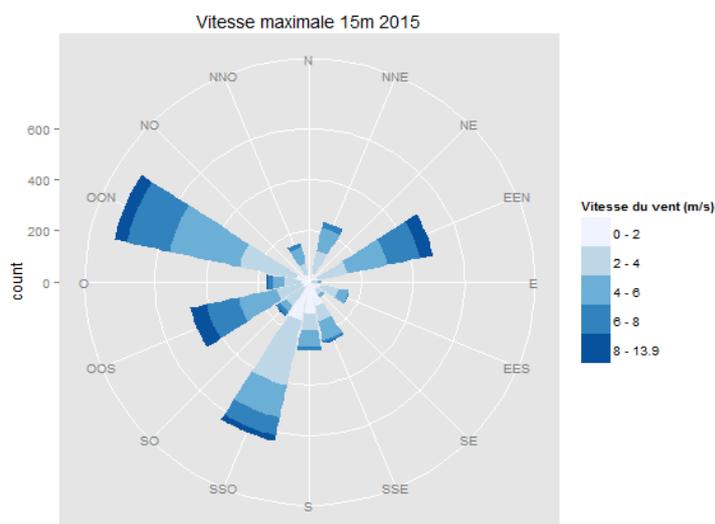


Figure 26 Fréquence des vents mesurée à 15m

Le temps de réponse des arbres au vent mesuré sur la station météo peut varier selon par exemples la proximité des arbres échantillons, la direction du vent ou son intensité. Utiliser des données caractéristiques par plage de 30 minutes permet d'éviter ces problèmes de décalage temporel.

2.3.3 Les données de déformation

Les données de déformations (voir 2.2.3) sont enregistrées en bit à une fréquence de 8 enregistrements par seconde. La première étape dans le traitement des données consiste à reconstituer des séquences chronologiques sans données manquantes parfois induites par une mauvaise communication entre bases wsda et Vlink. Les valeurs manquantes sont remplacées par la valeur mesurée la plus proche (y compris s'il y en a plusieurs). Seules les séquences avec un taux d'enregistrement supérieur à 90% sur 30 minutes sont conservées. Au final plus de 99% des séquences de 30 minutes sont conservées.

Les données en bit sont ensuite converties en déformation à la périphérie du tronc.

Les mesures de déformations sont bruitées par un signal basse fréquence due à des variations journalières (liées à des variations de température ou au retrait et gonflement du tronc). Pour obtenir le signal haute fréquence qui représente les déformations réellement perçues par l'arbre (liées au vent), il faut soustraire le signal basse fréquence au signal brut. Le signal basse fréquence est obtenu en calculant une médiane glissante sur une fenêtre de 30 min.

Les déformations étant mesurées sur deux axes orientés, la norme et l'orientation du vecteur de déformation sont calculées pour chaque mesure.

Les informations sur les déformations sont résumées par les déformations moyennes et maximales enregistrées sur une plage de 30 min et ce dans 16 directions. Cela permet de faciliter le traitement des données et d'éviter les erreurs dues au décalage temporel du fait du décalage spatial entre les mesures de vents et de déformations.

Les déformations en période de mesure hors feuilles sont connues pour 7 arbres (5 non éclaircis et 2 éclaircis) et seront comparées aux mesures en feuilles qui commencent, selon les arbres, aux alentours de début mai (une fois les arbres totalement débouffés)

La période durant laquelle le houppier n'est que partiellement feuillé n'est prise en compte pour la comparaison.

Les déformations maximales sont modélisées par un modèle mixte linéaire de la forme :

$$\log(\varepsilon_{i,j,k}) = \mu_i + \alpha_j + \beta_k + \gamma * \log(U) + \theta * \log(G) + Z_{i,j} + \epsilon_i \quad (1)$$

Il correspond à la forme mixte linéaire du modèle théorique des déformations perçues par un arbre (Fournier et *al.* En préparation),

Où ε représente les déformations à 1 m en $\mu\text{m}/\text{m}$, i le numéro de l'arbre, j son statut parmi non éclairci hors feuille (NeHF), non éclairci en feuille (NeF), éclairci intermédiaire hors feuille (eintHF), éclairci intermédiaire en feuille (eintF), éclairci hors feuille (eHF), éclairci en feuille (eF), k la direction du vent (16 directions possibles). Le paramètre μ_i représente l'estimateur de la moyenne des observations de l'arbre i , α_j est le paramètre associé au statut j , β_k le paramètre associé à la direction de vent k . Le paramètre γ est associé à la vitesse maximale du vent à 20 m : U , θ le paramètre associé au facteur de rafale à 20 m : G (rapport vitesse moyenne sur vitesse maximale du vent). $Z_{i,j}$ est l'effet aléatoire associé à l'arbre i de statut j et ϵ_i est l'erreur aléatoire sur l'observation i .

2.3.4 Les données de croissance

L'analyse de la croissance est réalisée sur une période qui débute le 4 avril (avant le débouffement des arbres) et qui se termine le 26 juillet 2015 (fin de la sécheresse). La fin de la période d'analyse est évidemment déterminée par la période de stage, toutefois elle correspond bien à une date clef dans la croissance diamétrale comme cela sera montré plus loin.

L'analyse est réalisée sur la croissance observée sur la totalité de cette période en utilisant le modèle linéaire suivant :

$$\Delta G = \alpha_i + \beta * G_{init} \quad (2)$$

ΔG représente la variation en surface terrière exprimé en m^2 sur la période étudiée, α_i est le paramètre associé aux différents traitements (eL, eH, NeL, NeH) et β est le paramètre associé à la surface terrière initiale G_{init} de l'arbre.

L'analyse de la vitesse de croissance (les arbres sont mesurés tous les 3 ou 4 jours) est réalisée sur la même période. Il faut noter que les dates de début de croissance diffèrent de plusieurs jours selon les arbres.

L'analyse de la vitesse de croissance est réalisée à l'aide d'un modèle additif généralisé à effet mixte de la forme :

$$\frac{dG_i}{dt} = f(t)_j + \mu_i + \alpha_j + \beta * G_{init} + Z_{i,j} + \epsilon_i \quad (3)$$

Dans ce modèle $\frac{dG_i}{dt}$ représente la vitesse d'accroissement sur la surface terrière en m²/jours, i le numéro de l'arbre, j le traitement, $f(t)_j$ est une fonction de lissage relative au temps et représentant les effets climatiques. Il y a une fonction par traitement, toutefois, le synchronisme entre les modalités éclaircies d'une part et non éclaircies d'autre part étant fort, on peut considérer que $f(t)_{eH} = f(t)_e$ et $f(t)_{NeH} = f(t)_{Ne}$, et simplifier l'équation en utilisant que 2 fonctions. Le paramètre μ_i représente l'estimateur de la moyenne de la vitesse d'accroissement sur la surface terrière pour l'arbre i , α_j est le paramètre associé aux différents traitements j , β est le paramètre associé à la surface terrière initiale G_{init} de l'arbre. $Z_{i,j}$ est l'effet aléatoire associé à l'arbre i de traitement j et ϵ_i est l'erreur aléatoire sur l'observation i .

Ce type de modèle, à travers la fonction $f(t)_j$, permet de tenir compte des effets climatiques responsables de fortes variations et ainsi de dissocier les effets climatiques des effets liés au traitement contenus dans la partie linéaire du modèle.

3. Résultats

3.1 L'éclaircie augmente les déformations perçues par l'arbre

Le test de rapport de vraisemblance réalisé (non présenté) entre le modèle (1) (voire 2.3.3) et le modèle prenant en compte l'interaction du statut avec le vent montre que l'interaction est significative ($p\text{-value} < 0.05$). Elle ne sera pas retenue dans le modèle final par principe de parcimonie conforté par la faible variation de l'AIC.

L'analyse des différents traitements (paramètres α_j du Tableau 3 convertis en échelle non logarithmique) met clairement en évidence l'effet de l'éclaircie sur les déformations des troncs. Sur la période en feuille, par rapport aux arbres éclaircis les déformations des arbres éclaircis intermédiaires sont 16% inférieures, celles des arbres non éclaircis de 32% inférieures. L'absence des feuilles sur les arbres réduit les déformations de 50% pour les arbres éclaircis, de 22% pour les éclaircis intermédiaire et de 38% pour les arbres non éclaircis.

Les déformations observées présentent une certaine variabilité intra arbre mais aussi inter arbres (Annexe 7, Annexe 8 et Annexe 9). Pour une vitesse de vent donnée, la variabilité intra arbre s'explique en partie par la direction du vent mais aussi par le facteur de rafale, un vent très irrégulier déforme plus les arbres. On peut supposer que les qualités aérodynamiques du houppier ainsi que la morphologie générale de l'arbre jouent un rôle prépondérant dans les déformations observées et ce, en relation avec la direction du vent.

La tentative d'intégration de variables morphologiques tel que le diamètre à 1.3 m, la hauteur, le volume du houppier, la surface et la densité du houppier, et ce à différent niveau de hauteur relative, ne s'est pas révélé pertinente avec des p-value largement supérieures à 0.05 pour chaque paramètre dans l'ANOVA du modèle (non présenté).

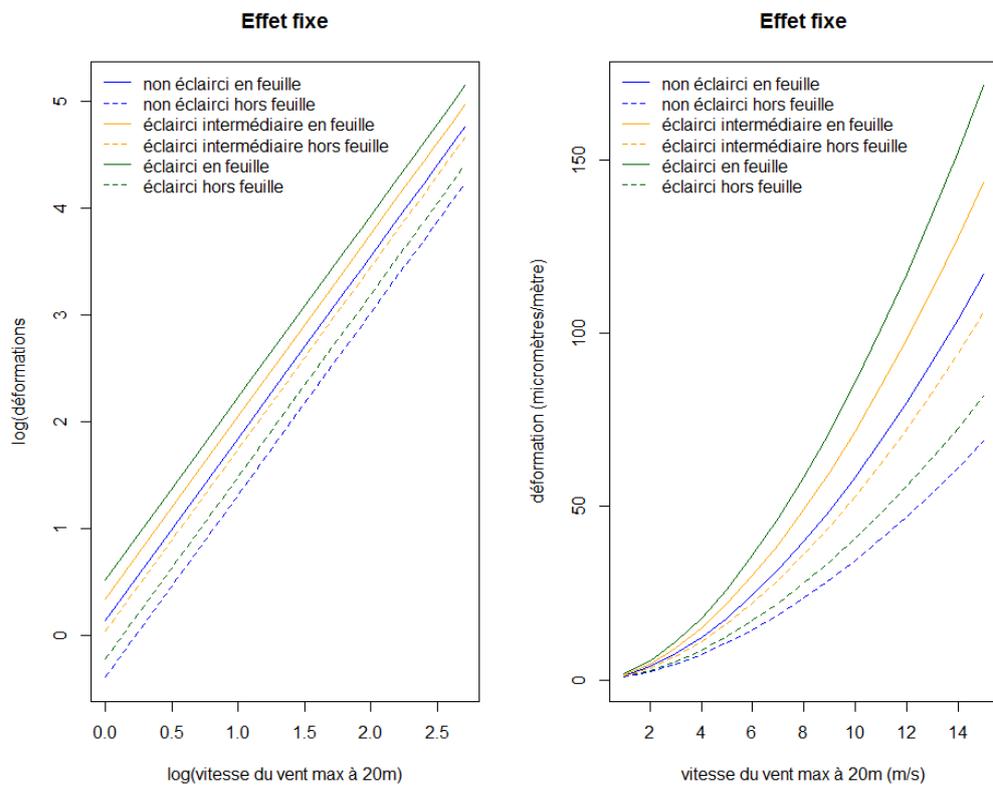


Figure 27 Prédiction de l'effet fixe du modèle de déformations (Échelle logarithmique à gauche, échelle normale à droite)

Tableau 3 Estimations des paramètres du modèle de déformation

paramètres	Valeurs	Erreurs standards
Intercept	-0,2354	0,0879
α_{eHF}	-0,7133	0,0397
α_{eintF}	-0,1785	0,1319
α_{eintHF}	-0,4576	0,1340
α_{NeF}	-0,3831	0,1142
α_{NeHF}	-0,8866	0,1164
γ	1,8364	0,0074
θ	-0,6174	0,0105
β_{ENE}	0,2309	0,0319
β_{ESE}	-0,0226	0,0348
β_{NNE}	0,3478	0,0334
β_{NNO}	0,4149	0,0355
β_{NO}	0,7408	0,0743
β_O	0,1859	0,0351
β_{ONO}	0,4193	0,0317
β_{OSO}	0,2946	0,0327
β_S	-0,0234	0,0342
β_{SE}	-0,4337	0,0437
β_{SO}	0,1391	0,0350
β_{SSE}	0,0994	0,0359
β_{SSO}	0,1038	0,0322

Remarque : α_{eHF} et β_E sont contenus dans l'intercept pour éviter la sur-paramétrisation du model

3.2 Le vent stimule la croissance en diamètre

3.2.1 Croissance en fin de période

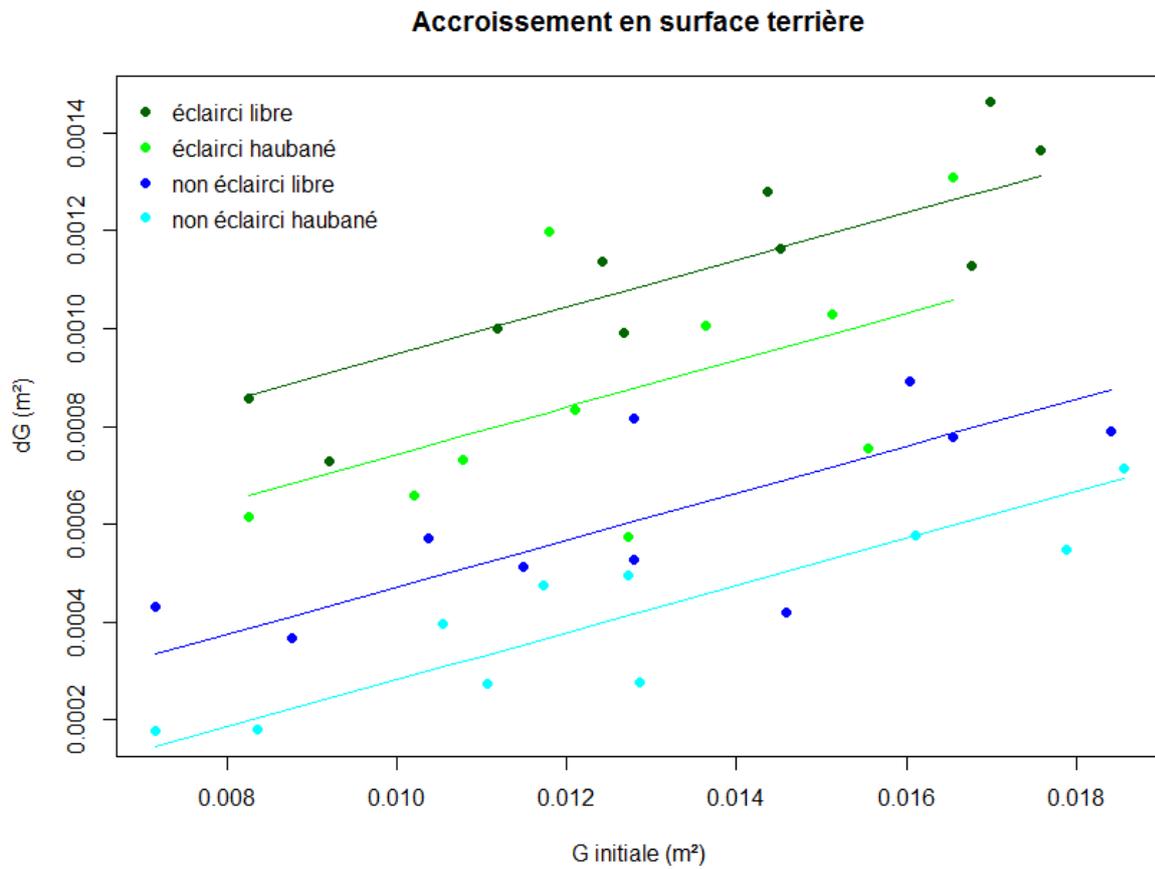


Figure 28 Accroissement en surface terrière en fin de période d'étude

Tableau 4 Estimations des paramètres du modèle de l'accroissement en surface terrière

paramètres	Valeurs	Erreurs standards
Intercept	4.667^{e-4}	1.068^{e-4}
β	4.812^{e-2}	7.209^{e-3}
α_{eH}	-2.051^{e-4}	6.472^{e-5}
α_{NeL}	-4.767^{e-4}	6.461^{e-5}
α_{NeH}	-6.662^{e-4}	6.470^{e-5}

Remarque : α_{eL} est contenu dans l'intercept pour éviter la sur-paramétrisation du model

L'Ancova réalisée sur l'accroissement en surface terrière en fin de période ($r^2=0.82$) montre un fort effet de la surface terrière initiale des arbres et il n'y a pas d'interaction entre les paramètres (p -value=0.6 sur la comparaison non présentée des modèles avec et sans interactions). Le test de Tukey effectué sur les paramètres du modèle (Tableau 4) révèle que les quatre traitements sont significativement différents les uns des autres (p -value<0.05).

Pour un arbre de 13 cm de diamètre initial (arbre de surface terrière moyenne de l'échantillon), le haubanage sur un arbre éclairci (respectivement sur arbre non éclairci) réduit significativement sa croissance de 19% (respectivement 30%). La stimulation par le vent augmente significativement la croissance.

Pour un arbre de même dimension et si l'on prend pour référence la croissance d'un arbre non éclairci (contraint par un environnement très compétitif et stimulé par le vent), la croissance d'un arbre éclairci haubané est multipliée par 1,42 et celle d'un éclairci par 1,75.

Pour un arbre de même dimension et si l'on prend pour référence la croissance d'un arbre non éclairci haubané (contraint par un environnement très compétitif et non stimulé par le vent, la croissance d'un arbre non éclairci est multipliée par 1,42, d'un arbre éclairci haubané par 2 et celle d'un éclairci par 2,5.

La comparaison des coefficients α_i permet de mettre en évidence plusieurs effets sous l'hypothèse que ceux-ci soient additifs.

On peut supposer que le gain réel de croissance en surface terrière lié à la levée de compétition seule soit de $4.61 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ sur la période et que le gain lié à l'éclaircie (levée de compétition + ΔS) soit de $4.75 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. L'effet des stimulations biomécaniques au niveau perçu par les arbres non éclaircis ($S1$) est de $1.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, et celui perçu par les arbres éclaircis ($S2 = S1 + \Delta S$) est de $2.05 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. La part du gain en stimulations biomécaniques quand on éclaircit (ΔS) est donc de $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$.

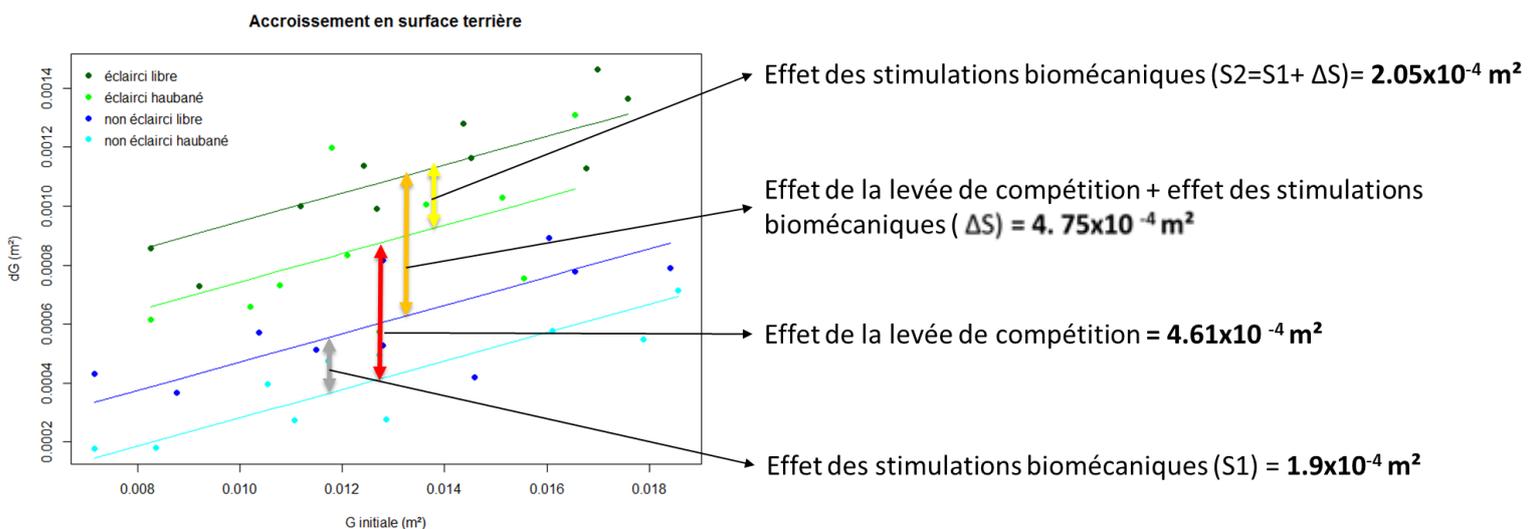


Figure 29 illustration des différents effets observés

Ainsi dans l'effet de l'éclaircie (flèche orange Figure 29) les stimulations biomécaniques (S2) interviennent à hauteur de 43% dans l'augmentation de croissance observée, dont 40% sont dus au niveau de stimulation perçue avant éclaircie (S1) et seulement 3% dus à l'augmentation du niveau de stimulations biomécaniques par l'éclaircie (ΔS).

3.2.2 Vitesse de croissance

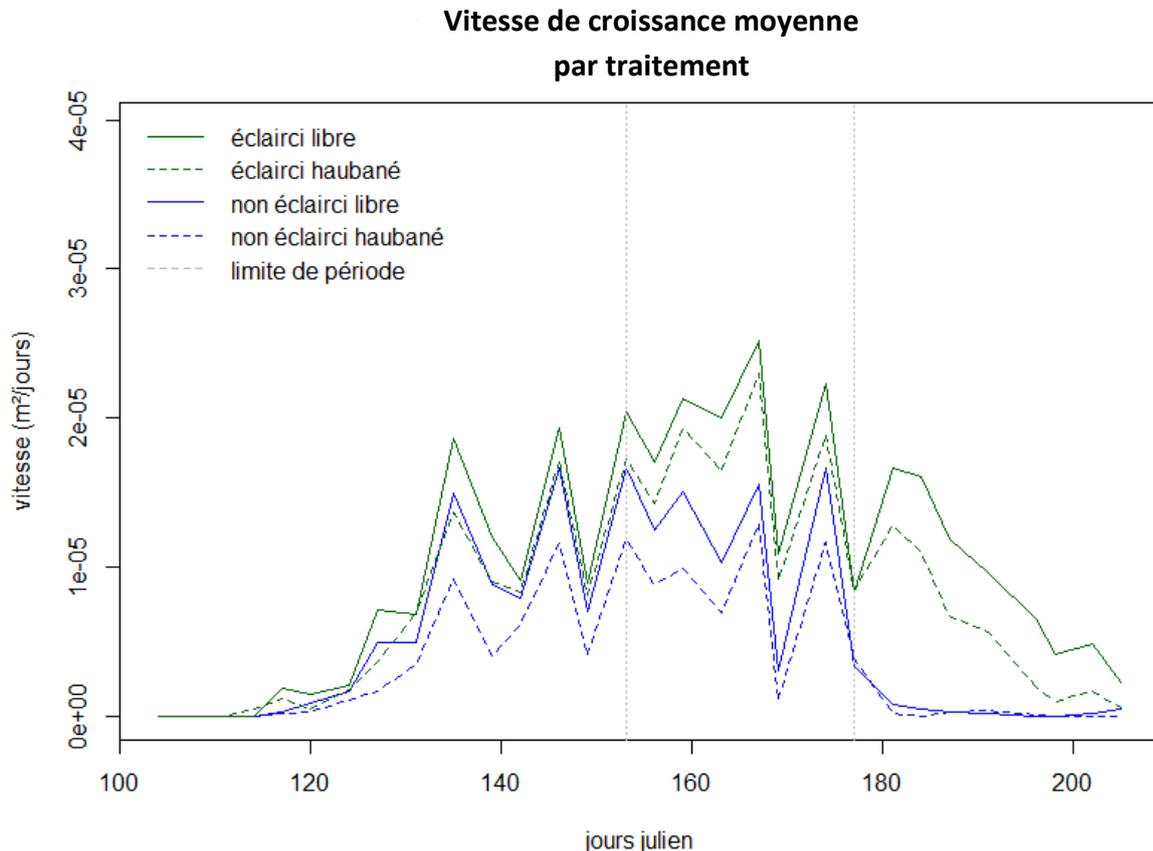


Figure 30 Vitesse de croissance sur la période étudiée

L'ANOVA est réalisée dans un premier temps sur la période totale d'observation entre le modèle simple (sans le paramètre lié au traitement) et le modèle présenté (avec le paramètre lié au traitement), cela permet de confirmer l'effet des différents statuts sur la vitesse de croissance (p -value<0.001).

Comparer le modèle complet avec un modèle prenant en compte uniquement l'effet de l'éclaircie, permet de mettre plus spécifiquement l'effet du haubanage en avant (p -value<0.001).

Sur cette période, en suivant la même démarche que précédemment pour la croissance en fin de période (analyse des paramètres α_i du Tableau 5), on retrouve sans surprise les mêmes résultats. C'est-à-dire pour un arbre de 13 cm de diamètre (arbre de surface terrière moyenne de l'échantillon) une vitesse réduite de 19% pour les arbres éclaircis et haubanés, de 44% pour les arbres non éclaircis libres et de 62% pour les arbres non éclaircis haubanés. De même, la part des stimulations biomécaniques dans le gain de vitesse lié à l'éclaircie reste très faible (3%).

Tableau 5 Estimations des paramètres du modèle de vitesse de croissance

paramètres	Valeurs	Erreurs standards
Intercept	4.562^{e-6}	9.485^{e-7}
β	4.431^{e-4}	6.403^{e-5}
α_{eH}	-1.962^{e-6}	5.749^{e-7}
α_{NeL}	-4.646^{e-6}	5.739^{e-7}
α_{NeH}	-6.422^{e-6}	5.747^{e-7}

Remarque : α_{eL} est contenu dans l'intercept pour éviter la sur-paramétrisation du model

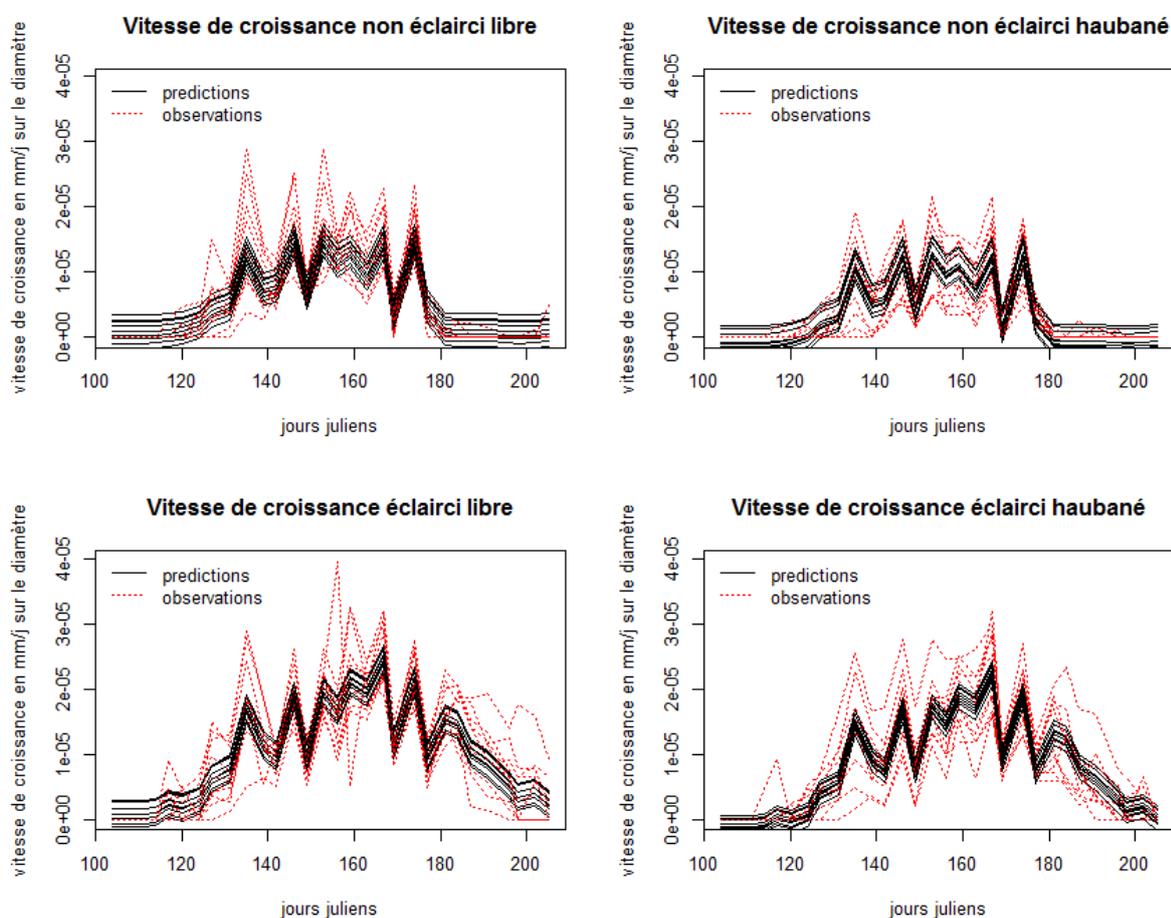


Figure 31 Observations et prédictions du modèle de vitesse de croissance pour chaque arbre

Pour la vitesse de croissance en surface terrière on observe un synchronisme quasiment journalier entre les différents traitements. Ces variations sont probablement liées aux effets climatiques non pris en compte ici (températures, pluie, etc.). Ce synchronisme se manifeste aussi bien de façon identique dans tous les traitements (jusqu'au jour 170), mais aussi de façon plus spécifique au sein des modalités non éclaircies et éclaircies. Cela s'illustre particulièrement bien au jour 181 où la croissance des arbres non éclaircis s'arrête nette alors que les arbres éclaircis continuent de croître mais plus lentement. Ces changements autour du jour 180 s'expliquent en partie par une période très chaude et sèche. On peut supposer que si la sécheresse avait perduré, les arbres éclaircis haubanés s'arrêteraient de

croître plus tôt que les arbres libres du fait de leur vitesse de croissance toujours inférieure aux arbres éclaircis libres.

Une analyse visuelle des graphiques permet d'identifier plus précisément 3 périodes caractéristiques.

(Remarque : les pourcentages donnés par la suite valent pour un arbre de diamètre 13 cm, soit l'arbre moyen du peuplement)

-1^{er} période : du début au jour 153

Tableau 6 Estimations des paramètres du modèle de vitesse de croissance sur la première période

paramètres	Valeurs	Erreurs standards
Intercept	1.241 ^{e-6}	1.282 ^{e-6}
β	4.805 ^{e-4}	8.655 ^{e-5}
α_{eH}	-1.059 ^{e-6}	7.77 ^{e-7}
α_{NeL}	-1.399 ^{e-6}	7.757 ^{e-7}
α_{NeH}	-3.525 ^{e-6}	7.768 ^{e-7}

Sur la première période, les tests de rapport de vraisemblance réalisés sur les différents modèles montrent qu'il y a bien un effet de l'éclaircie et du haubanage (p-value<0.05), et pas d'interaction entre le traitement et la surface terrière initiale (p-value=0.3). La comparaison entre les différents traitements montre que seuls les arbres non éclaircis haubanés sont statistiquement différents des autres sur cette première période (p-value<0.05). Les autres groupes poussent plus de 68% plus vite que les arbres non éclaircis haubanés.

-2^e période : du jour 153 au jour 177

Tableau 7 Estimations des paramètres du modèle de vitesse de croissance sur la deuxième période

paramètres	Valeurs	Erreurs standards
Intercept	7.49 ^{e-6}	1.527 ^{e-6}
β	7.978 ^{e-4}	1.031 ^{e-4}
α_{eH}	-1.777 ^{e-6}	9.253 ^{e-7}
α_{NeL}	-6.135 ^{e-6}	9.238 ^{e-7}
α_{NeH}	-9.275 ^{e-6}	9.251 ^{e-7}

Sur la seconde période, les tests de rapport de vraisemblance réalisés sur les différents modèles montrent qu'il y a toujours un effet de l'éclaircie et du haubanage (p-value<0.001).

La comparaison entre les différents traitements permet de dire qu'il n'y a toujours pas de différence liée à l'augmentation des stimulations biomécaniques pour les arbres éclaircis (p-value=0.06). En revanche l'éclaircie permet de doubler la vitesse de croissance (p-value<0.01). Pour les arbres non éclaircis, les stimulations biomécaniques apportent un gain en vitesse de croissance de 36% (p-value<0.01).

-3^e période : du jour 177 à la fin

Tableau 8 Estimations des paramètres du modèle de vitesse de croissance sur la troisième période

paramètres	Valeurs	Erreurs standards
Intercept	7.24 ^{e-6}	1.544 ^{e-6}
β	1.248 ^{e-4}	1.042 ^{e-4}
α_{eH}	-3.32 ^{e-6}	9.355 ^{e-7}
α_{NeL}	-8.235 ^{e-6}	9.339 ^{e-7}
α_{NeH}	-8.308 ^{e-6}	9.353 ^{e-7}

Sur la troisième période, la comparaison entre les différents traitements montre qu'il n'y a plus de différence entre les arbres non éclaircis haubanés et non éclaircis libres (p-value =0.93) à cause de l'arrêt de croissance. Il y a cette fois une différence entre les arbres éclaircis libres et éclaircis haubanés (p-value<0.001). Les stimulations biomécaniques des arbres éclaircis libres augmentent de 60% la vitesse de croissance en comparaison avec les arbres éclaircis haubanés.

4. Discussion des résultats

4.1 Déformations

Les résultats concernant les déformations se basent sur un pas de temps assez large (30 min). Ils reposent sur l'hypothèse que la vitesse de vent maximale mesurée sur le pas de temps correspond à la déformation maximale mesurée sur ce même pas de temps. Or le vent est complexe à caractériser, la fréquence des rafales a par exemple un rôle important dans la mise en mouvement de l'arbre (Sellier et al. 2008), et le vent est localement très variable. L'espacement physique entre les mesures de vents et les arbres du dispositif ne permettent pas d'étudier les déformations à l'échelle de la rafale. Une analyse plus mécaniste avec un pas de temps plus fin est certainement nécessaire pour mettre en évidence les effets des variables morphologiques acquises au Lidar.

Les déformations perçues par un arbre soumis au vent sont (Fournier et al. En préparation)

$$\varepsilon(X) = \frac{16 \rho_{air} G C_d A U^2 (H_w - X)}{\pi D(X)^3 E}$$

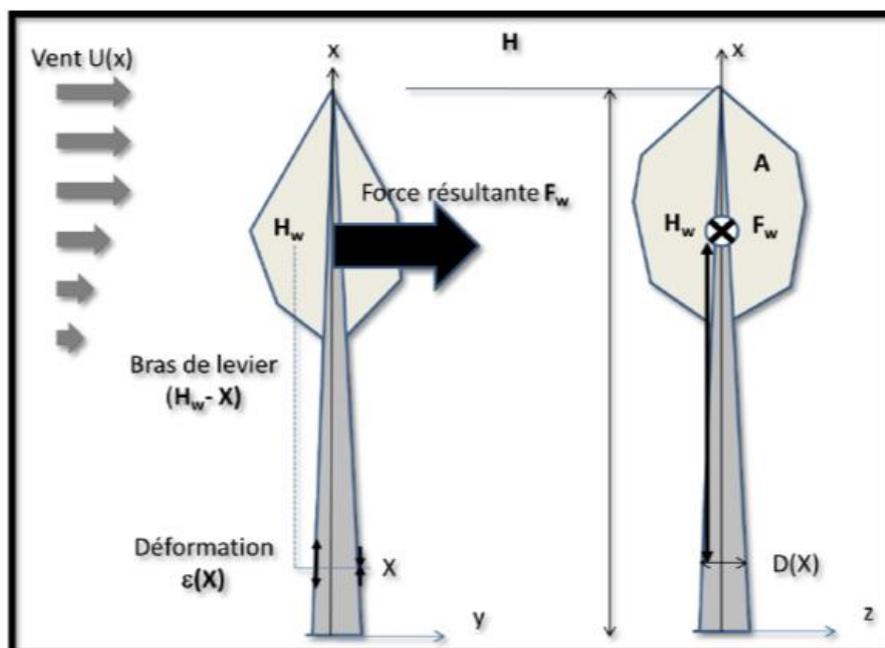


Figure 32 Caractéristique du vent et de l'arbre avec A la surface du houppier, C_d le coefficient de traînée du houppier, $D(X)$ le diamètre à la hauteur X, E le module d'élasticité en flexion du bois à l'état vert et parallèle au fil, G le facteur de rafale, H_w la hauteur au point d'application de la force de traînée, U la vitesse horizontale du vent, ρ_{air} la densité de l'air.

L'essai d'intégration de variables explicatives morphologiques acquises au Lidar terrestre (diamètre, hauteurs, volume du houppier, surface et densité du houppier) ne s'est pas révélé pertinent. Le diamètre intervient pourtant à la puissance 3 dans la formule théorique du calcul des déformations (Fournier et al. En préparation), il devrait donc être un facteur explicatif important du point de vue de la variabilité inter arbre.

Il y a plusieurs explications possibles à cela. Le peuplement est très régularisé et lors de l'échantillonnage toutes les précautions ont été prises pour minimiser la variabilité, le design expérimental n'est donc pas conçu pour mettre en évidence les effets de ces variables morphologiques en avant. De plus les régressions linéaires multiples (non présentées), mettant en relation le diamètre avec la hauteur ainsi que les variables de description du houppier à un niveau donné, présentent des r^2 toujours supérieurs à 0.6 et souvent proches de 0.7. Cela met en avant une certaine corrélation entre le diamètre et les variables morphologiques imputable au traitement régulier. Les mesures de vent (au carré dans la formule Figure 32) étant effectuées au centre dispositif, il est possible que la vitesse de vent mesurée ne soit pas exactement celle s'appliquant au houppier de l'arbre. Il est de même difficile de caractériser le facteur de rafale. Au final, sur le dispositif, la variabilité due aux mesures de vent est certainement supérieure à celle due aux variables morphologiques. Pour mettre en évidence l'effet de la morphologie de l'arbre sur les déformations perçues, un dispositif en futaie irrégulière serait certainement plus adapté.

Sur la période hors feuille le faible nombre d'observations ne permet pas vraiment de conclure quant aux différences de déformations perçues entre les différents traitements. Les arbres éclaircis intermédiaires bougent plus que les arbres éclaircis et les arbres éclaircis bougent à peine plus que les arbres non éclaircis. Une année de mesures supplémentaires est donc nécessaire pour trancher. Il est admis que les peuplements récemment éclaircis sont plus sensibles aux dégâts de tempêtes (souvent hivernales), feuillus y compris. Il est cependant possible qu'hors feuille la porosité du houppier, et du couvert en général, soit suffisamment forte pour qu'il n'y ait pas de grosse différence entre la prise au vent des arbres non éclaircis et celle des arbres éclaircis pour des vents chroniques. Cela signifierait aussi que l'effet des chocs entre les arbres est négligeable hors feuille, du fait justement de la porosité du couvert. Cela est certainement différent pour des arbres au houppier plus proéminent.

Sur la période en feuille, le fait que les arbres non éclaircis bougent moins que les éclaircis concorde avec les résultats observés sur de l'Epicéa de Sitka (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr) (Hale et al. 2012) et peut s'expliquer de deux façons conjointes. Le détournage augmente directement la prise au vent et donc la force de traînée s'appliquant au houppier. Le détournage limite la collision entre les houppiers et permet des déformations plus fortes (Webb et al. 2013). Les déformations augmentent lorsque la compétition diminue et ce en relation avec l'intensité de l'éclaircie ($\alpha_{NeF} < \alpha_{eintF} < \alpha_{eF}$). Ce résultat concorde avec celui de Hale et al. 2012. On peut cependant penser qu'au-delà d'une certaine intensité d'éclaircie l'arbre ne se déforme pas plus, le seuil reste à définir.

Il serait également intéressant de savoir à quel point les caractéristiques du vent peuvent-être localement affectées par la taille et la forme des détournages effectués. De même il n'est pas forcément sûr qu'une éclaircie en plein ou systématique modifie le vent de la même façon qu'une éclaircie sélective.

L'analyse des valeurs des paramètres β d'orientation du vent (Tableau 3 Estimations des paramètres du modèle de déformation) révèle des valeurs assez faibles pour les vents à dominance de Sud et beaucoup plus élevées pour les vents à dominance Nord-Ouest. Il est possible que les arbres se déforment moins sur les vents les plus fréquents du fait d'une acclimatation mécanique mais aussi physique par l'érosion et reconfiguration du houppier (Vogel 1989). Cependant il y a assez peu de répétition à caractéristique de vent équivalente pour certaines directions, ce qui implique de rester très vigilant sur cette observation.

4.1 Croissance et vitesse de croissance

La croissance observée sur les arbres non éclaircis est cohérente avec les mesures de largeur de cernes réalisées sur les arbres prélevés lors de l'éclaircie. Les observations faites sur cette saison de végétation, malgré la sécheresse prononcée, n'ont rien d'exceptionnelles et sont bien représentatives de la croissance normalement observée.

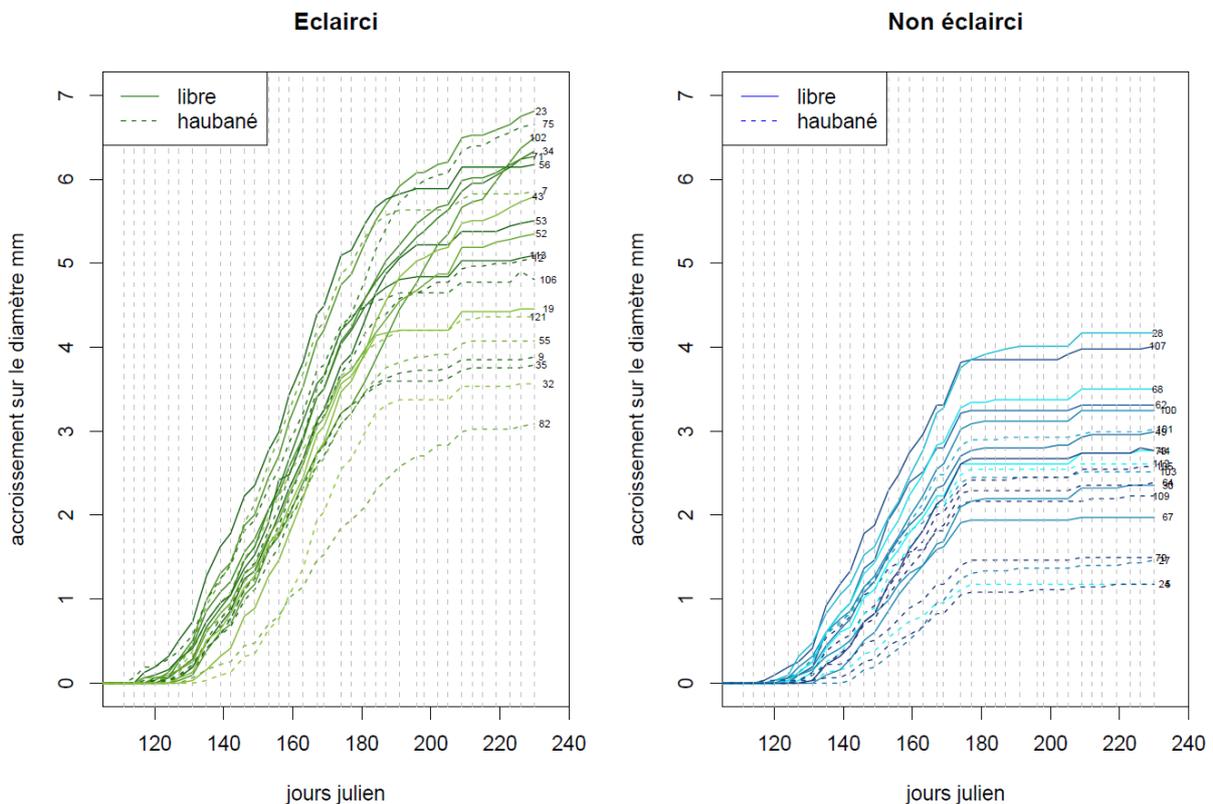


Figure 33 *Accroissement en diamètre cumulé sur la période d'étude*

Les arbres éclaircis haubanés présentent une variabilité plus importante pour la réponse en croissance que les éclaircies libre. Il est possible que l'absence de stimulations biomécaniques laisse exprimer le potentiel de croissance propre à chaque arbre et que la perception des stimulations induise une réaction qui nivelle la variabilité sur la croissance en diamètre.

L'éclaircie augmentant de 30% les stimulations biomécaniques on aurait pu s'attendre à une augmentation de la croissance due à ce gain de stimulation plus forte que les 3% observée. Ce résultat ne permet pas de dire que le vent, en provoquant des stimulations biomécaniques plus fortes, soit un facteur important dans la réaction en croissance en diamètre suite à l'éclaircie. Cependant les résultats de croissance ne sont pas issus d'une saison de végétation complète, l'écart réel entre arbre haubané et libre devra être déterminé en fin de saison de végétation puis mesuré les années suivantes. Le suivi sera crucial dans la validation des résultats puisqu'il est connu que l'effet de l'éclaircie sur la croissance n'est pas maximal la 1^{ère} année.

Les résultats sur la croissance en fin de période ne permettent pas de trancher sur l'indépendance et l'additivité (Mitchell 2003) ou non (Henry, Thomas 2002) des effets stimulations biomécaniques et des effets de la levée de concurrence. Cependant l'étude de la vitesse de croissance permet peut-être d'apporter quelques éléments de réponse. On considère par la suite que les stimulations biomécaniques permettent d'allouer plus de croissance dans le diamètre du tronc que dans d'autres compartiments de l'arbre (houppier, racines,...). Les différences entre traitements émergent au fil de la saison de végétation, on peut remarquer 3 périodes :

- première période :

La croissance débute, seuls les arbres non éclaircis et haubanés présentent une croissance inférieure aux autres groupes. Les stimulations biomécaniques sont responsables de cette différence de vitesse de croissance, cependant, il n'y a pas de différence entre les arbres éclaircis libre et éclaircis haubanés.

Sur cette période les effets ne sont pas additifs. On peut penser que pour les arbres éclaircis, c'est l'effet de l'éclaircie qui génère le surplus de vitesse de croissance et non l'effet des stimulations biomécaniques. L'effet des stimulations biomécaniques intervient uniquement dans la comparaison des traitements où il y a le plus de stress. Les arbres non éclaircis subissent la forte concurrence des voisins, la lutte pour la survie passe d'abord par la croissance en hauteur (Cannell et al. 1984). L'arbre ne privilégie pas la croissance en diamètre. Or la stabilité étant également un enjeu important pour la survie de l'arbre, les stimulations biomécaniques perçues permettent d'induire une croissance minimale en diamètre. Cette réaction est forte puisque sur cette période elle équivaut à l'effet de l'éclaircie.

Pour les arbres éclaircis, l'effet des stimulations biomécaniques ne joue pas puisqu'aucun stress ne vient distordre l'allocation de croissance. Cela signifie aussi que l'arbre est acclimaté aux stimulations qu'il perçoit. Les stimulations biomécaniques supplémentaires induites par l'éclaircie restent trop faible pour déclencher une réaction de stress qui se traduiraient par une réaction de croissance sur le diamètre (Bonnesoeur et al. en préparation).

-deuxième période :

La croissance est lancée, les arbres éclaircis se détachent maintenant des arbres non éclaircis libres et haubanés. L'interprétation faite pour la première période reste valable au détail près que cette fois l'effet de l'éclaircie devient supérieur à l'effet des stimulations biomécaniques observé entre les deux traitements éclaircis. Les arbres éclaircis profitent maintenant entièrement de la levée de concurrence pour exploiter pleinement leur potentiel de croissance, les stimulations biomécaniques ne sont toujours pas assez fortes pour induire une réaction de croissance significativement différente sur le diamètre des arbres éclaircis libres.

-troisième période :

Cette période est caractérisée par une sécheresse importante et donc par l'assèchement des réserves utiles. Les arbres non éclaircis, du fait de la concurrence avec les arbres voisins, s'arrêtent de croître subitement alors que les arbres éclaircis ralentissent. Ce ralentissement survient cette fois avec une différence marquée entre les arbres éclaircis libres et haubanés. Les arbres ne perçoivent pourtant pas plus de stimulations biomécaniques mais on peut penser que durant cette période de stress, les

arbres éclaircis libres allouent plus de croissance en diamètre afin d'assurer leur stabilité. On peut supposer que les arbres éclaircis haubanés privilégient le développement racinaire. Sur cette période l'effet des stimulations biomécaniques n'est pas additif puisqu'il n'est plus présent pour les arbres non éclaircis qui ne poussent plus.

Ainsi sur ces 3 périodes on remarque que l'effet des stimulations biomécaniques n'intervient qu'en situation de stress et dépend de l'état général de stress de l'arbre (concurrence pour les non éclaircis, sécheresse pour les éclaircis). La réaction aux stimulations biomécaniques ne se fait que lorsque la part de croissance allouée au diamètre (permettant d'assurer la stabilité à long terme) se retrouve en concurrence avec un autre besoin vital (croissance en hauteur, croissance racinaire). On ne peut donc pas parler d'effet purement additif puisque l'additivité de l'effet biomécanique dépend de l'état de stress de l'arbre. Le suivi de la croissance en hauteur et du ratio hauteur sur diamètre devrait permettre de clarifier ce phénomène de croissance différentiel déjà mis en évidence (Brüchert, Gardiner 2006). Les résultats de croissance observés à la fin de la période d'étude ne permettent pas d'identifier ces réactions aux stress. S'il n'y avait pas eu de sécheresse, il n'y aurait peut-être pas non plus eu de différence entre les arbres éclaircis libres et haubanés.

De plus lorsqu'on compare l'effet final des stimulations biomécaniques chez les arbres non éclaircis et chez les arbres éclaircis, on compare en fait des réactions à des stress de nature différente. Ils sont de fait non comparables mais restent néanmoins indissociables. On ne peut pas chercher un effet des stimulations biomécaniques sur la croissance des arbres non éclaircis en situation de sécheresse s'ils se sont déjà arrêtés de croître à cause de la combinaison de la sécheresse et de la compétition. Peut-être est-il illusoire, avec le dispositif actuel, d'essayer de caractériser l'effet du gain de stimulation biomécanique en le comparant à des arbres non éclaircis. Pour mettre en évidence un tel effet, il faudrait pouvoir maîtriser le niveau de déformations des arbres, et lors d'une éclaircie maintenir certains arbres au niveau de déformation qu'ils avaient avant l'éclaircie. Il serait également intéressant d'essayer d'intégrer les variables climatiques dans le modèle, notamment le vent, et même pourquoi pas les données de déformations comme pour le « Sum of Strain Sensing model » (B. moulia, et al. 2011). Pour ce faire il faudrait utiliser des dendromètres électroniques (permettant de suivre la croissance en continue) et descendre à un pas de temps plus faible.

4.2 Acclimatation des arbres au vent

L'éclaircie a été effectuée juste avant le début de la saison de végétation, or les réactions de croissance se produisent suite à des stimulations biomécaniques perçues en saison de végétation comme en dormance (Lundqvist, Valinger 1996). Or les plus forts coups de vents surviennent en hiver. Un certain recul est donc nécessaire pour prendre en compte la période de dormance avant de trancher sur ces résultats. Cependant il est possible que l'éclaircie n'apporte pas suffisamment de stimulations biomécaniques supplémentaires pour déclencher une réaction de croissance puisqu'il a été montré que les arbres répondent à la fréquence des stress mécaniques de façon exponentiellement décroissante (Telewski, Pruyn 1998). La réaction aux stimulations biomécaniques perçues en saison de végétation est rapide et bien marquée puisque la croissance des arbres non éclaircis haubanés est ralentie dès le début de la saison de végétation.

Il faut continuer de s'interroger sur la quantification des signaux qui déclenchent cette réaction de croissance, est-ce la perception continue d'une moyenne, d'un maximum, d'un seuil, d'une fréquence ? Mais aussi dans quelle mesure l'arbre est-il capable de percevoir ces signaux, de s'acclimater, voire de perdre son acclimatation. L'expérimentation porte sur des perches de futaie régulière présentant un ratio hauteur sur diamètre élevé et homogène. Or la formule théorique des déformations perçues par un arbre implique le diamètre à la puissance 3 et la hauteur à la puissance 1 (Figure 32). On peut donc penser qu'au-delà de certaines dimensions l'arbre est moins sensible à ces signaux. Notre échantillon est probablement trop homogène pour déceler des effets morphologiques dans la réponse au vent. Il est donc important de répéter ce type de dispositif sur des arbres d'espèces, d'âge et de statuts différents.

Le suivi du dispositif devrait permettre de statuer sur l'impact du vent sur les autres composantes de la croissance d'un arbre (hauteur, volume de houppier, racine,...) car la croissance induite par les stimulations biomécaniques doit forcément se faire au détriment d'autres organes. Les études se basant sur le haubanage d'arbres montrent une forte croissance juste au-dessus du point de haubanage (Moore et al. 2014; Hale et al. 2012). Le haubanage des arbres du dispositif est effectué à la base du houppier, il est possible que les résultats sur la croissance en hauteur et la croissance du houppier soient mitigés du fait des stimulations biomécaniques perçues dans le houppier. La forme du houppier forçant le point de haubanage à être plus bas pour les feuillus que ce qui peut être fait pour les résineux.

Plus généralement, il est clair que les stimulations biomécaniques créées par le vent ont un impact non négligeable sur l'allocation en croissance en diamètre. Alors que la région d'étude peut être considérée comme peu ventée on observe un gain de plus de 40 % de croissance en surface terrière dû au vent. Cet effet peut sûrement être plus important dans des conditions plus venteuses. La réaction de croissance induite par les stimulations biomécaniques s'effectue sur le bois de printemps (Bruce et al. 2012), pour l'Épicéa de Sitka (*Picea sitchensis* L.), cela induit des cernes moins dense. Le Hêtre (*Fagus sylvatica* L.) possède un bois beaucoup plus homogène, il ne devrait pas y avoir de grosses différences entre la densité des cernes des arbres haubanés et libres mais cela reste à vérifier.

Conclusion

Les hypothèses i) Le haubanage réduit la croissance des arbres dès la première année et ii) l'éclaircie augmente l'intensité des déformations perçues par les arbres, peuvent être validées. Cependant l'hypothèse iii) l'exposition accrue au vent des arbres éclaircis augmente leurs croissances en diamètre, reste en suspens. En effet l'augmentation des déformations de 30% suite à l'éclaircie n'a pas provoqué de gain de croissance supplémentaire conséquent (3%). Les stimulations biomécaniques semblent jouer un rôle clé sur la croissance surtout en période de stress. Les déformations perçues sont tout de même responsables d'une grande part (43%) de l'accroissement observé suite à l'éclaircie.

Ces résultats mettent en évidence que les arbres perçoivent le vent et s'y acclimatent en modulant leurs mécanismes de croissance. Cela implique d'être prudent quant à l'estimation du volume ou de la fertilité stationnelle à partir de modèle ou de table ayant le diamètre comme variable d'entrée, car leurs établissements ne tiennent pas compte de cette variabilité induite par le vent. Cette vigilance doit être décuplée lorsqu'il s'agit de comparer la productivité de peuplements éloignés et/ou exposés différemment. Cela vaut aussi lors de l'observation de variations de croissances interannuelles, puisque la réaction aux stimulations biomécaniques perçues diffère selon la nature et l'intensité des stress (compétition, sécheresse).

Vent Eclair apporte des preuves, issues d'une expérimentation en milieu naturel, que le vent doit être considéré comme facteur de production. Le suivi du dispositif permettra de tester la durabilité et de quantifier l'effet des stimulations mécaniques sur d'autres aspects de croissances (hauteur, volumes de houppier). Ces éléments sont essentiels pour la bonne compréhension des phénomènes d'acclimatation des arbres au vent et d'interaction vent/sylviculture.

Bibliographie

ACHIM, RUEL et GARNIDER, 2005. Evaluating the effect of precommercial thinning on the resistance of balsam fir. *Revue canadienne de recherche forestière*. 2005. N° 35, pp. 1844-1853.

ALBRECHT et al., 2015. Coupling a tree growth model with a storm damage modeling, conceptual approach and results of scenario simulations. *Environmental Modelling & Software*. 2015. N° 69, pp. 63-76.

ANCELIN, COURBAUD et FOURCAUD, 2004. Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands. *Forest Ecology and Management*. 2004. N° 203, pp. 101-121.

BARTON et BRANDON, 2014. Reduced wind strengthens top-down control of an insect herbivore. *Ecology*. 2014. Vol. 95, n° 9, pp. 2375-2381. DOI <http://dx.doi.org/10.1890/13-2171.1>.

BASTIEN, HEIN et CHAVANE, 2005. Beech silviculture : constraints, implications, management guidelines. [en ligne]. 2005. Disponible à l'adresse : <http://hdl.handle.net/2042/5030>

BECKER, DUBOIS et LE TACON, 1977. Types de station, fructification et installation des semis de Hêtre sur les plateaux calcaires du Nord-Eet. *Revue Forestière Française*. 1977. Vol. XXIX, n° 5, pp. 363-374.

BECKER, 1978. Définition des stations en forêt de Haye potentialités du Hêtre et du Chêne. *Revue Forestière Française*. 1978. Vol. XXX, n° 4, pp. 251-269.

BONTEMPS, J. D. et VALLET, P., 2009. The Growth and Yield model «Fagacees» and its computational CAPSIS environment. [en ligne]. 2009. [Consulté le 4 septembre 2015]. Disponible à l'adresse : <http://cemadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00025463> / Présentation du modèle Fagacées et de son module dans la plateforme logicielle CAPSIS au COST 603 intitulé « Forest models for research and decision support in sustainable forest management ».

BOURIAUD et al., [sans date]. Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce. *Tree Physiology*. Vol. 25, n° 651-660.

BRUCE, GARDINER et GARDINER, 2012. Root, stem and crown responses of *Picea sitchensis* trees to experimental manipulation of photosynthetic area, exposure, and wind movement. *Forest Research Northern Research Station*. 2012.

BRÜCHERT et GARDINER, 2006. The effect of wind exposure on tree aerial architecture and biomechanics of Sitka spruce. *American Journal of Botany*. 2006. N° 93, pp. 1512-1521.

BRUNETTE, CABANTOUS, COUTURE et STENGER, 2009. Assurance, intervention publique et ambiguïté une étude expérimentale auprès de propriétaires forestiers privés. *Economie et prévision*. 2009. N° 4, pp. 123-134.

- BRUNETTE et COUTURE, 2008. Assurance et activités de réduction des risques en foresterie : une approche théorique. *Revue d'Etudes en Agriculture et Environnement*. 2008. N° 86, pp. 57-78.
- BURTON et SMITH, 1972. Guying to prevent wind sway influences loblolly pine growth and wood properties. *USDA Forest Service Southern Research Station*. 1972.
- CANNELL, ROTHERY et FORD, 1984. Competition within stands of *Picea sitchensis* and *Pinus contorta*. *Annals of Botany*. 1984. N° 53, pp. 349-362.
- COUTAND et al., 2008. Mechanical stimuli regulate the allocation of biomass in trees : demonstration with young *Prunus avium* trees. *Annals of Botany*. 2008. N° 101, pp. 1421-1432.
- CUCCHI et al., 2005. Modelling the windthrow risk for simulated forest stands of Maritime pine. *Forest Ecology and Management*. 2005. N° 213, pp. 184-196.
- DHÔTE, 1991. Modélisation de la croissance des peuplements réguliers de hêtre : dynamique des hiérarchies sociales et facteurs de production. *Annales des Sciences Forestières*. 1991. Vol. 48, n° 4, pp. 389-416. DOI 10.1051/forest:19910404.
- DIRECTION GÉNÉRAL DE L'ÉNERGIE ET DU CLIMAT (éd.), 2009. *synthèse : forêt et changement climatique*. 2009.
- DUPONT et BRUNET, 2008. Influence of foliar density profile on canopy flow : a large-eddy simulation study. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2008. Vol. 148, n° 6, pp. 976-990.
- FORTIN, Mathieu, ALBRECHT, Axel, KOHNLE, Ulrich et NINGRE, François, 2014. The Impact of Windstorm Damage in the Assessment of the Carbon Balance in Even-Aged *Fagus sylvatica* L. Stands. *Forests*. 21 avril 2014. Vol. 5, n° 4, pp. 784-801. DOI 10.3390/f5040784.
- FOURNIER, ROGIER, COSTES et JAEGER, 1993. Modélisation mécanique des vibrations d'un arbre soumis aux vents. *Annales des sciences forestières*. 1993. Vol. 50, pp. 401-412.
- GARDINER et al., 2008. A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests. *Forestry*. 2008. N° 81, pp. 447-463.
- GARDINER et al., 2005. The stability of different silvicultural systems : a wind-tunnel investigation. *Forestry*. 2005. Vol. 78, n° 5, pp. 471-484.
- Géographie de la Lorraine — Wikipédia, [sans date]. [en ligne]. [Consulté le 1 mai 2015]. Disponible à l'adresse : http://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9ographie_de_la_Lorraine
- GIECC, 2014. 5: *Volume 3 Changements climatiques 2014 : atténuation des changements climatiques*.
- HALE et al., 2012. Wind loading of trees : influence of tree size and competition. *European Journal of Forest Research*. 2012. Vol. 131, n° 1, pp. 203-217.
- HENRY et THOMAS, 2002. Interactive effects of lateral shade and wind on stem allometry, biomass allocation and mechanical stability in *Abutilon Theophrasti*. *American Journal of Botany*. 2002. N° 89, pp. 1609-1615.

HOLBROOK et PUTZ, 1989. Influence of neighbors on tree form : effects of lateral shade and prevention of sway on the allometry of liquidambar styraciflua (Sweet Gum). *American Journal of Botany*. 1989. Vol. 76, n° 12, pp. 1740-1749.

IF27.pdf, [sans date]. [en ligne]. [Consulté le 24 août 2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.ign.fr/publications-de-l-ign/Institut/Publications/IF/27/IF27.pdf>

IGN, 2013. Sylvoécocorégion C20 Plateaux calcaires du Nord-Est. [en ligne]. 2013. [Consulté le 1 mai 2015]. Disponible à l'adresse : http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/IMG/pdf/C_20.pdf

JAFFE, 1973. the response of plant development to mechanical stimulation. *Planta*. 1973. N° 114, pp. 143-157.

LANQUAYE-OPOKU et MITCHELL, 2005. Probability of stand level empirical windthrow risk models. *Forest Ecology and Management*. 2005. N° 216, pp. 134-148.

LE MOGUÉDEC et DHÔTE, 2012. Fagacées: a tree-centered growth and yield model for sessile oak (*Quercus petraea* L.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Annals of Forest Science*. mars 2012. Vol. 69, n° 2, pp. 257-269. DOI 10.1007/s13595-011-0157-0.

LETTRE PIGB N°15, 2003. *L'évolution des tempêtes en France sur le XXe siècle* [en ligne]. 2003. CNRS. [Consulté le 9 mai 2015]. Disponible à l'adresse : http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim1/biblio/pigb15/08_evolution.htm

LUNDQVIST et ELFVING, [sans date]. Influence of biomechanics and growing space on tree growth in young. *Forest Ecology and Management*. Vol. 260, n° 12, pp. 2143-2147.

LUNDQVIST et VALINGER, 1996. Stem diameter growth of scots pine tree after increased mechanical load in the crown during dormancy and or growth. *Annals of Botany*. 1996. Vol. 77, pp. 59-62.

MENG et al., 2006a. Reducing stem bending increases the height growth. *Journal of Experimental Botany*. 2006. Vol. 57, n° 12, pp. 3175-3182.

MENG et al., 2006b. Preventing crown collisions increases the crown cover and leaf area of maturing lodgepole pine. *Journal of Ecology*. 2006. Vol. 94, n° 3, pp. 681-686.

MINAMINO, Ryoko et TATENO, Masaki, 2014. Variation in susceptibility to wind along the trunk of an isolated *Larix kaempferi* (Pinaceae) tree. *American Journal of Botany*. 1 juillet 2014. Vol. 101, n° 7, pp. 1085-1091. DOI 10.3732/ajb.1400135.

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT (éd.), [sans date]. *politique climatique et efficacité énergétique* [en ligne]. [Consulté le 7 mai 2015]. Disponible à l'adresse : http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Climat_et_PNAEE.pdf

MITCHELL, 2000. Stem growth response in Douglas-fir and Sitka spruce following thinning implications for assessing wind firmness. *Forest Ecology and Management*. 2000. N° 113, pp. 105-114.

MITCHELL, 2003. Effects of mechanical stimulus, shade and nitrogen fertilization on morphology and bending resistance in Douglas-fir seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*. 2003. N° 33, pp. 1602-1609.

- MOORE *et al.*, 2014. The influence of stem guying on radial growth, stem form and internal resin features in radiata pine. *Trees*. 2014. Vol. 28, n° 4, pp. 1197-1207.
- MOULIA *et al.*, 2011. Integrative Mechanobiology of growth and architecture development in changing mechanical environments. *Mechanical Integration of Plant Cells and Plants*. 2011. Vol. 9, pp. 269-302.
- MOULIA et COUTAND, 2002. *Quelques bases simples de mécanique des solides et des structures pour les biologistes et quelques concepts de biomécanique des plantes pour ... tous ?* 2002.
- MOULIA, COUTNAD et JULIEN, 2015. Mechanosensitive control of plant growth: bearing the load, sensing, transducing, and responding. *Frontiers in plant science*. 2015. Vol. 6, n° 52, pp. 1-20.
- ONF, 2014. La phénologie et le climat. [en ligne]. 2014. [Consulté le 1 mai 2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.onf.fr/renecofor/sommaire/resultats/climat/phenologie/20090122-162223-686595/@@index.html>
- PELTOLA *et al.*, 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*. 1999. N° 29, pp. 647-661.
- PERTHUIS, HALLEGATTE et LECOCQ, 2010. *économie de l'adaptation au changement climatique.pdf* [en ligne]. 2010. Conseil économique pour le développement durable. [Consulté le 7 mai 2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/001-3.pdf>
- PIVATO, 2014. *Les interactions vent - forêt en condition de tempête : un modèle couplé prenant en compte la rupture des arbres*. Université de Toulouse.
- PRYOR, S. C., BARTHELMIE, R. J. et KJELLSTRÖM, E., 2005. Potential climate change impact on wind energy resources in northern Europe: analyses using a regional climate model. *Climate Dynamics*. 6 octobre 2005. Vol. 25, n° 7-8, pp. 815-835. DOI 10.1007/s00382-005-0072-x.
- PRYOR, S. C. et BARTHELMIE, R. J., 2010. Climate change impacts on wind energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. janvier 2010. Vol. 14, n° 1, pp. 430-437. DOI 10.1016/j.rser.2009.07.028.
- RAMANUJAM, 2012. *A non linear model for wind-induced oscillations of trees* [en ligne]. 2012. University of Massachusetts. [Consulté le 7 mai 2015]. Disponible à l'adresse : <http://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2065&context=theses>
- SELLIER, BRUNET et FOURCAUD, 2008. A numerical model of tree aerodynamic response to a turbulent airflow. *Forestry*. 2008. N° 81, pp. p279 - p297.
- STOKES, FITTER et COURTS, 1995. Response of young trees to wind and shading effects on root architecture. *Journal of Experimental Botany*. 1995. Vol. 46, n° 9, pp. 1139-1146.
- TELEWSKI et PRUYN, 1998. Thigmomorphogenesis : a dose response to flexing in *Ulmus americana* seedlings. *Tree physiology*. 1998. N° 18, pp. 65-68.

TELEWSKI, 1990. Growth, wood density, and ethylene production in response to mechanical perturbation in *Pinus taeda*. *Canadian Journal of Forest Research*. 1990. Vol. 20, n° 9, pp. 1277-1282.

VOGEL, 1989. Drag and reconfiguration of broadleaves in high winds. *Journal of Experimental Botany*. 1989. Vol. 40, n° 217, pp. 941-948.

WATT *et al*, 2009. Effect of stem guying on the incidence of resin pockets. *Forest Ecology and Management*. 2009. Vol. 258, pp. 1913-1917.

WEBB, RUDNICKI *et* MUPPA, 2013. Analysis of tree sway and crown collisions for managed *Pinus resinosa* in southern Maine. *Forest Ecology and Management*. 2013. Vol. 302, pp. 193-199.

Annexes

Annexe 1: Protocole des placettes.....	45
Annexe 2 : Carte du dispositif	46
Annexe 3 Analyse de sensibilité du volume du houppier sur les 10% supérieur du houppier	47
Annexe 4 Analyse de sensibilité du volume du houppier sur les 50% supérieur du houppier	48
Annexe 5 Analyse de sensibilité sur la taille des voxels sur les 10% supérieur du houppier	49
Annexe 6 Analyse de sensibilité sur la taille des voxels sur les 50% supérieur du houppier	50
Annexe 7 Déformations et prédictions pour les arbres éclaircis	52
Annexe 8 Déformations et prédictions pour les arbres Non éclaircis.....	53
Annexe 9 Déformations et prédictions pour les arbres éclaircis intermédiaire	54
Annexe 10 Estimation de la moyenne de la vitesse de croissance et de l'intervalle de confiance à 95% associé	55
Annexe 11 Modèle de la vitesse de croissance sur la période d'étude	56
Annexe 12 Modèle de la vitesse de croissance sur la première période	57
Annexe 13 Modèle de la vitesse de croissance sur la deuxième période.....	58
Annexe 14 Modèle de la vitesse de croissance sur la troisième période	59

Protocole des placettes du dispositif vent éclair

Juillet 2014

Feuille placettes :

Il faut effectuer 56 placettes ayant pour centre un Hêtre dominant (=arbre échantillon) et un rayon de 4m

Arbre échantillon = arbre dominant repéré avec un ruban orange, rouge ou jaune

n° : numéro pré inscrit sur le plan ou supérieur à 100 si nouvel arbre

C130 : circonférence à 1,3m au ruban au mm près

Arbre concurrent = arbre concurrent de l'arbre échantillon (circonférence pré comptable = 7.8 cm)

Espèce :

Q : chêne

H : hêtre

C : charme

M : merisier

O : orme

F : frêne

ES : érable sycomore

EC : érable champêtre

A : alisier

N : noisetier

Distance : entre l'arbre échantillon et l'arbre concurrent en m mesuré au télémètre

Az : azimut visé de l'extérieur vers l'intérieur de la placette (=de la souche du concurrent vers l'arbre échantillon) en grade

C130 : circonférence à 1,3 m au mm près mesuré au ruban

Statu : D si l'arbre est dominant ou CD si co-dominant

Marque : M si l'arbre est désigné comme concurrent direct

Les arbres limites (en distance) et les arbres concurrents trop éloignés sont également relevés

Feuille plan :

Pour repérer les arbres les uns par rapports aux autres

n° arbre : n° de l'arbre échantillon de départ

n° arbre visé : n° de l'arbre échantillon visé

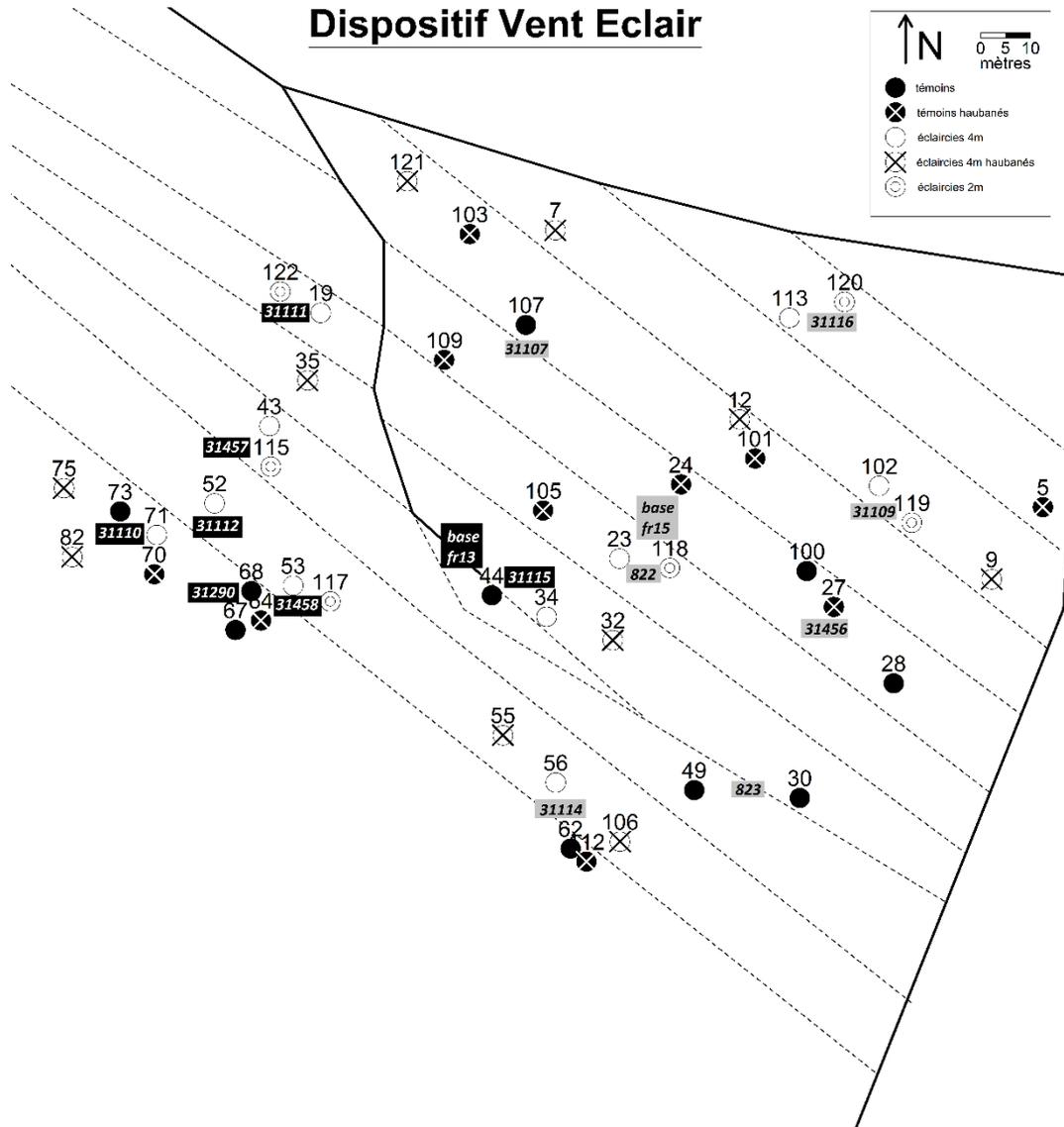
azimut : de l'arbre de départ vers l'arbre visé en grade

distance : en m mesuré au télémètre

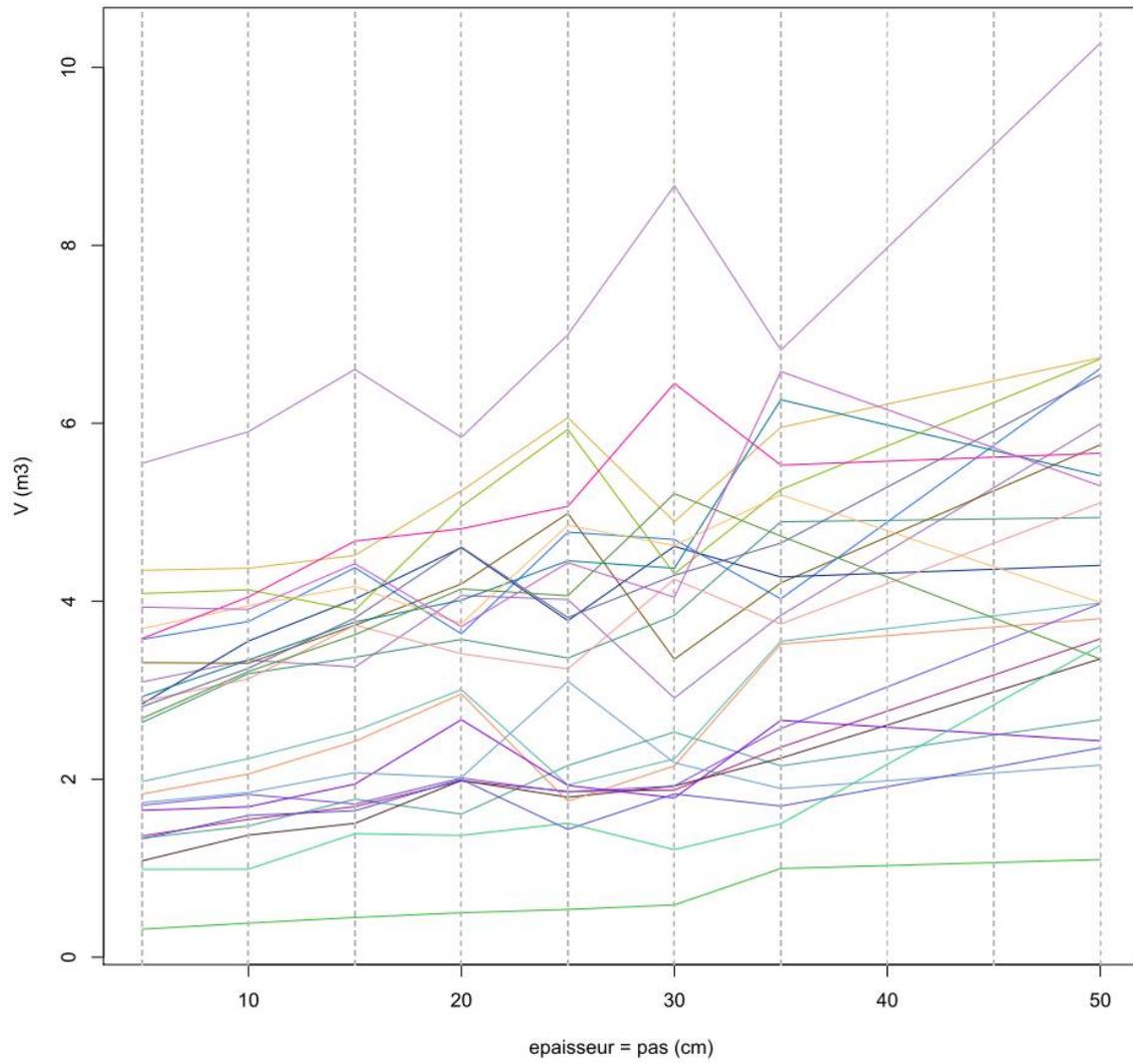
distance au cloisonnement : distance en m entre l'arbre de départ et le milieu du cloisonnement

rencontré si tel est le cas

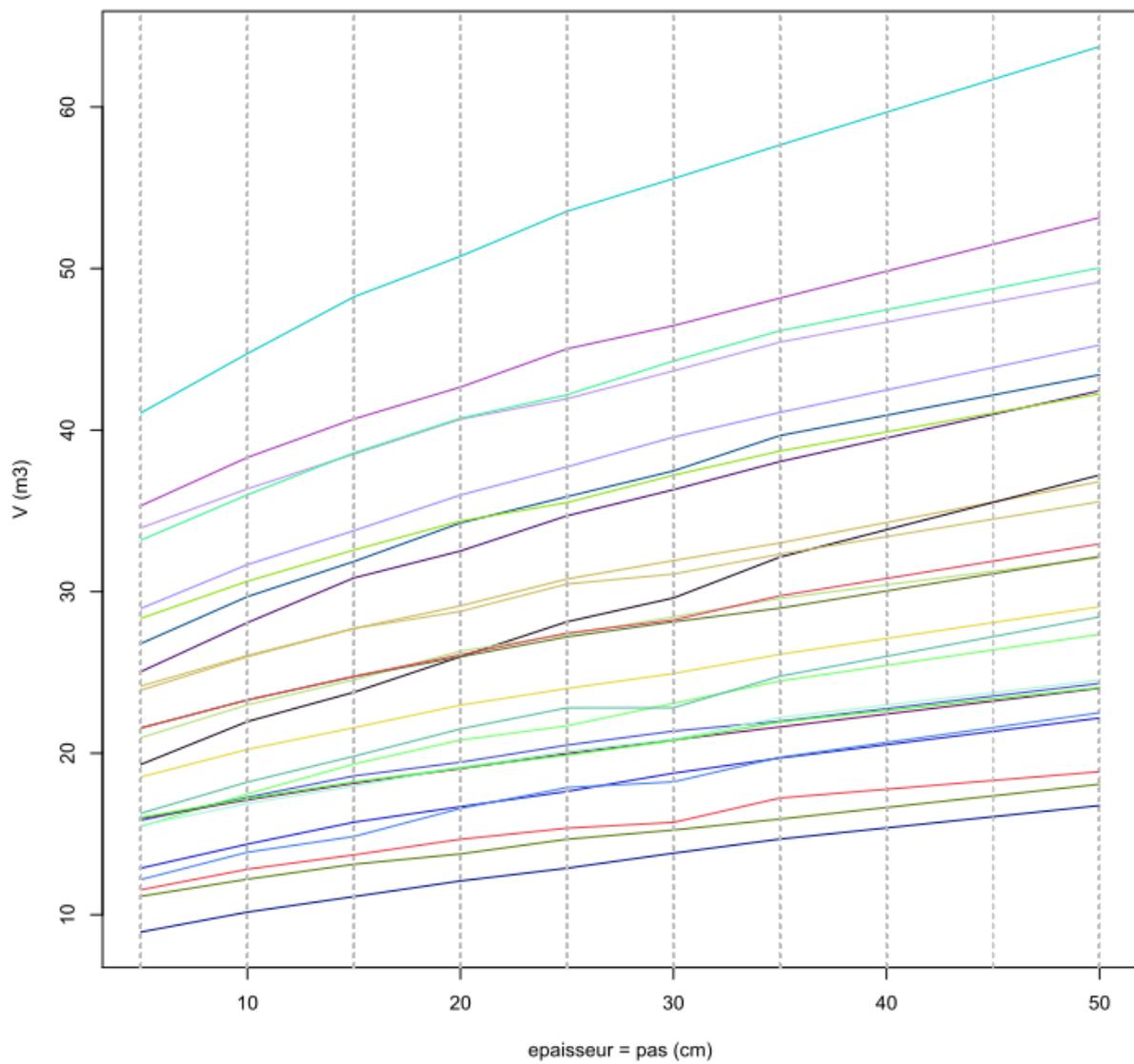
Annexe 2 : Carte du dispositif



analyse sensibilité volume hrel= 0.1

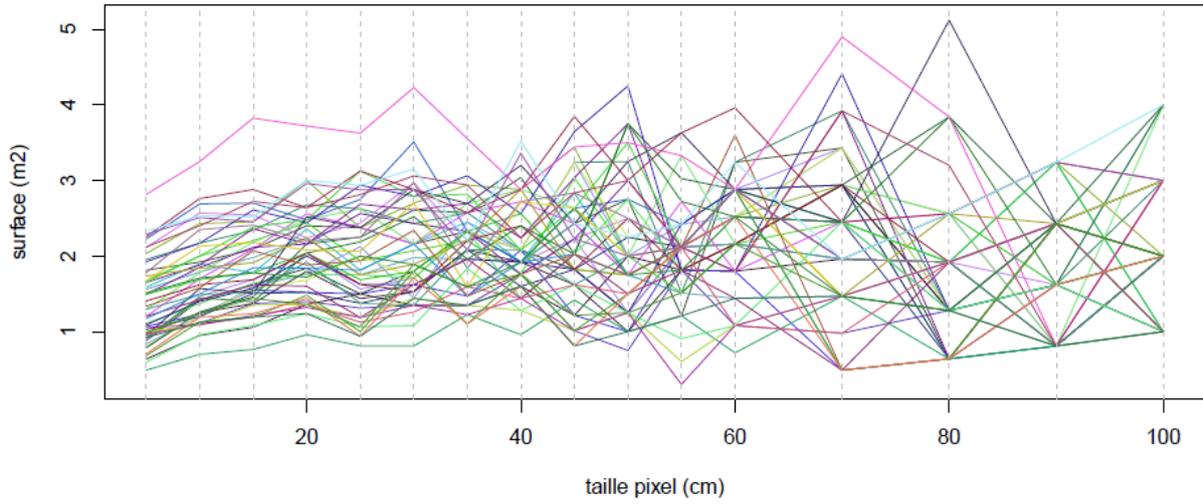


analyse sensibilité volume hrel= 0.5

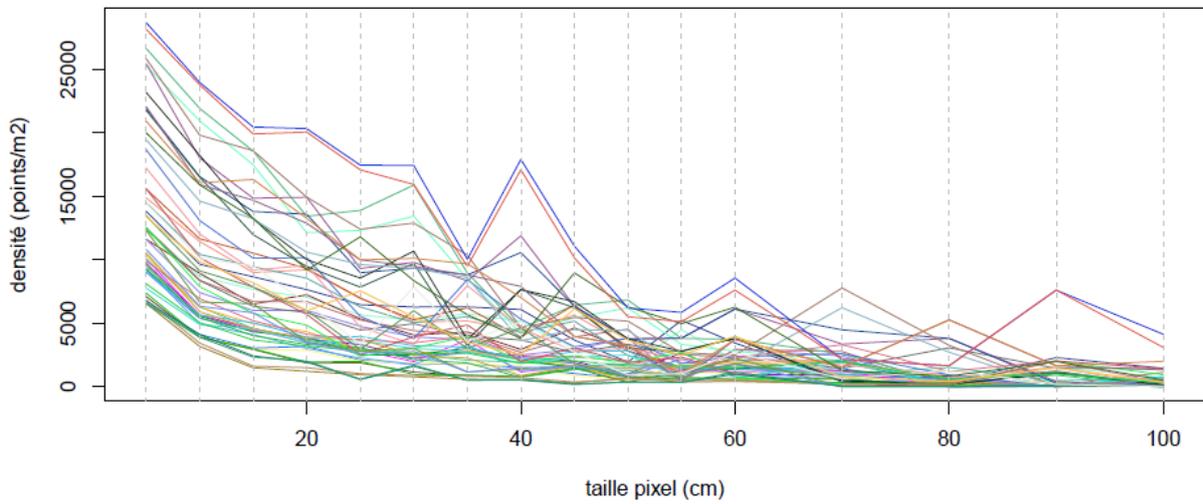


Annexe 5 Analyse de sensibilité sur la taille des voxels sur les 10% supérieur du houppier

Analyse sensibilité surface du houppier densite.1 Hrel

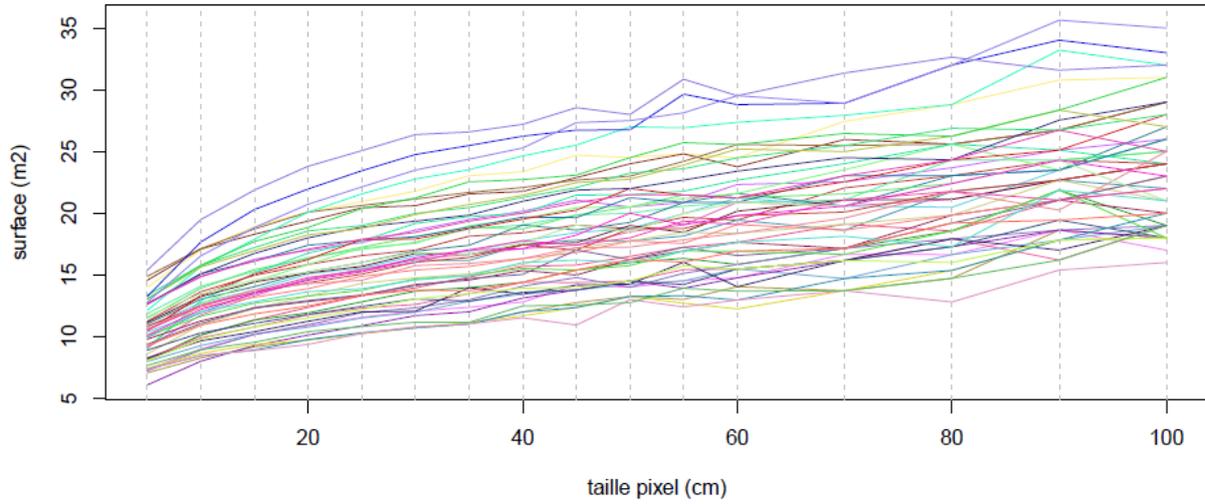


Analyse sensibilité densité du houppier densite.1 Hrel

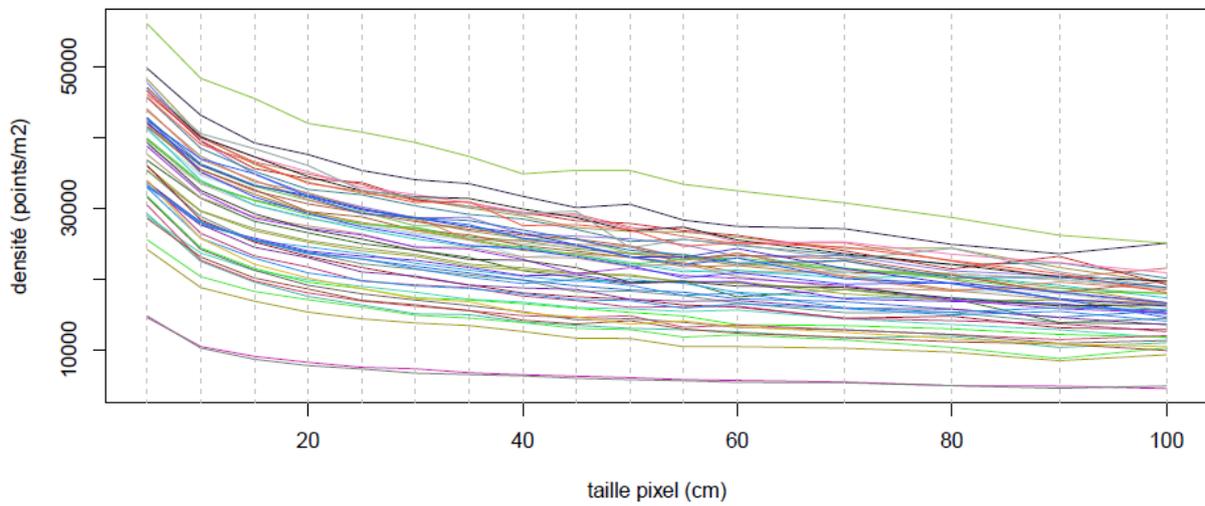


Annexe 6 Analyse de sensibilité sur la taille des voxels sur les 50% supérieur du houppier

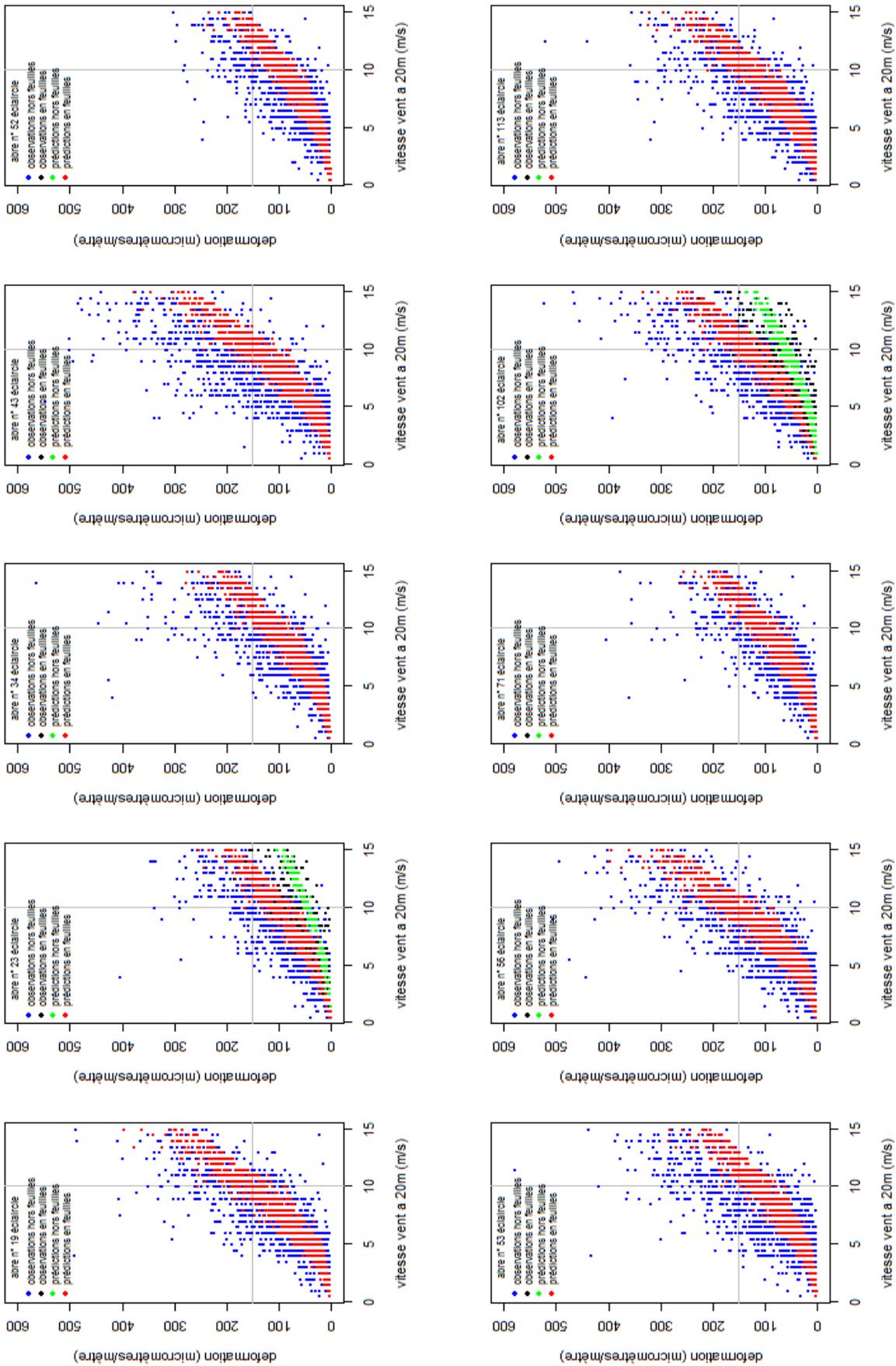
Analyse sensibilité surface du houppier densite.5 Hrel



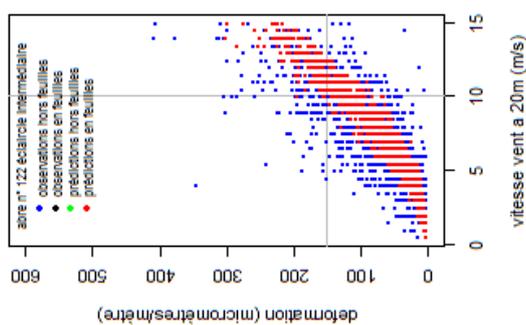
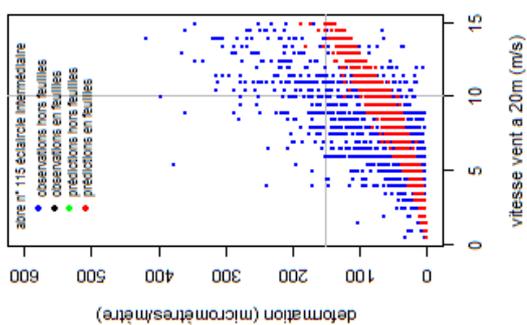
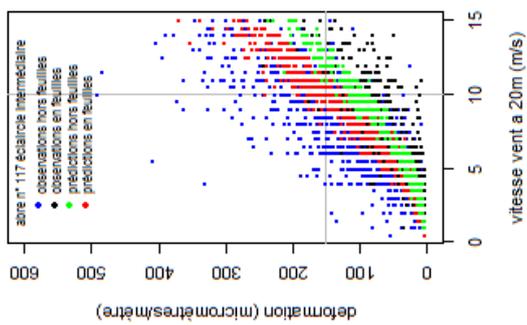
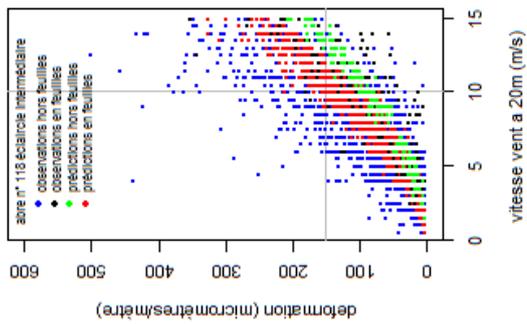
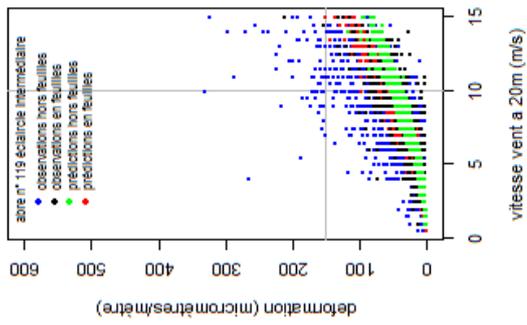
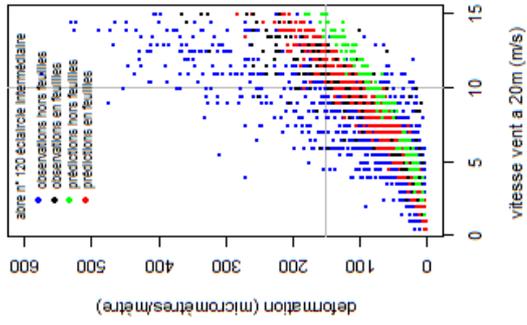
Analyse sensibilité densité du houppier densite.5 Hrel



Annexe 7 Déformations et prédictions pour les arbres éclaircis

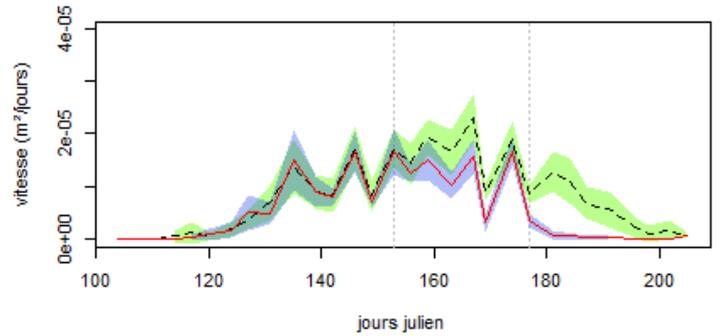
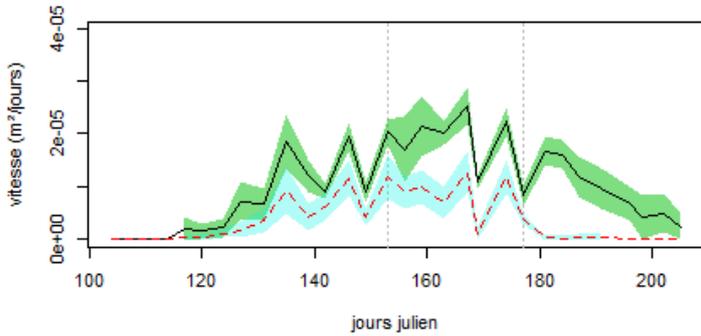
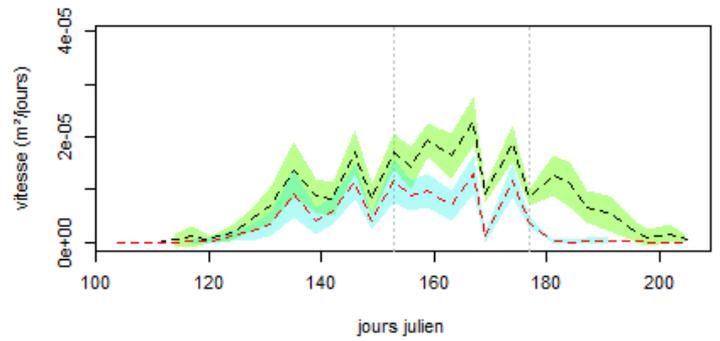
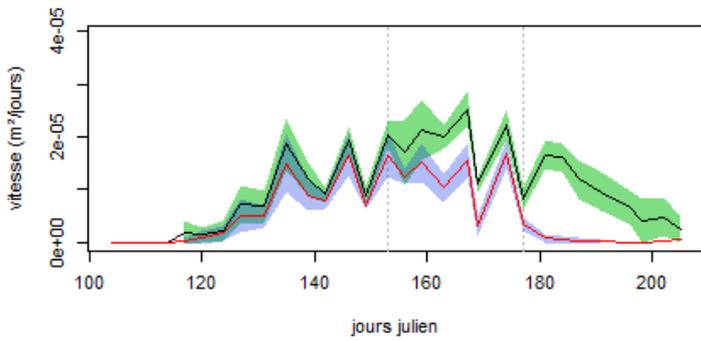
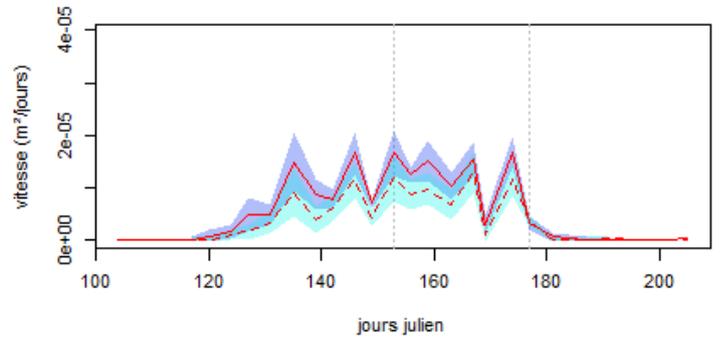
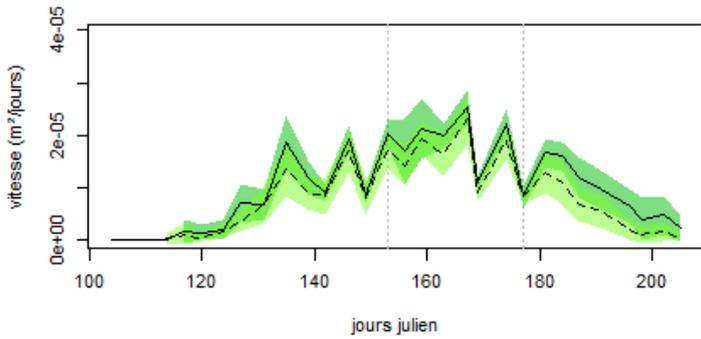
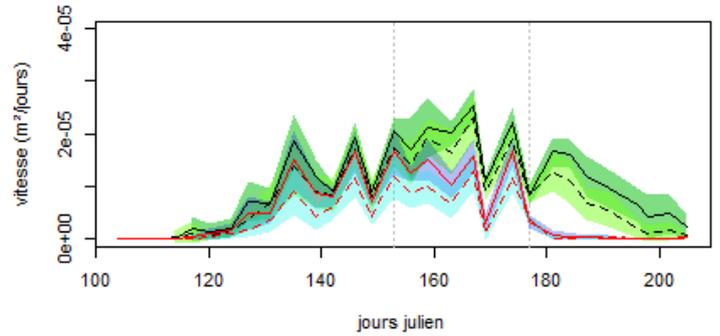


Annexe 9 Déformations et prédictions pour les arbres éclaircis intermédiaire



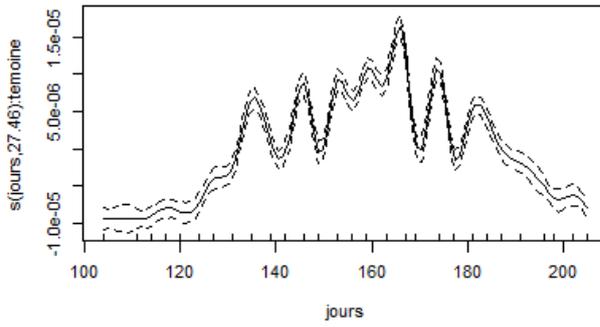
**Vitesse de croissance observée
moyenne par statut**

- éclairci libre
- - - éclairci haubané
- non éclairci libre
- - - non éclairci haubané
- IC95% éclairci libre
- IC95% éclairci haubané
- IC95% non éclairci libre
- IC95% non éclairci haubané
- ⋯ limite de période

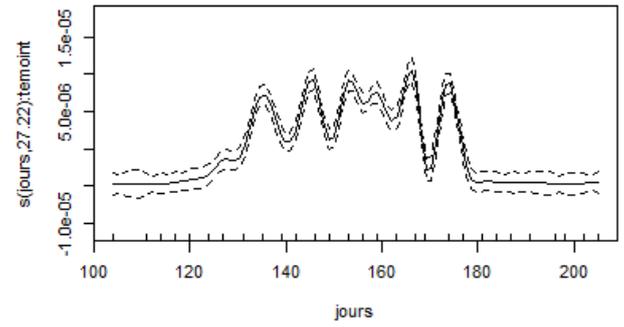


Annexe 11 Modèle de la vitesse de croissance sur la période d'étude

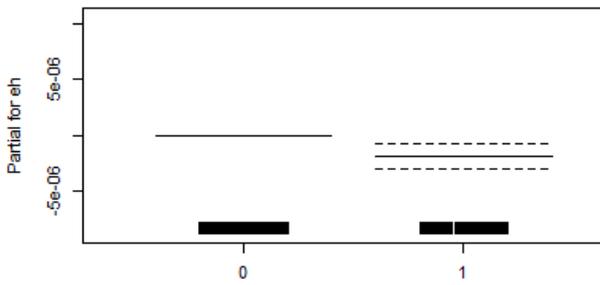
éclaircis



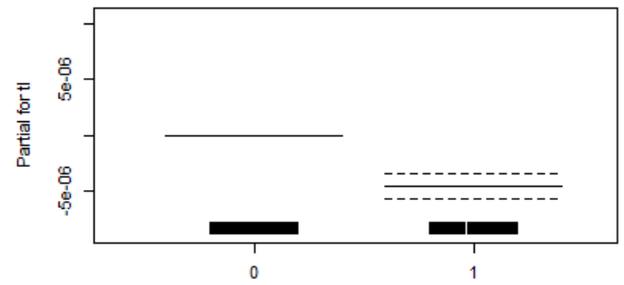
témoins



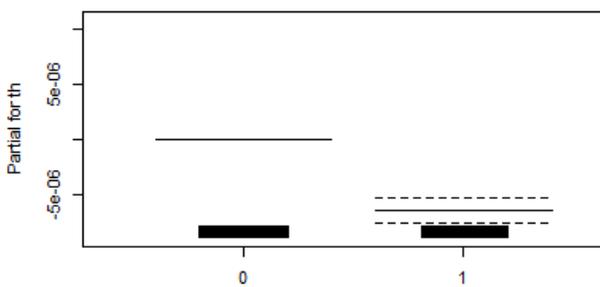
eH



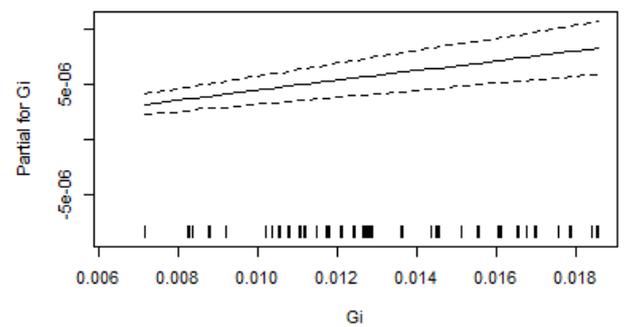
NeL



NeH

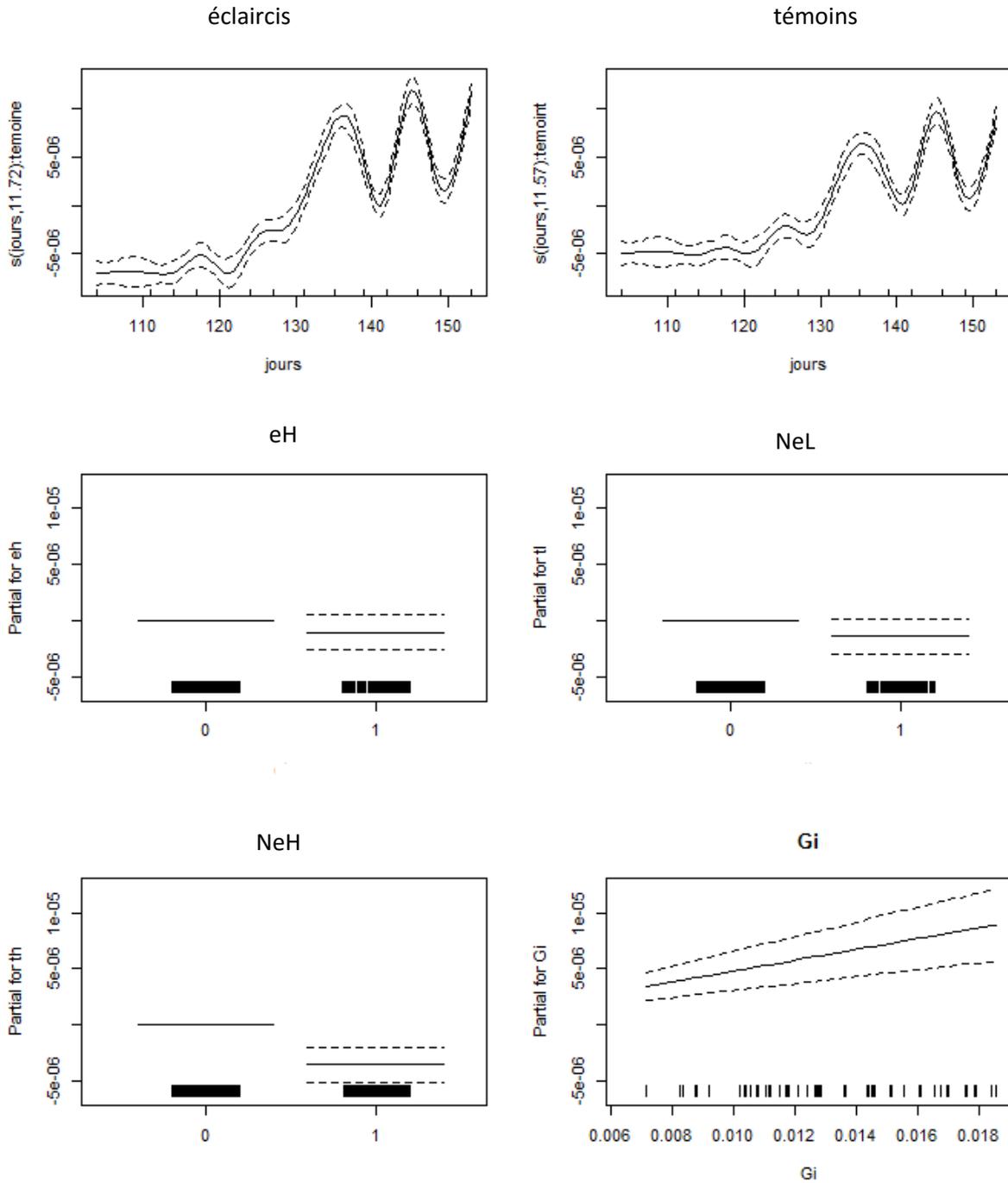


Gi

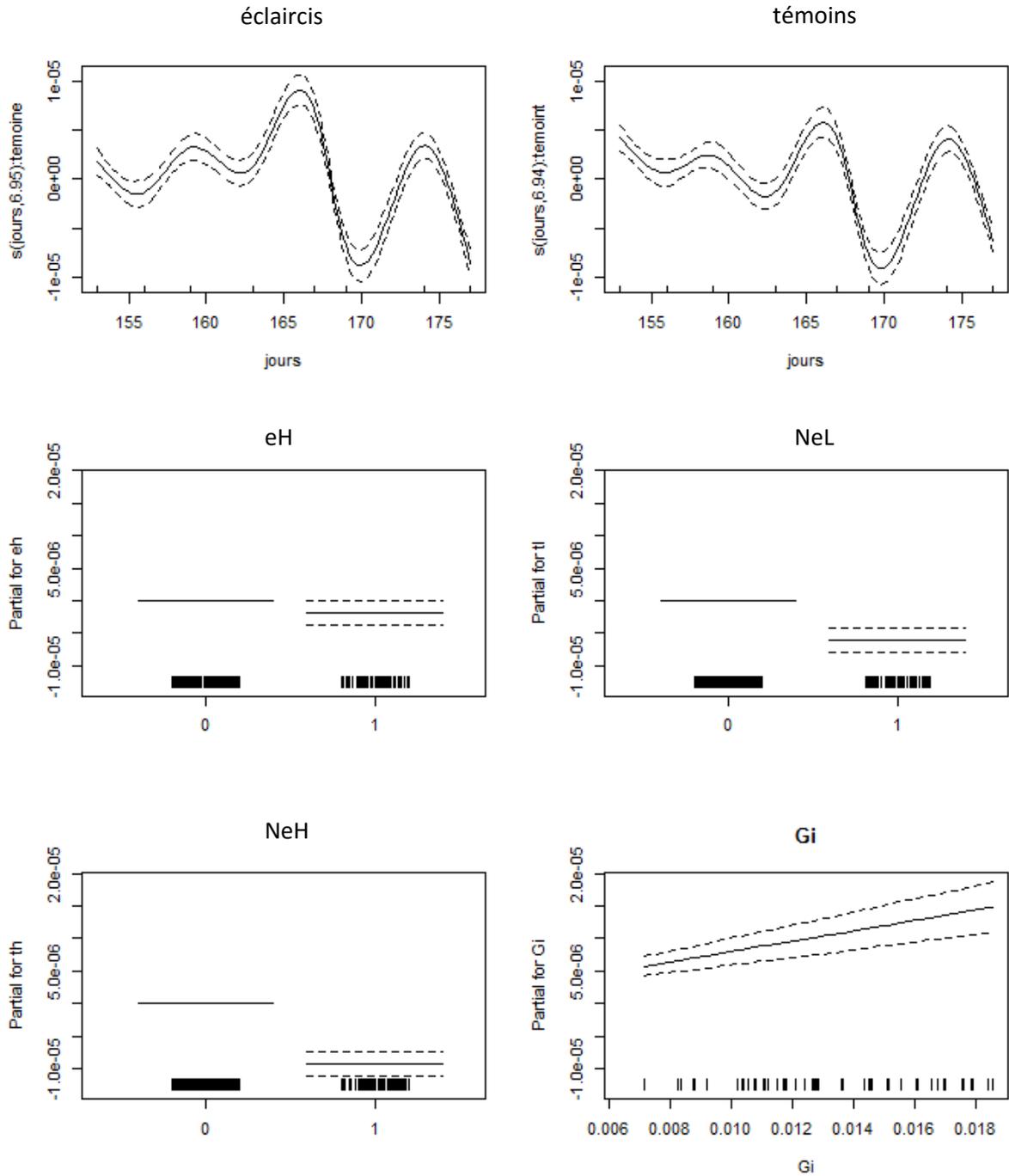


Remarque : α_{eL} est contenu dans l'intercept pour éviter la sur-paramétrisation du model

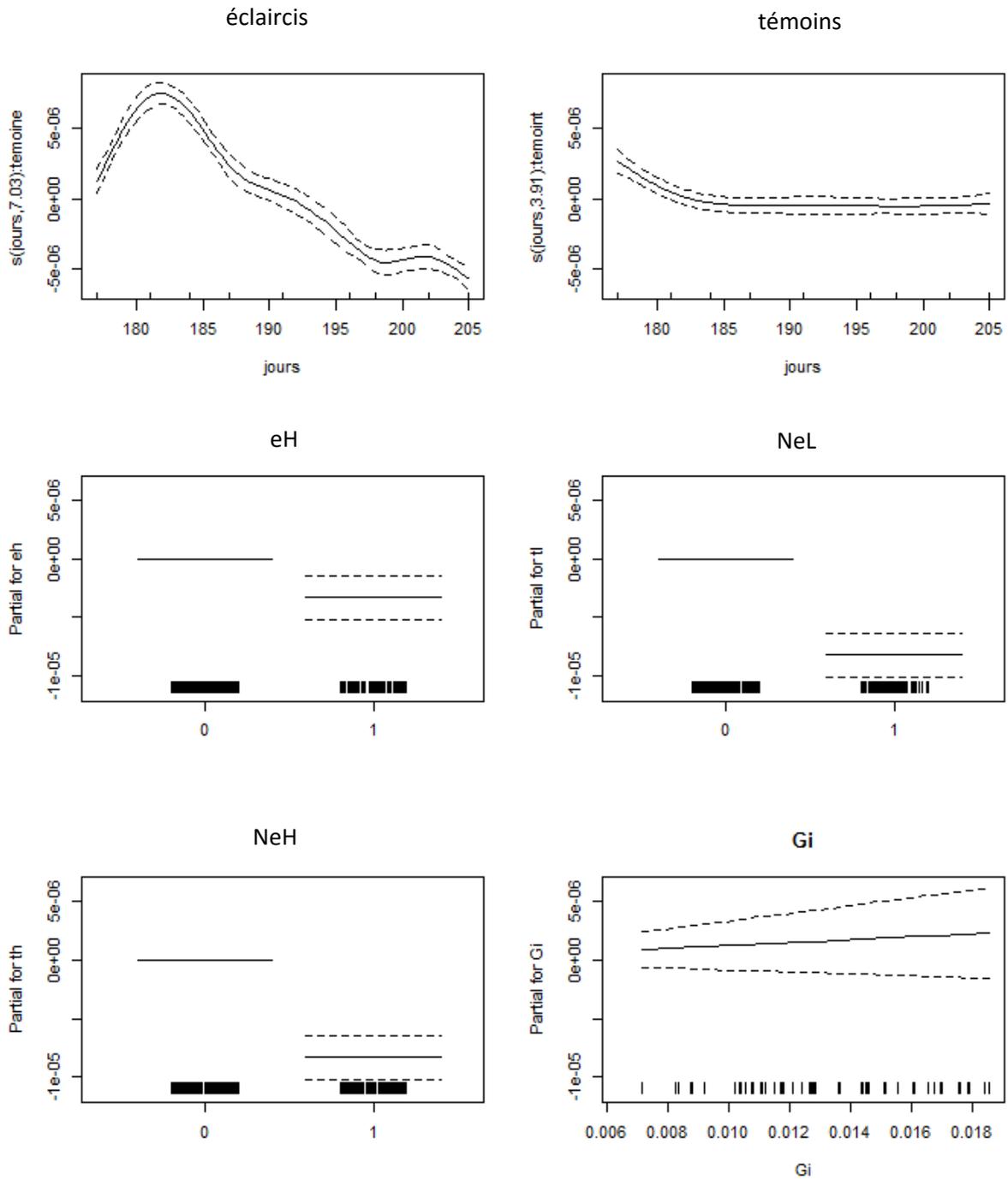
Annexe 12 Modèle de la vitesse de croissance sur la première période



Remarque : α_{eL} est contenu dans l'intercept pour éviter la sur-paramétrisation du model



Remarque : α_{eL} est contenu dans l'intercept pour éviter la sur-paramétrisation du model



Remarque : α_{eL} est contenu dans l'intercept pour éviter la sur-paramétrisation du model