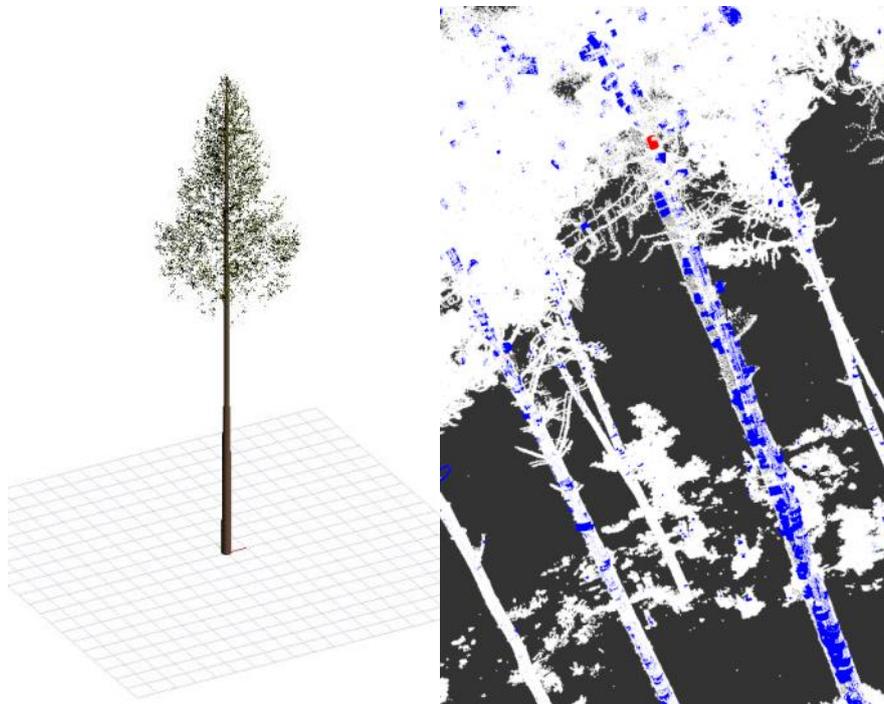


Simulation 3D de peuplements pour l'analyse du transfert du signal LiDAR

Application à des plantations de *Pinus pinaster* (Ait.)



Dominante d'approfondissement :

Gestion forestière

Capture d'écran : simulation individuelle sous Xplo (à gauche) et recomposition de scans LiDAR-T sous COMPUTREE (à droite)

AgroParisTech
Centre de Nancy

AMAP
botanique et
bioinformatique de
l'Architecture
des Plantes)

Simulation 3D de peuplements pour l'analyse du transfert du signal LiDAR

Application à des plantations de *Pinus pinaster* (Ait.)

Mémoire de dominante :

Gestion forestière

Marion JOURDAN

Années 2013-2014

Résumé

Les pouvoirs publiques se sont donnés comme objectif de quantifier et localiser la ressource en biomasse sur leur territoire à moindre coût. Dans ce contexte le projet Stem-Leaf vise à connaître l'influence des variations de grandeurs forestière sur le système LiDAR (Light Detection And Ranging). Cet outil permet de couvrir une grande surface de territoire pour acquérir des données caractérisant la surface terrestre visible du ciel. Une fois que cette influence sera connue, un satellite contenant un capteur sera mis en orbite. Le choix a été fait d'effectuer l'ajustement sur des maquettes représentant plusieurs peuplements en 3D. Cette étude présente le travail fait pour simuler des peuplements de pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) avec AmapSim. Dans ce cas, on considère le peuplement comme un ensemble d'individus distincts interagissant.

On a d'abord fixé le paramétrage à l'échelle individuelle. Les grandeurs suivantes ont été choisies pour le valider : les hauteurs totales et de première branche vivante, la surface de couronne projetée, la surface foliaire totale et le diamètre à 1,3 m. Les réajustements nécessaires sont effectués, en observant l'ajustement du modèle par rapport à chacune de ces variables. Ensuite, on a pu créer des maquettes de peuplement en agrégeant les modèles individuels. Les contraintes qui s'appliquent sur les individus en peuplement dans cette étude sont la gêne stérique et la sylviculture. Les grandeurs choisies comme références à l'échelle du peuplement étaient l'épaisseur de houppier et les caractéristiques de la surface de trouées présentes. Il a été possible de produire des maquettes cohérentes respectant l'ordre de grandeur de la surface foliaire et la hauteur totale. On a aussi montré que le logiciel AmapSim était une alternative satisfaisante pour le travail demandé. La démarche telle qu'elle a été conçue est pertinente dans notre cas d'étude, mais demandera des modifications pour un autre cas.

Abstract

Public authorities have set the objective of quantifying and locating biomass resources on their territory cheaply. In this context the Stem-Leaf project aims to understand the influence of variations in forest's feature LiDAR (Light Detection And Ranging). This tool enables to cover a large surface of territory to collect data which characterizes the visible surface from above. Once effects of variations in forest's feature are known, a satellite containing a LiDAR's sensor will be put into orbit. The choice was made to perform calibration on models representing several 3D simulated stands. This study presents the work that was done to simulate stands of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) with AmapSim. In this case we considered the population as a set of distinct interacting individuals. We first adjusted the individual model. The following variables were selected to validate the individual model: the total height and the height of the first living branch, the projected crown surface, the total leaf area and the diameter at breast height. We adjusted these variables one by one, modifying the model consequently. Then we could create population models with individual models growing together. In this study, the constraints that apply to individuals in population are canopies' timidity and human intervention (forestry). The variables selected as reference are : thickness of the crown and characteristics of the visible soil surface through canopy. It was possible to produce consistent models that met the criteria initially set. It was also demonstrated that the AmapSim software was a good alternative for this type of work. The approach was designed as relevant in our study, but will require changes for another case.

Remerciements

Je tenais à faire ici mes remerciements aux personnes qui m'ont encadré et aidé lors de mon stage de fin d'étude.

Je voulais commencer par dire merci à **Grégoire Vincent** qui m'a permis d'obtenir ce stage à AMAP et m'a aiguillé à chaque fois que cela a été nécessaire.

Je voulais ensuite remercier **Cécile Antin** pour son très bon encadrement et son aide à chaque fois que j'en ai eu besoin durant ces 6 mois.

Il me tient à cœur de remercier **Jean-François Barczi** pour m'avoir aidé à réaliser mes simulations à temps et m'avoir aidé à comprendre et à me servir d'AmapSim, malgré ses quelques retenues sur certains aspects de mon travail.

Un grand merci à **Sébastien Griffon, François de Coligny, Yves Caraglio** et **Alexandre Piboule** pour leur disponibilité tout le long de mon stage et leur soutien technique ou conceptuel.

Je remercie également **Mathieu Fortin** de m'avoir encadré depuis Nancy.

Je voulais également remercier les **UMR Tetis** et plus particulièrement **Eloi Grau** et **Marc Bouvier**, pour la fourniture du jeu de données utilisé dans cette étude, et **LERFoB**, pour la fourniture des données climatiques.

Merci enfin à **tous les doctorants et post-doctorants** que j'ai rencontré à AMAP et qui ont égayé mes journées et sans qui ce stage aurait paru plus terne.

Table des matières

Introduction et contexte de l'étude	4
Matériel utilisé pour l'étude.....	7
I. Modèle initial d'architecture du pin maritime	7
A. AmapSim le logiciel de paramétrage et de simulation.....	7
B. Hypothèse de travail des modèles sur AmapSim	9
C. Présentation des données d'ajustement initial du modèle	9
II. Données disponibles pour l'ajustement du modèle	10
A. Données de terrain dans les Landes.....	10
B. Complément d'information par la littérature	12
III. Présentation des logiciels d'extraction et de traitement	12
A. Xplo, Simeo et COMPUTREE pour la visualisation et l'extraction des données.....	12
B. R et Excel pour le traitement des données	13
Méthode appliquée pour la validation de la démarche de création des maquettes.....	14
I. Une méthode inspirée de l'analyse de sensibilité.....	14
II. Travail préliminaire.....	14
A. Vérification de l'homogénéité du jeu de données	14
B. Choix du nombre de réalisation	15
C. Détermination de l'âge des placettes	15
III. Ajustement du fichier de paramètres AmapSim au site d'étude	15
A. Hypothèses de travail.....	15
B. Les grandeurs prises en compte pour valider le modèle	15
IV. La croissance en peuplement.....	23
A. Les contraintes dues à la croissance en peuplement.....	23
B. Grandeurs pris en compte pour valider le modèle	25
Résultats	28
I. Travail préliminaire : détermination de la classe de fertilité	28
II. Niveau individuel.....	29
A. La hauteur totale	29
B. L'épaisseur de houppier	31
C. La taille de la couronne	33
D. La surface foliaire	34
E. Le diamètre à 1m30.....	38

III.	La création de peuplement	40
A.	Plan de simulation et paramètre des modules choisis.....	40
B.	L'épaisseur globale du houppier	43
C.	Ajustement de l'espace inter-couronne.....	45
	Discussion.....	49
I.	Le détail de la démarche et son originalité	49
A.	Présupposés liés à la démarche adoptée	49
B.	L'originalité de la démarche	50
C.	D'autres manière de travailler	51
II.	Travail préliminaire : la classe de fertilité	51
III.	Travail sur l'individu	52
A.	Comparaison de la variabilité des grandeurs considérées.....	52
B.	La hauteur totale et l'épaisseur de houppier	52
C.	La projection de couronne	53
D.	La surface foliaire	54
E.	Modèle de croissance radiale.....	54
IV.	Travail en peuplement	55
A.	Modules utilisés.....	55
B.	Profondeurs de houppiers.....	56
C.	Espace inter-couronne	57
D.	Pour aller plus loin.....	57
V.	La commande et les matériels utilisés	58
A.	Limite de la commande et intérêt pour AMAP	58
B.	Points positifs et négatifs du matériel utilisé pour ce travail.....	59
	Bibliographie.....	61
	Annexe.....	Erreur ! Signet non défini.

Introduction et contexte de l'étude

Ce mémoire présente le travail effectué lors de mon stage de fin d'étude à l'UMR botanique et bio-informatique de l'Architecture des Plantes (AMAP), sous l'encadrement de Cécile Antin et Grégoire Vincent entre mars et septembre 2014.

Cette étude s'intègre dans le projet Stem-Leaf, (STudies based on Experimental and Modelled waveforms for the Lidar for Earth And Forests mission) financé par le CNES et dans lequel plusieurs laboratoires de recherche collaborent, notamment les UMRs AMAP et TETIS. Il a pour but d'étudier, à l'aide de la modélisation, l'impact de certaines caractéristiques des capteurs d'un futur Lidar satellitaire sur la qualité des mesures effectuées. Les tests effectués nécessitent d'utiliser des maquettes en 3D de végétation respectant un certain nombre de grandeurs prédéfinies, dont la réalisation a été confiée à l'UMR AMAP étant donné son savoir-faire dans ce domaine. Ce satellite permettra d'estimer la biomasse présente au sol à partir du signal LiDAR.

La question centrale autour des maquettes est de savoir si l'information est dégradée lorsqu'on simplifie les maquettes ou si cela n'a aucune influence sur le signal. Le laboratoire travaille sur quatre peuplements différents : une plantation d'eucalyptus, un peuplement de hêtre représentatif du Nord-Est de la France, un peuplement de forêt tropicale (ayant pour origine des parcelles de Paracou en Guyane) et un peuplement équien de pin maritime représentatif des Landes. Le travail ici exposé consiste à rendre des maquettes de peuplement représentatives des pins maritimes des Landes et à mettre en place une chaîne de traitement pour la production de scènes simulées. Le peuplement est ici considéré comme un ensemble stochastique d'arbres isolés subissant la compétition interindividuelle. Mis au point dans un projet antérieur, un modèle simulant l'architecture des arbres individuels a été mis à contribution pour générer les scènes.

L'unité de recherche qui accueille ce travail est l'UMR AMAP. Deux champs disciplinaires y sont étudiés : d'un côté la botanique (systématique et structurale), l'écologie de la végétation, l'agronomie et la foresterie et de l'autre l'informatique les statistiques appliquées et la modélisation. Son projet scientifique s'articule autour de plusieurs thèmes centrés sur la caractérisation et l'analyse de la diversité, de la structure et de l'organisation des plantes et des peuplements végétaux. Les chercheurs s'appuient sur des méthodes originales qu'ils contribuent souvent à développer, telles que l'analyse de l'architecture et du développement des plantes, la représentation mathématique et informatique des organes, des plantes et des peuplements, la modélisation de la croissance et de la dynamique des espèces et des peuplements.

Le projet de l'UMR a pour but d'associer:

- des recherches cognitives, centrées sur la description et la compréhension de la diversité de la végétation, des relations structure-fonction, de la croissance et du fonctionnement des végétaux ;

- des recherches méthodologiques, visant à proposer des approches et des modèles mathématiques, statistiques et informatiques suffisamment génériques pour analyser, prédire et simuler la structure et le développement des plantes et de la végétation dans des contextes variés ;
- des recherches finalisées orientées vers la maîtrise de la dynamique, de la composition et de la production, en quantité et en qualité, de écosystèmes végétaux cultivés ou naturels.

Le laboratoire n'a donc pas d'intérêt à fournir des maquettes constituant un collage statique représentatif de plusieurs âges, ce qui pourrait suffire pour répondre à la commande. C'est pour cela que l'on se dirigera de préférence vers une démarche généralisable à d'autres cas de figures (autres essences et autres grandeurs étudiées).

L'un des avantages de l'importance du détail des modèles développés par le laboratoire c'est qu'ils peuvent rester génériques même s'ils ont été développés dans un contexte très particulier

Le travail effectué lors de ce stage est intéressant pour deux aspects :

- Il permet de tester le domaine de validité d'un modèle de *Pinus pinaster* anciennement créé et de confirmer ou non la robustesse de ce dernier.
- Il permet également d'avoir une démarche innovante en ayant la possibilité de créer des simulations dynamiques et interactives de peuplement

En effet, pour la première fois une boucle de rétroaction est envisagée en utilisant seulement AmapSim. Il existe tout de même des couplages entre AmapSim et des contraintes extérieures simulées par modules (Insileco pour l'effet de la lumière sur la croissance, Profs pour celui du climat), mais ils font intervenir d'autres logiciels.

Lors de la croissance en peuplement, l'environnement direct de l'arbre a une influence sur les grandeurs de l'arbre. Les caractéristiques des arbres ont une influence sur la répartition des arbres sélectionnés lors de l'éclaircie (simulant l'intervention humaine). Cela a une influence sur l'environnement proche des arbres. On met en place un couplage entre AmapSim à l'échelle individuelle et des modules extérieurs simulant les contraintes de peuplement (sylviculture et gêne stérique). On peut noter qu'une démarche similaire à celle exposée a été tentée auparavant. En effet Céline Meredieu a travaillé en 2004 sur le couplage entre Capsis et AmapSim, qui n'a malheureusement pas abouti à cause de problèmes techniques.

On a à disposition un fichier paramètre du modèle architectural de pin maritime pour AmapSim calibré sur un site d'étude et un jeu de données dendrométriques sur un autre site. Il faut ajuster le modèle architectural du pin maritime au nouveau site d'étude et créer des peuplements qui en sont représentatifs. Pour ce travail, il a été décidé de mettre en place une démarche rigoureuse se rapprochant de l'analyse de sensibilité. Tout d'abord on choisit un certain nombre de grandeurs à privilégier lors de l'ajustement. Il va ensuite être question d'affiner les valeurs des paramètres du modèle pour ajuster chaque grandeur correctement les unes après les autres. Une fois le modèle individuel correctement paramétré on étudiera sa

croissance en peuplement que l'on ajustera de la même manière. Le schéma ci-dessous résume la démarche (Figure 1).

Ce mémoire prendra la structure d'un article scientifique, il sera divisé en 3 grandes parties. Tout d'abord on détaillera le matériel utilisé et la méthode appliquée. Ensuite on exposera les résultats obtenus. Enfin on discutera les résultats et on exposera les développements possibles ultérieurement.

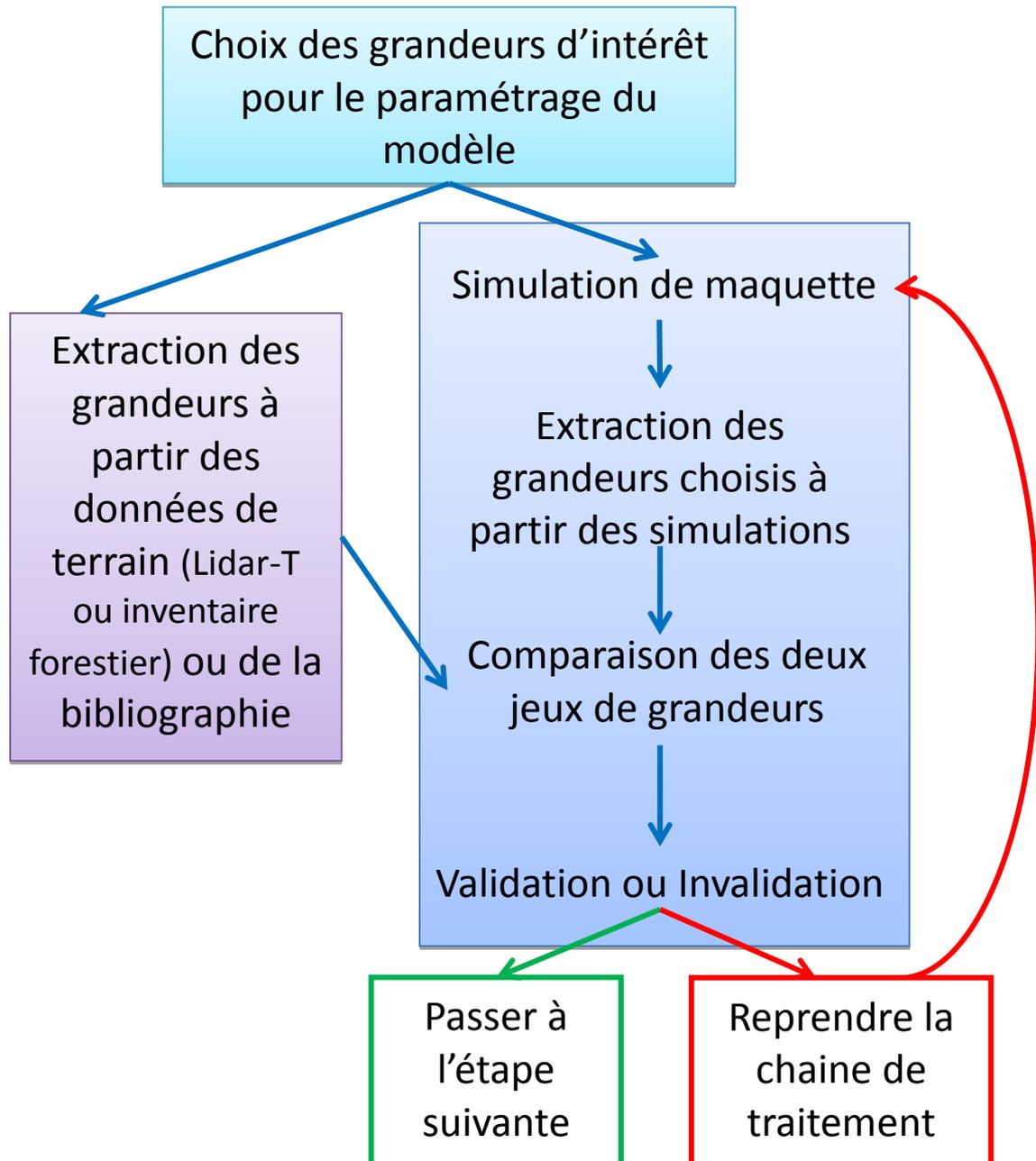


Figure 1- Schéma général de la chaîne de traitement.

Matériel utilisé pour l'étude

I. Modèle initial d'architecture du pin maritime

A. AmapSim le logiciel de paramétrage et de simulation

Ce logiciel est le simulateur sous lequel a été créé le modèle qui nous intéresse. Il fait partie des logiciels développés par le laboratoire AMAP. Il permet de paramétrer des modèles architecturaux d'arbres et de les simuler en trois dimensions. La partie du logiciel qui permet le paramétrage et l'édition du fichier paramètre du modèle de simulation s'appelle AmapSimEdit. Ces modèles ont pour objectif de reproduire le plus fidèlement possible l'architecture des plantes. Cette dernière dépend de la croissance des bourgeons depuis la naissance de l'arbre, on doit pour se faire suivre la croissance des méristèmes primaires (Barczi et al, 2007). Le schéma ci-dessous permet de visualiser les différentes échelles d'un modèle :

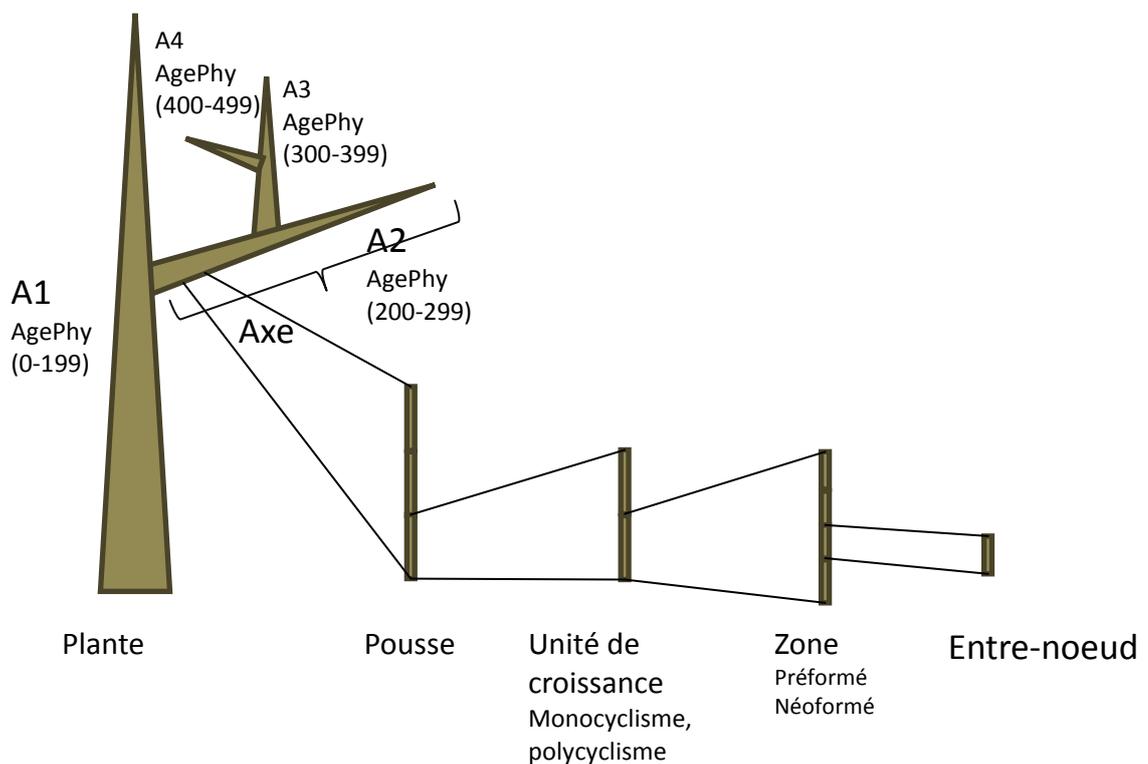


Figure 2- Schéma synthétique de la structure des modèles d'AmapSim

Chaque modèle de plante est composé d'un ensemble d'unité de croissance auquel est associé un âge physiologique qui est représentatif de la vigueur de la pousse. L'âge physiologique caractérise la pousse dans son ensemble : sa longueur, son diamètre, sa probabilité de faire du polycyclisme, l'ordre de ramification (cf Figure 2) ou la durée de vie... Ce modèle permet un réglage très fin de plus d'une centaine de paramètres distincts qui

déterminent la structure de la plante. Les paramètres qui nous intéressent dans notre cas sont ceux cités dans le tableau ci-dessous :

Caractéristiques	Paramètres
Longueur de pousse	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre d'entre-nœud • Longueur unitaire d'un entre-nœud
Durée de vie	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre d'entre-nœud maximum • Age physiologique maximum • Saut physiologique d'une année sur l'autre (vieillessement)
Ramification	<ul style="list-style-type: none"> • La probabilité de se ramifier • Le nombre de ramification moyenne
Surface foliaire	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre d'entre-nœud feuillé • Nombre de feuilles par entre-nœud • Surface foliaire unitaire
Temps de présence de la branche morte sur l'arbre avant sa chute	<ul style="list-style-type: none"> • Date de chute après mort de l'apex

Tableau 1- Paramètres à privilégier dans notre étude

Il est possible de développer ainsi des modèles statiques (représentatif d'un âge donné) ou dynamique, où chaque représentation est issu de la croissance des méristèmes lors des pas de temps précédent. La plupart des modèles développés sont individuels, mais il est possible de créer des peuplements grâce à AmapSim. C'est d'ailleurs ce qui constitue l'originalité de notre étude.

Pour affiner le modèle, on peut ajouter des informations supplémentaires, qui peuvent par exemple simuler une contrainte qui s'applique sur la croissance de la plante (modules de vent ou de lumière) ou ajouter une donnée au modèle de base (module de croissance radiale).

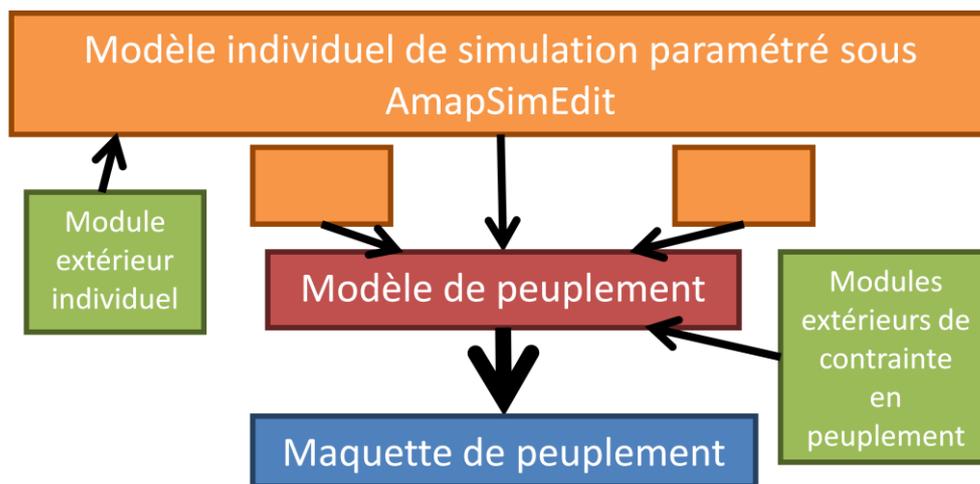


Figure 3- Présentation du fonctionnement général d'AmapSim

Lorsque l'on lance une simulation, à chaque pas de temps la géométrie de tous les éléments unitaires de l'arbre est recalculée et stockée. Ceci permet ensuite de visualiser plus finement et de mesurer les grandeurs qui nous intéressent à l'aide d'un autre logiciel : Xplo.

B. Hypothèse de travail des modèles sur AmapSim

Il existe 3 grandes hypothèses faites quand on décide de travailler avec les modèles de croissance d'AMAPSim.

Tout d'abord un niveau de détail aussi élevé est indispensable pour obtenir des bilans radiatifs sous couvert, mais est aussi très lourd à mettre en œuvre : les mesures de terrain doivent être précises et nombreuses (longueur, vigueur, angle d'insertion, nombre de branches portées, récurrence de la formation des branches, caractéristiques des feuilles et des fruits ou durée de vie du bourgeon). Cela prend beaucoup de temps, à la collecte, comme au traitement.

Ensuite on a à notre disposition un fichier paramètre pour le modèle de croissance individuelle du pin maritime. Les données disponibles pour le paramétrage initial et pour le réajustement effectué pendant ce stage sont des données architecturales d'arbres en peuplement. Il est en effet pratiquement impossible de trouver plusieurs dizaines de pin maritime de différents âges en croissance libre dans la région des landes.

Enfin dans AmapSim, l'accent est mis sur la croissance des méristèmes primaires. La croissance des méristèmes secondaires n'est donc pas une variable essentielle. Elle est prédite dans un deuxième temps selon une hypothèse, qui associe à chaque feuille une quantité de matière répartie de manière homogène sur le chemin des vaisseaux conducteurs. Lorsque l'on cherche à prévoir des diamètres le long du tronc, il faut donc d'abord s'intéresser à la répartition des feuilles dans le houppier.

C. Présentation des données d'ajustement initial du modèle

On dispose d'un fichier de paramètres pour pin maritime (nommé par la suite fichier de paramétrage initial) qui a été conçu par Yves Caraglio (chercheur à AMAP) dans le cadre du projet CARBOFOR (2002-2005). Cette étude avait pour but d'étudier la modification du stockage de carbone en fonction du réchauffement climatique.

La calibration du fichier de paramètres initial a été réalisée à partir de données collectées dans les landes au Sud-Ouest de Bordeaux, à Berganton (44°42'N, 0°46'W). On appellera ce jeu de données le jeu de « paramétrage initiale ».

Ce jeu de données comporte des individus de quatre âges différents avec des niveaux de détail pouvant varier selon les individus.

Age	Niveau de ramification le plus précis	Effectif (nombre d'arbre)
8	A1	26
	A3	6
22	A1	15
	A4	5
32	A1	10
47	A3	6
	A2	4

Tableau 2- Description des mesures prises en fonction de l'âge

Un schéma de l'architecture de l'arbre et du protocole de sélection des branches est présenté en *annexe 2* de ce rapport. Cette description relève une dizaine de grandeurs associées à chaque unité de croissance. Ne seront citées que celles qui présentent un intérêt pour notre étude : diamètre/circonférence, longueur totale et non feuillée, indice de densité de feuilles, angle d'insertion des branches, niveau de ramification.

En plus de ces descriptions totales, le nombre d'aiguilles, la longueur de chaque aiguille et la longueur feuillée sur les arbres de 47 ans ont été relevés. Cela a été fait sur les pousses terminales (année 93) à 3 endroits : l'apex de l'axe principal, l'apex d'une branche de milieu de houppier et l'apex de bas de houppier.

II. Données disponibles pour l'ajustement du modèle

Dans cette étude, un jeu de données indépendant permettra d'évaluer le modèle initial dans un contexte différent. Pour ce faire, l'UMR Tetis de la maison de la télédétection a fourni un ensemble de données placettes, collectées dans le cadre du projet FORESEE (en cours). Ce dernier, porté par le FCBA, permettra d'avoir une bonne connaissance de la ressource bois disponible (quantité, localisation, accessibilité) pour permettre de mieux structurer la filière bois autour de la matière première.

Dans ces relevés de terrain, on peut faire la différence entre les données collectées manuellement à l'aide d'un vertex, d'une boussole et d'un compas forestier et les scans LiDAR aérien ou terrestre. On appellera cet ensemble de données jeu de données « d'ajustement ».

A. Données de terrain dans les Landes

1. Localisation des placettes



Figure 4- Carte de la localisation des relevés terrain faits dans le cadre du projet FORESEE

Ces placettes ont été relevées au sud de St-Symphorien dans le parc régional des Landes de Gascogne (-0.48890, 44.42776 EPSG : 4326) sur une surface d'environ 60 km². La répartition des placettes et le type de relevé associé sont représentés sur la *Figure* .

2. Inventaires forestiers

Dans le premier type de relevé, ont été notées la position de chaque arbre en azimuth-distance au centre de la placette, leur essence et la hauteur totale (systématiquement). Sur ces 41 placettes (ce qui représente 907 arbres de 30 âges différents), certaines données n'ont pas été prises de manière systématique : l'âge (sur 40 placettes), le diamètre à 1,3 m (39), la rectitude du tronc (37), les hauteurs de premières branches vivantes et mortes (29). Le détail du jeu de données d'ajustement est présenté en *annexe 1*.

Une partie de ces grandeurs vont permettre d'ajuster les paramètres du fichier initial au site d'étude des Landes. Les grandeurs manquantes vont être extraites des données LiDAR terrestre.

3. Données LiDAR terrestre

Pour ce qui est des données LiDAR, 6 scans ont été faits par placettes : deux au centre et quatre à la périphérie des placettes selon une disposition en croix (*Figure 5*).

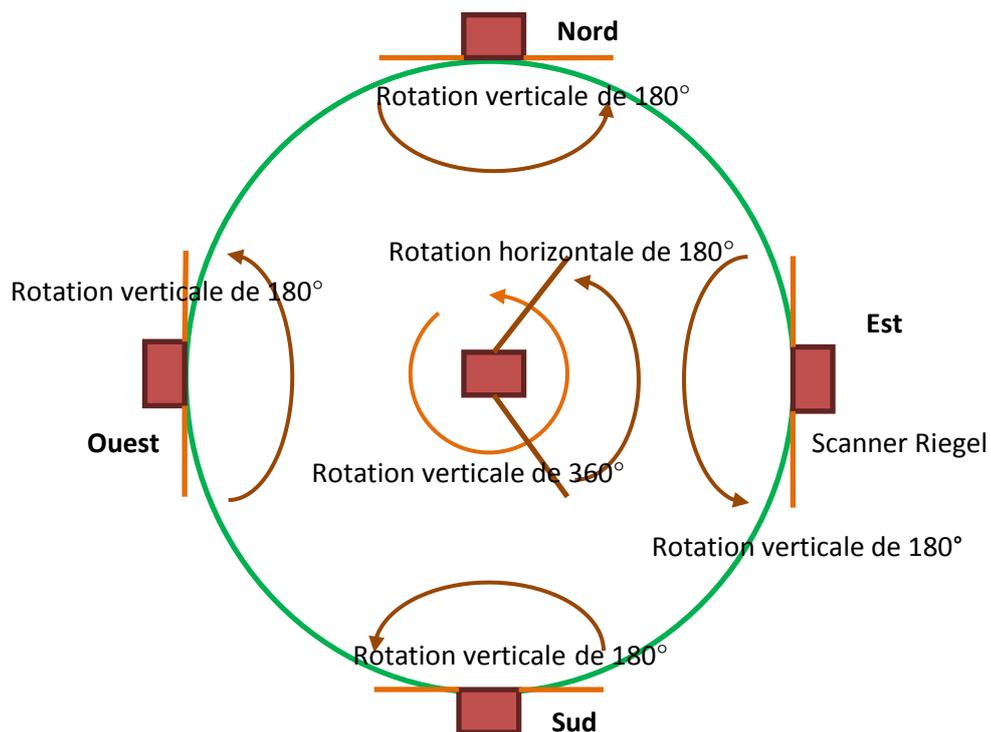


Figure 5- Schéma de la disposition des différents scans LiDAR-T qui composent le nuage de points recomposé

Ces scans ont ensuite été assemblés pour diminuer au maximum les phénomènes d'occlusion. Les données de LiDAR terrestre sont disponibles dans 23 placettes des 41 présentées ci-dessus.

B. Complément d'information par la littérature

Nous traitons d'un côté le jeu de paramétrage initial, dont on extrait des informations d'une très grande précision, mais sans avoir accès aux grandeurs plus globales (surface projetée de couronne, hauteur de première branche vivante ou morte, par exemple). D'un autre côté, on peut extraire ces grandeurs du jeu de données d'« ajustement ». Ces deux jeux, bien que complémentaires, ne suffisent pas.

Des compléments d'informations ont été obtenus en effectuant une revue de littérature. On a entre autres trouvé une relation entre le diamètre, l'âge et la surface foliaire (A. *Porte et al, 1999* ou *Shaiek et al, 2011*), mais également une étude de l'évolution de la proportion de la section conductrice (*Knopic et Pereira, 2005* ou *Pinto et al, 2003*).

III. Présentation des logiciels d'extraction et de traitement

Le travail réalisé repose sur un enchaînement de modèles et de logiciels de traitement de données qui seront détaillés dans les prochaines sections.

A. Xplo, Simeo et COMPUTREE pour la visualisation et l'extraction des données

1. Xplo : un logiciel pour l'eXploration de l'architecture des plantes

Pour pouvoir comparer les grandeurs issues des observations de terrain et celles de nos modèles, il faut extraire les grandeurs correspondantes des simulations. Pour ce faire, Xplo sera utilisé.

Ce logiciel fait partie de la suite de logiciel AMAPstudio, développée à l'UMR AMAP. Il permet deux actions distinctes sur les individus.

Tout d'abord, il permet de visualiser un individu simulé à l'aide d'AmapSim et extraire de ces fichiers des grandeurs caractéristiques de l'individu. Dans notre étude, on extrait la hauteur totale, celle de la première branche, le diamètre à 1,3 m et celui de la première branche vivante ainsi que la surface foliaire et le nombre de feuilles. On peut également extraire des grandeurs plus précises comme l'âge physiologique et l'ordre de ramification des pousses portant les feuilles, par exemple.

Ensuite on peut travailler sur les jeux de données les plus détaillés d'ajustement initial en extrayant des grandeurs qui permettent de paramétrer le modèle directement. En effet, il est possible par exemple de récupérer des probabilités de ramifications ou des diamètres/longueurs d'un type de pousses.

2. Simeo : (Scene Implantation Manager for Edition by Outline) : un éditeur de scènes 3D

Lorsqu'on veut visualiser une scène de plusieurs individus on ne peut utiliser Xplo, on se tourne alors vers un autre logiciel de la suite AMAPstudio : Simeo.

Ce dernier permet d'éditer une scène à partir de différents individus pour des fins de visualisation ou de traitements ultérieurs. On peut s'en servir pour deux rendus différents : créer des représentations graphiques et exporter les maquettes sous la forme de nuages de points (pour ensuite les traiter sous COMPUTREE).

3. COMPUTREE : une plateforme informatique de traitement des nuages de points 3D dans le contexte forestier

Le traitement de données LiDAR, mais aussi des simulations à l'échelle des peuplements demandent la prise en main d'un logiciel de visualisation et de travail sur nuage de points en 3D : COMPUTREE.

Ce logiciel, développé par l'ONF (Office National des Forêts) et l'ENSAM (Ecole National Supérieure d'Arts et Métiers), permet la visualisation et l'extraction de données dendrométriques à partir de nuages de points, comme des nuages de points consolidés à partir de différents scans. On peut obtenir un modèle numérique de surface des houppiers (MNS), séparer chaque houppier de ses voisins, les hauteurs de différents éléments de la scène, ainsi qu'associer à des nuages de points des formes géométriques (par exemple des cylindres à des parties du tronc). Dans le cadre de ce stage, de nombreuses fonctionnalités ont été développées par Alexandre Piboule.

Le même travail peut également être fait sur les nuages de points associés aux simulations.

B. R et Excel pour le traitement des données

Le post-traitement des extractions est effectué à l'aide d'Excel et de R.

Méthode appliquée pour la validation de la démarche de création des maquettes

Cette partie présente le raisonnement suivi lors de ce travail et les actions effectuées pour obtenir les résultats intermédiaires et remplir la commande. Cette dernière est un ensemble de maquettes en 3D à plusieurs âges représentatives dans la hauteur et la surface foliaire totale d'un peuplement équienne de pin maritime.

I. Une méthode inspirée de l'analyse de sensibilité

Ce travail est composé de deux phases. Le travail commence par un réajustement du modèle individuel à l'échelle de l'individu. Dans cette partie on considère les grandeurs de l'arbre comme s'il n'y avait pas de concurrence. Une fois ce travail fini, on se sert du modèle paramétré pour travailler à l'échelle du peuplement. A cette étape, on incorpore des contraintes interindividuelles (la gêne stérique) et l'intervention de l'homme (la sylviculture).

Le choix des grandeurs utilisées pour caractériser les individus et les scènes est motivé par leur facilité d'extraction et leur représentativité. Il a fallu ensuite hiérarchiser leur traitement et leur correction, pour ne faire varier qu'un paramètre à la fois. Ces grandeurs de référence sont dans l'ordre : la hauteur totale et celle de 1^{er} branche, la surface projetée de couronne, la surface foliaire totale et le diamètre à 1,3 m. Il est comme ceci possible d'interpréter les résultats après modifications. On progresse de l'échelle la plus globale pour aller vers la plus fine, pour éviter les rétroactions indésirables des modifications des derniers paramétrages sur les premiers.

A chaque étape, c'est en comparant les simulations avec les données observées qu'on se propose de valider ou non la partie du modèle considérée. Pour effectuer les changements nécessaires, on se réfère aux travaux déjà publiés ou aux données de paramétrage.

C'est en procédant par validations successives que la démarche devient la plus robuste et cohérente possible.

II. Travail préliminaire

A. Vérification de l'homogénéité du jeu de données

On peut en effet se demander si notre jeu de données est homogène. Il nous faut savoir si on peut considérer que les placettes peuvent être en moyenne représentatives d'un peuplement unique à plusieurs âges.

Pour ce faire, la courbe de croissance en hauteur des arbres des placettes terrain a été comparée aux courbes de hauteur des classes de fertilité de Lemoine (1969). Si la courbe des

données terrain équivaut à une classe de fertilité, on considèrera que l'on peut regrouper les placettes et les considérer comme plusieurs âges d'un unique peuplement.

On envisage également de collecter des informations sur les variations environnementales qui pourraient induire une différence de fertilité des sols sur les placettes ou de croissance des peuplements. Pour ce faire on utilise les données climatiques (EvapoTransPirations, radiations, températures et précipitations) et pédologiques (Réserve Utile) fournies par le LERFoB, que l'on traite à l'aide d'un logiciel de géomatique (Q-gis).

B. Choix du nombre de réalisation

Avant toute chose, il convient de choisir un nombre de réalisations afin d'avoir une bonne représentativité de la moyenne et de la variabilité des individus simulés à un âge donné. Un compromis entre la précision de l'estimation de la grandeur et le temps de simulation-traitement est nécessaire.

C. Détermination de l'âge des placettes

Malheureusement l'âge des placettes LiDAR-terrestre n'a pas été relevé, il faut donc l'approximer à partir de la hauteur (très bien connue dans un relevé LiDAR). Pour ce faire, on utilisera le jeu de données relevées manuellement où l'âge et la hauteur totale ont été relevés pour toutes les placettes. Le détail de cette démarche se trouve en *annexe 5*.

III. Ajustement du fichier de paramètres AmapSim au site d'étude

A. Hypothèses de travail

On a émis plusieurs hypothèses initiales pour travailler avec les jeux de données disponibles. Tout d'abord, on a considéré que les relevés étaient représentatifs d'un peuplement avec une fertilité et une provenance unique. Le travail consistera à paramétrer le modèle pour que la maquette produite soit le plus proche possible de mon jeu de données.

Ensuite nous avons supposé que paramétrer le modèle individuel avec des arbres réels issus de croissance en peuplement au lieu d'arbres isolés n'avait pas d'influence sur le modèle.

B. Les grandeurs prises en compte pour valider le modèle

Les grandeurs les plus représentatives du peuplement et les plus simples à extraire de mes données sont : hauteur totale, hauteur de première branche, surface projetée des couronnes pour avoir une bonne dimension de houppier, afin d'obtenir une surface foliaire totale cohérente et DBH. C'est celles qui semblent avoir la plus grande influence sur le signal LiDAR.

1. Hauteurs

a) Explication du choix des grandeurs

En considérant la hauteur totale on peut s'assurer que l'évolution de la hauteur des pins sera cohérente au cours du temps. Mais en considérant également la hauteur de première branche vivante on peut maîtriser l'épaisseur du houppier. Si elle varie alors les caractéristiques du signal renvoyé changent. De plus dans un but d'estimation de biomasse par du Lidar satellitaire, la hauteur est la grandeur qui doit être estimée avec le plus de précision.

b) Actions effectuées

On a simulé des arbres avec les fichiers du modèle initial. Puis on a comparé les hauteurs trouvées avec les fichiers de données issues des relevés de terrains (vertex).

Les modifications nécessaires sont ensuite effectuées pour ajuster la hauteur totale simulée sur la hauteur totale réelle des peuplements de pins maritimes au cours des différents âges représentés.

Dans ce modèle quand la hauteur de l'arbre ou la longueur des branches ne correspond pas, c'est que la longueur de chaque pousse annuelle n'est pas correcte. Soit c'est parce que le polycyclisme est mal paramétré, soit c'est parce que la longueur des unités de croissance sur l'axe principal est différente de ce que l'on mesure dans la réalité (longueur des entre-nœuds ou nombre d'entre-nœuds). J'ai choisi de faire varier la longueur des unités de croissance, car c'est le paramètre que l'on peut le mieux documenter. Dans son article Coudurier et al (1995) donnent une longueur annuelle moyenne variant en fonction de la présence ou non de polycyclisme et de l'âge de l'arbre. Je choisis également d'intervenir sur le nombre d'entre-nœuds et pas sur leur longueur unitaire, pour mieux cibler mon action sur l'axe principal.

Quand c'est l'épaisseur de houppier qui est différente, on peut supposer que c'est que les branches n'ont pas la bonne durée de vie sur l'arbre. En effet quand le bourgeon terminal d'une branche meurt, la branche va tomber au bout d'un certain laps de temps. Pour changer l'épaisseur du houppier il faut repousser ou avancer l'âge physiologique de mort du bourgeon terminal. On peut également augmenter le temps qui sépare le mort du bourgeon et la chute de la branche.

Et enfin je compare les modifications apportées pour vérifier qu'il y a bien adéquation entre les deux hauteurs.

2. Dimensions latérales des couronnes

a) Explication du choix de cette grandeur

Il est important de reproduire la proportion de sol visible dans nos simulations, car c'est une partie importante du signal. Pour ce faire il nous faut obtenir la bonne dimension latérale de houppier. De plus connaître la dimension latérale du houppier est une étape obligatoire pour obtenir la surface foliaire totale

b) Actions effectuées

On a simulé un ensemble d'individus à partir du fichier paramètre récemment modifié pour la hauteur. Puis on a comparé les surfaces projetées extraites des simulations et des placettes LiDAR.

Pour obtenir la mesure de surface projetée de couronne sur le sol on ne peut utiliser les données de terrain classiques. On va donc se servir de dix nuages de points T-LiDAR pour en extraire la surface projetée des pins maritimes avec COMPUTREE. Les peuplements choisis sont estimés entre 8 et 62 ans. Le traitement des nuages peut varier énormément en fonction de sa taille : d'une à plusieurs heures.

Pour l'extraction on doit pour chaque placette, issue de simulation ou de relevé lidar faits sur le terrain, détourner chaque houppier de manière semi-automatique. La scène de points est voxelisée avec des voxels unitaires de 1 à 5 cm de côté, en fonction de la difficulté de traitement. S'il y a des points dans un voxel alors il est considéré comme plein sinon il est considéré comme vide. Le programme repère les discontinuités dans le nuage de voxels et associe un identifiant différents à chaque ensemble contigu. Si les arbres ne se touchent pas alors il y a un identifiant associé à chaque houppier. A chaque identifiant sont associées plusieurs estimations de la surface projetée de couronnes (la projection nominale et son enveloppe convexe) et une hauteur maximale. Dans la majorité des cas les houppiers se touchent, il faut donc séparer manuellement ceux qui ont été considérés comme une seule entité. Il faut choisir correctement la dimension unitaire des voxels : une voxelisation trop fine pourrait dissocier des houppiers en plusieurs entités de manière indésirable, une voxelisation qui ne l'est pas assez pourrait fusionner deux houppiers distincts et conduire à une mauvaise estimation de la surface de couronne projetée.

Une fois extraites on comparera les couronnes d'arbres simulés avec les couronnes des individus réels.

J'effectue ensuite les modifications nécessaires dans le fichier de paramètres pour ajuster la surface projetée simulée sur la surface projetée réelle des peuplements de pins maritimes aux différents âges représentés.

Pour faire varier la surface projetée au sol, il faut soit changer la longueur des branches, soit modifier l'angle d'insertion des branches sur le tronc. Je choisis de d'abord travailler sur la deuxième option, qui semble moins atteindre la structure architecturale que la première. Pour ce faire j'utilise les jeux de données architecturaux du projet CARBOFOR.

Et enfin je compare après les modifications apportées pour vérifier qu'il y a bien adéquation entre les deux surfaces de couronnes projetées.

3. Surface foliaire

a) Explication du choix de cette grandeur

Dans un houppier de pin maritime la majorité des rayons du Lidar satellitaire est interceptée par les aiguilles ou les fines branches. Il faut donc obtenir un nombre total et une répartition cohérente des aiguilles. On ne peut malheureusement pas simuler autant d'aiguilles

que dans la réalité : les temps de calcul seraient trop importants et rendraient la création de maquette à des âges élevés impossible. De plus les maquettes finales ne pourraient être retravaillées ensuite comportant trop d'objets géométriques. On souhaite que notre modèle de peuplement prédise des valeurs réalistes de surface foliaire tout en restant facile à manipuler. Il nous faut donc caler une surface foliaire totale individuelle de manière cohérente.

b) Actions effectuées

La surface foliaire totale d'un arbre peut s'écrire intuitivement de la manière suivante :

$$SF_{tot} = nb_{zf} * nb_{f/m} * SF_u$$

avec SF_{tot} la surface totale de l'arbre

nb_{zf} le nombre de zone feuillée de l'arbre

$nb_{f/m}$ le nombre de feuilles par zone feuillée

SF_u la surface foliaire unitaire

Il existe donc trois leviers pour obtenir une surface foliaire simulée équivalente à la surface foliaire prédite.

- La surface foliaire unitaire

D'un côté on a accès à un jeu de données qui permet de connaître le nombre d'aiguilles présentes sur des pousses terminales et la longueur de ces aiguilles (15 cm en moyenne, comm. Yves Caraglio). De plus d'après Bosc (1995) on connaît la largeur moyenne d'une aiguille de pin maritime : 0.12 cm. D'un autre coté on peut fixer la surface foliaire unitaire avec le modèle. On va donc pouvoir confronter les surfaces foliaires unitaires de la simulation à celles du terrain.

On calcule de manière différente les deux types de surfaces foliaires (*Figure 6*) :

- dans AmapSim la surface foliaire est calculée à partir d'un rectangle de largeur et longueur modifiables dans le modèle.
- les aiguilles réelles sont assimilées à un demi-cylindre

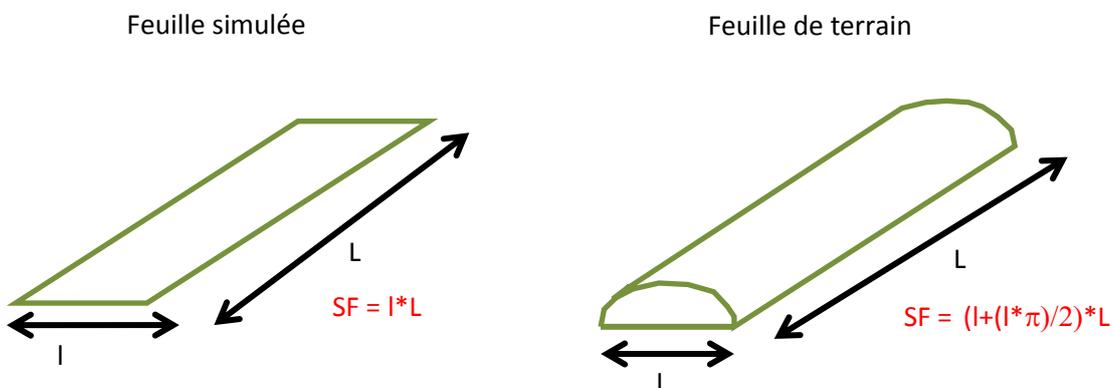


Figure 6- Calcul de la surface foliaire: simulation et terrain.

- Le nombre de feuilles par zone feuillée

Le même jeu de données nous permet d'obtenir un nombre moyen de feuilles par longueur feuillée pour les données terrain. On va donc comparer le nombre de feuilles par manchon de nos arbres simulés à ce que l'on trouve sur les données terrain du projet CARBOFOR.

- Le nombre de zones feuillées

Les zones feuillées sont situées aux extrémités de chaque axe. Pour ce volet on ne possède pas de mesures de terrain aux quelles on pourrait confronter nos résultats de simulations. On va tout de même essayer de comprendre la répartition dans l'arbre de ces zones. Cela permettra de savoir si globalement elle est cohérente avec ce que l'on s'attendrait à trouver.

Pour ce faire on va étudier certaines caractéristiques des pousses composant les zones feuillées, comme l'âge physiologique. Un certain nombre de grandeur peuvent influencer le nombre de zones feuillées : la dimension du houppier et le degré de ramifications. On a déjà fixé la dimension du houppier précédemment. Nous allons donc nous intéresser à la ramification des branches. Plus le nombre de branches portant des aiguilles est important et plus le nombre d'aiguilles augmente.

On étudiera s'il y a une anomalie au niveau de la simulation et ce que l'on devrait attendre au niveau de l'effectif de pousses feuillées en fonction de leur ordre de ramification. Ces informations nous permettront d'effectuer les modifications adéquates : par exemple sur la probabilité de ramifier pour chaque pousse, mais également sur le nombre moyen de branches portées par une pousse ramifiée.

Une fois que toutes les parties du modèle seront fixées, on pourra comparer la surface foliaire totale de l'arbre simulé avec la surface foliaire que l'on trouve dans la littérature.

Porte et al (2000) mettent en évidence une relation entre l'âge, le diamètre à 1m30 et la surface foliaire totale d'un pin maritime. Cette relation n'a été calibrée que pour des arbres de moins de 26 ans. Plus récemment, Shaiek et al (2011) ont estimé les paramètres d'une relation entre la masse de chaque compartiment de l'arbre, dont la biomasse foliaire, et le dbh et l'âge de l'arbre. Les données qui ont servi à calibrer ce modèle ont une meilleure répartition de diamètre (jusqu'à 50cm) et d'âge (jusqu'à 50 ans). Ce qui permet, si on a la masse et la surface unitaire d'une aiguille (*Idrissi-Hassani et Lebreton, 1992*), d'obtenir une surface foliaire totale en fonction de l'âge et du diamètre. On extrapole la relation à des âges plus élevés (tout en gardant un esprit critique sur les prédictions).

4. Diamètre à 1m30 : DBH

a) Explication du choix de cette grandeur

Connaitre le DBH a toujours été très important en foresterie, car il est facile d'accès lors des relevés de terrain. Il permet ensuite d'estimer le volume sur pied disponible sur la parcelle considérée. De plus le logiciel de simulation n'a pas encore de modèle de croissance radiale satisfaisant. Il semble donc important de travailler sur un paramétrage du diamètre réaliste, même si la finalité de l'étude n'est pas l'estimation de biomasse. Le raisonnement est

valable pour d'autres essences forestières, de préférence résineuses. Par contre les paramètres utilisés pour ce modèle sont spécifiques au pin maritime.

Le modèle actuel est basé sur une hypothèse de production constante de biomasse par feuille et de répartition homogène de la contribution de chaque feuille sur le chemin reliant la feuille à la base de l'arbre. Ce modèle de répartition de la biomasse est peu satisfaisant et notamment n'est pas étayé par des données expérimentales. Dans ce modèle, à chaque pas de temps on augmente les sections des tiges existant au pas de temps précédent. Cet incrément est fonction du nombre d'aiguilles portées par la structure en amont de la section (sens acropète du parcours de la ramification). Ce modèle a tendance à surestimer le diamètre de l'arbre dans les premiers âges et sous-estimer dans les âges avancés. Il va donc faire l'objet d'une amélioration.

b) Présentation du nouveau modèle

Pour notre nouveau modèle, on veut changer d'hypothèse initiale et se baser sur le nombre de vaisseaux nécessaires pour l'évapotranspiration de chaque aiguille (*Shinozaki et al 1964*).

On va, pour construire notre modèle, travailler à partir des modèles développés par Eric Casellas sur le pin d'Alep (*P. halepensis*) à Clapiers et le pin noir (*P. nigra*) en Lozère. Ces deux pins ont la même forme de relation pour prévoir la section à tout endroit de l'arbre, donc on va reprendre cette forme générale et déterminer les paramètres correspondant au pin maritime. Dans ces modèles, on considère séparément les zones terminales (se trouvant juste après les manchons d'aiguilles), les embranchements et le reste des situations. On cherche à prévoir la surface conductrice minimum d'un élément à partir de la somme des surfaces conductrices des éléments portés (ramification) ou des surfaces évapotranspirantes portées (feuilles). Dans nos simulations, on tiendra compte de l'historique de croissance de l'arbre pour éviter la régression radiale qui pourrait se produire après la chute de toutes les aiguilles d'une branche : on va toujours comparer une section à une position dans l'arbre à sa section à la même position une année avant. Si la nouvelle section est plus faible que la précédente, alors on garde la précédente comme la nouvelle section.

De plus, on introduira la notion de durée fonctionnelle des segments conducteurs. En effet, Knapic et Pereira (2005), montrent que le bois de cœur, composé de vaisseaux non conducteur, apparaît au bout d'une 20^{aine} d'années pour le pin maritime (*Pinus pinaster*). De plus on a une formation de bois de cœur différente en fonction de l'âge cambiale de la pousse. On va donc considérer deux cas : recyclage partiel pour les pousses de plus de 20 ans (une partie de la section, transformée en bois de cœur, est considérée comme inactive) ou total pour les pousses de moins de 20 ans (toute la section est considérée comme active).

On raisonnera au niveau des pousses et non des entre-nœuds. S'il y a une trop grande discontinuité entre les pousses on établira une régression linéaire pour les diamètres intermédiaires.

On néglige la différence systématique entre section de tiges (qui inclut l'écorce) et section conductrice. Seule la formation de bois de cœur génère une différence entre Sc la section conductrice et $Stot$ la section totale. Si l'âge cambial est inférieur à 20 ans alors $Stot$ et

Sc sont équivalents. On a également comme variable SF, la surface foliaires portées sur la pousse.

t = âge de l'arbre

i = rang de la pousse considérée

n = âge cambial

La modification à apporter pour ajuster le diamètre à 1m30 est le nouveau modèle de croissance radiale présenté ci-dessus.

Le modèle se décompose en 3 parties distinctes : étude de la section conductrice des terminaux, étude de la section conductrice après chaque embranchement et étude de la formation de bois de cœur.

Les terminaux :

Dans ce cas on calcule le premier diamètre à partir de la 3^{ème} pousse en partant de chaque apex, la pousse 1 et la pousse 2 resteront à leur diamètre initial.

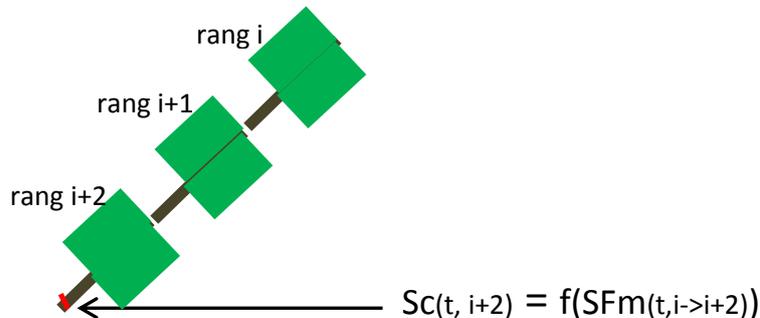


Figure 7- Schéma des trois pousses terminales feuillées de chaque axe

La question que l'on se pose est :

Peut-on prévoir la section conductrice d'une pousse feuillée à l'aide du nombre d'aiguilles qu'elle porte?

On émet donc l'hypothèse correspondante :

H_0 : La section d'une pousse feuillée dépend de la surface foliaire qu'elle porte.

Le jeu de données ne permet pas de connaître le lien direct qui existe entre le nombre d'aiguilles la pousse terminale et sa section. En effet j'ai à ma disposition d'un côté des mesures détaillées reliant le nombre d'aiguilles et la longueur feuillée de la pousse. Et d'un autre la longueur feuillée et le diamètre de la pousse. De plus on ne possède les deux types de données que pour des arbres de 47 ans, sur lequel je vais fonder ma relation. Je vais donc chercher à savoir deux choses :

- Si l'on peut prévoir la longueur feuillée avec la surface foliaire qu'elle porte

Modèle A :

Soit la surface foliaire Sfm suit une loi normal $N(\mu, \sigma^2)$

et $Lgfeuil_i = a * Sfm_i$

Avec

i représente le manchon d'aiguilles considéré

Lg_{feuil_i} désigne la longueur feuillée du manchon considéré

S_{fm_i} désigne la surface foliaire, pour le i ème embranchement

a est l'effet global de la surface foliaire par manchon

- Et si l'on peut prévoir la section en ayant la longueur feuillée
On va proposer plusieurs modèles :

Modèle B_1 :

Soit $Lg_{feuil} \rightarrow N(\mu, \sigma^2)$

et $S_{ij} = a * Lg_{feuil_{ij}}$

Modèle B_2 :

Soit $Lg_{feuil} \rightarrow N(\mu, \sigma^2)$

et $\log S_{ij} = cste + a * Lg_{feuil_{ij}}$

Modèle B_3 :

Soit Lg_{feuil} et $Ordre_ram \rightarrow N(\mu, \sigma^2)$

et $\log S_{ij} = a * Lg_{feuil_{ij}} + \phi * Ordre_ram_i$

Avec

i représente le manchon d'aiguilles considéré

Lg_{feuil_i} désigne la longueur feuillée du manchon considéré

$Ordre_Ram_i$ est l'ordre de ramification de l'axe qui porte le manchon i

S_{ij} désigne la section porteuse, pour le i ème embranchement

a est l'effet global de la surface foliaire par manchon

On choisira le modèle s'ajustant le mieux aux données et expliquant la plus grande part du modèle en respectant l'hypothèse de parcimonie.

Les embranchements :

Si $n < 20$

$$Sc_{(t,i+1)} = g(\sum Sc_{(t,i)})$$

Pour déterminer ce paramètre j'ai à ma disposition un jeu de données avec 3 âges d'individus (8, 22 et 47 ans) récolté avec un unique protocole similaire pour les 3 âges.

La question que l'on se pose est :

Peut-on prévoir la section porteuse dans un embranchement en fonction des surfaces portées chez le pin maritime?

On émet donc l'hypothèse correspondante :

H_0 : La section porteuse dépend des sections qu'elle porte.

Modèle C :

Soit $S_{porte} \rightarrow N(\mu, \sigma^2)$

et $S_{porteur_i} = a * S_{porte_i}$

Avec

i représente l'embranchement considéré

S_{porte_i} désigne la section porteuse, pour le i ème embranchement

$S_{porteur_i}$ désigne la somme des sections portées, pour le i ème embranchement

a est l'effet global de la somme des sections portées

Tronc (et cas de pousse sans ramification) :

$$Stot_{(t,i+1)} = k1 Sc_{(t,i)} / (1 - \%bois coeur)$$

Pour paramétrer cette partie du modèle on s'est référé aux relations décrites dans les articles de Knapic et Pereira (2005) et Pinto et al (2003). La relation écrite dans l'article étant fautive (surement fautes de frappe), j'ai simplifié la relation présentée dans le texte pour obtenir une régression linéaire du type :

Si $n < 20$

$\%S_{coeur} = 0$

Si $n > 20$

$\%S_{coeur} = 0,5 * (n - 20)$

Avec $\%S_{coeur}$, le pourcentage de bois de cœur présent de la pousse à l'année considérée et n l'âge cambial de la pousse

On vérifiera la vraisemblance du modèle en comparant le diamètre à 1m30 au diamètre à 1m30 trouvé dans les relevés d'inventaire forestier.

IV. La croissance en peuplement

Maintenant que l'individu est paramétré de manière satisfaisante, je vais pouvoir simuler la croissance d'individus en peuplements avec interactions inter-individuelles.

A. Les contraintes dues à la croissance en peuplement

Lorsque l'arbre pousse en peuplement il est soumis à de nombreuses contraintes extérieures : compétition pour les ressources (eau, nutriments, lumière), libre croissance impossible ou intervention humaine (sylviculture). On décide de mettre de côté le premier type de contrainte, qui est difficile à simuler dans le cas de l'eau et des nutriments. On considèrera qu'à l'échelle de la parcelle la même contrainte s'applique sur tous les arbres avec la même intensité. Pour ce qui est de la lumière on ne s'en est pas préoccupé par manque de temps et pour mieux se concentrer sur les autres aspects. De plus on considère en se plaçant

dans le cas d'une plantation équiennne mono-spécifique que la compétition pour la lumière est négligeable par rapport à la compétition spatiale.

AmapSim est un logiciel qui a été créé initialement pour simuler des arbres de manière individuelle. La simulation de peuplement est donc un travail pour lequel il faut créer de nouveaux outils, que l'on appellera module externes. Ces modules sont connectés au simulateur par défaut, sont déclenchés à intervalles de temps réguliers ou bien lors d'évènements de simulation particuliers. Ils ont accès d'une part à la structure des plantes en cours de simulation et aux paramètres du simulateur. Ils ont ainsi la capacité de modifier le comportement par défaut d'AmapSim voir *Figure 4*.

Comme présenté plus haut il a été choisi de mettre en place un module de « gêne stérique » pour tenir compte de l'effet de timidité des cimes. On a également créé deux modules qui reproduisent des actions sylvicoles: l'élagage et les éclaircies. On ne se servira que du deuxième que l'on appellera « sylviculteur ».

1. Mise en place du peuplement

On a pour objectif de fournir au moins des placettes de 16m de côté pour les maquettes de peuplements. On va se référer aux conseils de gestion de l'ONF et du CRPF pour mettre en place notre plantation initiale, en comparant avec les densités des données d'inventaire que nous avons à notre disposition.

On ne veut pas de déformation sur nos arbres de bord de placette, dû au fait qu'ils n'ont pas de voisinage. Pour se faire on simulera une ligne supplémentaire sur chaque côté ce qui supprimera ce phénomène. Les maquettes finales ne comprendront pas ces rangées.

2. Création d'un module de gêne stérique

L'intérêt de ce stage est de fournir un ensemble de maquettes qui soient représentatives de la réalité. Un entrecroisement des houppiers renverrait un signal associé à une plus forte densité de branches que dans la réalité. Il faut éviter ce phénomène.

Pour ce faire la scène constituée de nos arbres est voxélisée à chaque pas de temps, selon une échelle réglable. Il est alors possible de savoir si un bourgeon se trouve à proximité d'un élément d'une autre plante. Le test est que si un voxel contient un bourgeon et un autre organe appartenant à deux plantes différentes alors le bourgeon arrête sa croissance et meurt.

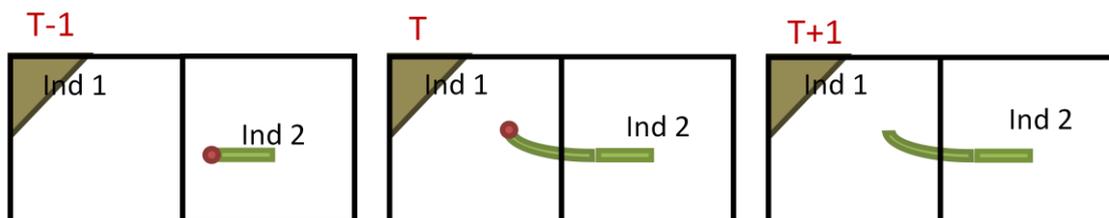


Figure 8- Schéma d'explication du module de timidité

Dans ce module il est possible de faire varier la taille du voxel unitaire et d'ajouter si on le souhaite un « bonus de croissance verticale » si la gêne latérale est trop importante.

On décide également de rajouter une option qui permet de mettre en dormance le bourgeon un certain temps avant sa mort. Avant ce délai le bourgeon redémarre une fois la gêne stérique supprimée, après il meurt et s'élague selon le paramétrage choisi.

3. Création d'un sylviculteur

La majorité des forêts françaises sont gérées, c'est d'autant plus vrai dans la région forestière des Landes de Gascogne. Donc on ne peut créer des maquettes sans intégrer la contrainte de gestion. En effet les éclaircies vont entraîner la formation de troué dans le peuplement qui vont ensuite être rebouché par la croissance des houppiers voisins. La texture du modèle normal de surface (MNS) en est affectée. C'est cette dynamique qu'il faudrait reproduire.

En considérant les conseils de gestion du CRPF (Centre Régional de Propriété Forestière), les documents techniques de l'ONF (Office national des Forêts) sur la sylviculture du pin maritime et l'évolution de la densité sur nos placettes en fonction de l'âge du peuplement, un modèle de sylviculture peut être mis en place. Il est basé sur la sélection d'un pourcentage du nombre total d'arbre à une date choisie, soit en appliquant un critère (DBH ou hauteur), soit en travaillant sur une sélection spatiale.

B. Grandeurs pris en compte pour valider le modèle

Il faut entreprendre un ensemble de vérification successive comme on l'avait fait pour le modèle individuel. Trois types de grandeurs paraissent pertinentes : vérifier l'épaisseur du houppier, caractériser l'espace inter-couronne et travailler sur la perméabilité du houppier.

1. Profondeur du houppier

a) Explication du choix de cette grandeur

La majorité du signal LiDAR intercepté par un peuplement forestier l'est par son houppier. Il est donc important d'avoir une bonne estimation des caractéristiques de l'étage des couronnes, son épaisseur par exemple.

b) Actions entreprises

Pour ce faire on va extraire de nos simulations avec Computree la hauteur totale de chaque arbre, ainsi que la hauteur de première branche sur le peuplement entier. Un traitement préalable est nécessaire sous Simeo, pour transformer les maquettes à éléments géométriques en nuages de points.

On va comparer ensuite ces extractions au même type d'extraction (hauteur totale et hauteur de première branche vivante de chaque houppier) sur les placettes LiDAR-T cette fois. Si c'est nécessaire on modifiera l'ajustement fait sur les hauteurs totales et de premières branches au début de la démarche. Puis on validera le nouvel ajustement en comparant à nouveau l'épaisseur simulée et l'épaisseur réelle.

2. Travail sur l'espace inter couronne

c) Explication du choix de cette grandeur

Pour étudier la structure du signal renvoyé par un peuplement de pin maritime, il faut également s'intéresser à la proportion de sol visible du ciel. C'est une grandeur qui impacte énormément le signal LiDAR. On va comparer les espaces créés par notre simulation à ceux que l'on peut observer sur nos placettes LiDAR.

d) Actions effectuées

Cette fois au lieu de détourner chaque couronne comme on le faisait dans l'étape individuelle, on s'occupera d'isoler les espaces inter-couronnes et de les caractériser sur notre jeu de données TLS. Pour ce faire on va sélectionner des indices qui nous semblent caractériser les espaces inter-couronnes de manière quantitative et qualitative.

Indice considéré	Justification
% de sol visible	Mesure globale au cours du temps de la surface des trouées ramenée à la surface totale
Nombre de trouée	
Taille moyenne de trouées	Mesure moyenne au cours du temps de la taille des trouées
Ecart-type de la taille de trouées	Mesure de la variabilité au cours du temps
Répartition des effectifs de trouées par catégories	Caractérisation plus fine de la répartition en classe des trouées / Comprendre le type de trouée majoritaire
% de sol visible par classe de trouées	Caractérisation plus fine de la répartition en classe des trouées.

Tableau 3- Tableau des indices possibles pour la comparaison des trouées simulées aux trouées observées.

On pourra comparer le pourcentage de trouée avec les ordres de grandeurs présentés par Nilson (1999) pour d'autres peuplements de pin (*Pinus sylvestris*). Les densités et les hauteurs observées dans ces peuplements sont similaires à nos relevés de terrain.

Ces indicateurs ne donnent qu'une information imparfaite sur l'espace inter-couronne. On pourrait également étudier les caractéristiques spatiales de la répartition des trouées. Il faudrait travailler sur une approche SIG, que l'on pourrait développer dans un deuxième temps.

S'il y a besoin de rectifier la taille, le nombre ou la répartition des trouées, on peut opérer à des réajustements à l'échelle individuelle sur la surface projeté de couronne. C'est cette modification que l'on va privilégier.

Il est possible également de modifier les modules ajoutés en contrainte sur le peuplement. Celui de gêne stérique permettrait que la réaction post-éclaircie change. Celui de sylviculture permet de changer l'échantillonnage des arbres sélectionnés et donc de la répartition des trouées. Pour se faire il suffirait de modifier le critère de sélection pour les

éclaircies (hauteur au lieu de diamètre ou élimination d'un individu sur trois). Ci-dessous vous pouvez trouver le schéma récapitulatif de la chaîne de traitement envisagée.

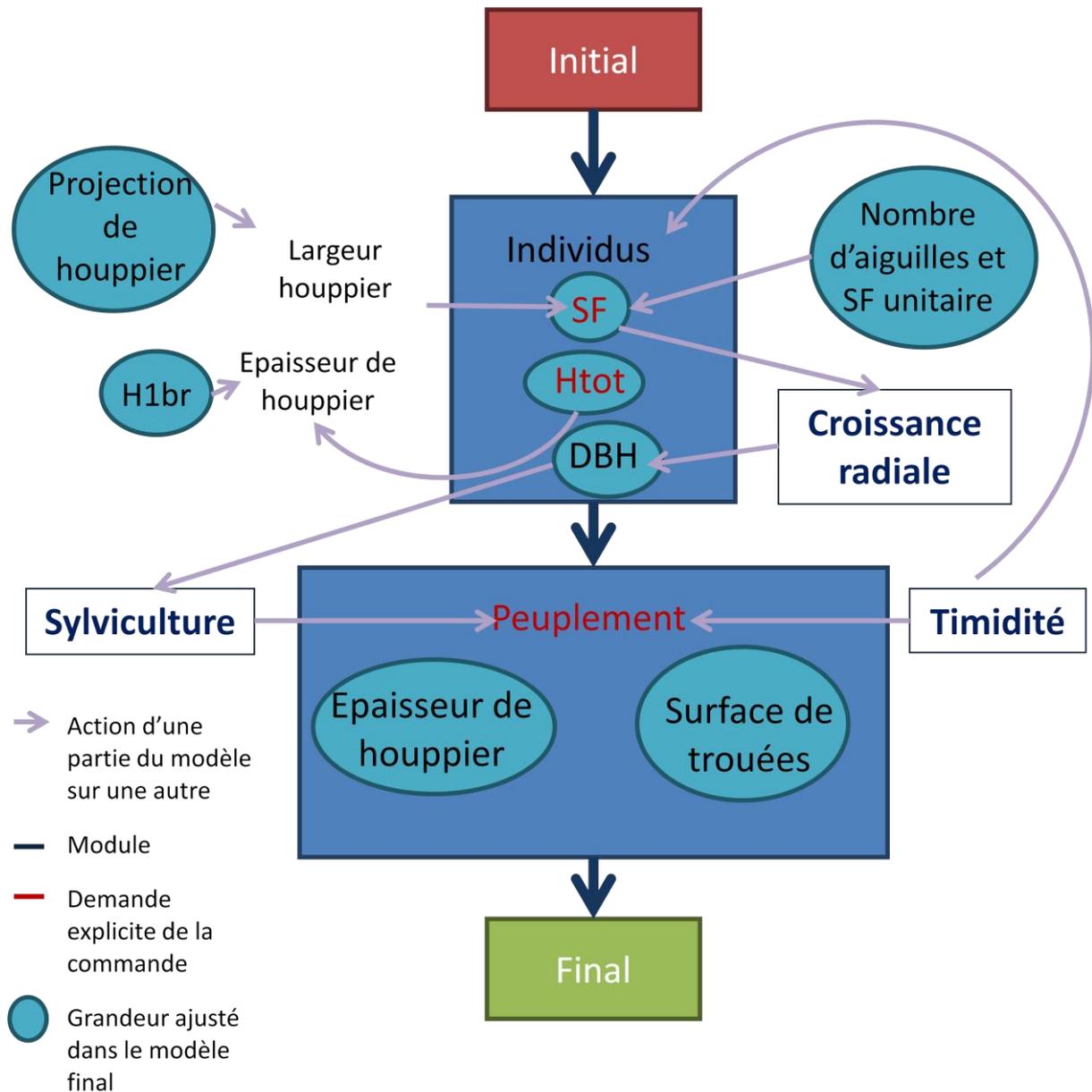


Figure 9- Schéma explicatif des paramètres ajustés

Résultats

Dans cette partie seront présentés les résultats majeurs obtenus lors de ce stage. Les résultats moins importants dans la compréhension du travail seront mis en annexe pour une meilleure clarté du rapport.

I. Travail préliminaire : détermination de la classe de fertilité

Si on compare graphiquement la courbe de tendance de l'évolution de la hauteur totale en fonction de l'âge de l'arbre, on obtient le graphique suivant.

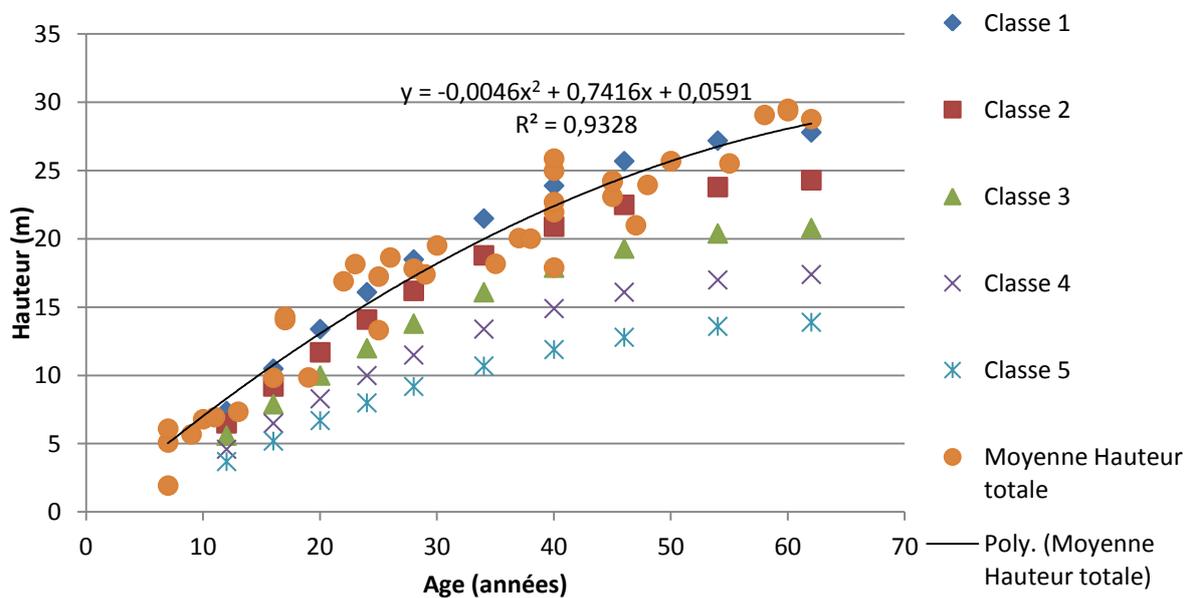


Figure 10- Hauteur des peuplements (en m) en fonction de leur âge : moyenne mesurée par placette (Vertex, orange) mis en perspective avec les classes de fertilité de Lemoine (1969).

Les classes sont de plus en plus fertiles dans l'ordre décroissant. L'ensemble de nos placettes terrain semble être compris dans les classes de fertilité élevées de Lemoine (1969). Je décide de faire l'hypothèse que toutes nos placettes suivent une courbe unique de fertilité, pour faciliter mes calculs.

De plus on peut observer qu'il y a une très faible variation au niveau des grandeurs climatiques et pédologiques sur la surface de notre site d'étude (*annexe 3*). Il semble donc qu'il y a peu de variations de l'environnement pour les différents peuplements. Cette étude un peu plus approfondie nous conforte dans l'idée que l'on peut considérer nos placettes comme un ensemble d'âges différents d'un même peuplement.

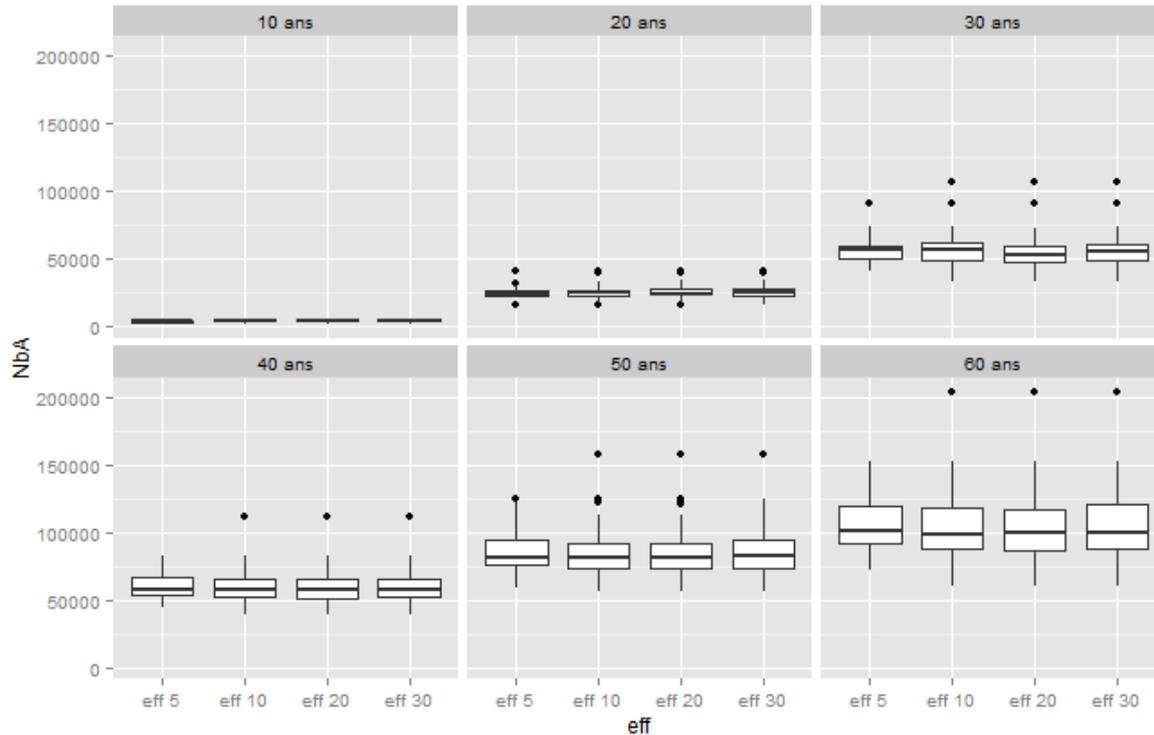


Figure 11- Choix de l'effectif de simulation optimal pour des effectifs variant de 5 à 30 individus pour des âges de 15 à 60 ans.

On observe que la moyenne du nombre de feuilles semble être stable quel que soit l'effectif que l'on considère. Pour ce qui est de la variabilité, ce n'est qu'à partir de l'effectif 10 que l'on observe sa stabilisation. On choisit d'effectuer 10 répétitions car c'est un bon compromis entre le gain de temps d'un petit nombre de répétition et la précision d'un grand nombre de simulation. De plus sur les graphiques ci-dessus on remarque que la variabilité de l'échantillon est souvent aussi bien décrite pour 10 individus que pour 30.

II. Niveau individuel

Pour chaque étape on va exposer les différences entre la simulation initiale et les grandeurs de terrain, puis présenter les modifications apportées au modèle et enfin comparer les mesures de terrain avec la simulation finale. On s'intéressera à la hauteur totale, la profondeur de houppier, la surface projetée de couronne, la surface foliaire totale et le diamètre à 1m30.

A. La hauteur totale

1. Comparaison des valeurs simulées avec le modèle initial et des données de terrain

On peut remarquer que la hauteur totale de l'arbre du modèle initial n'est pas comparable à celle mesurée sur notre site d'étude :

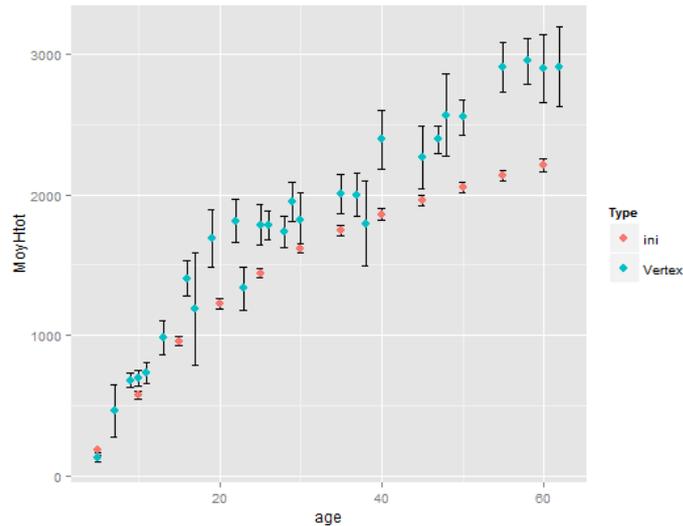


Figure 12- Hauteur totale (en cm) en fonction de l'âge : moyenne mesurée par placette (Vertex, en bleu) et moyenne sur 10 simulations (ini, en rouge) avec leur écart-type.

La hauteur simulée est plus faible que la hauteur réelle. Surtout en ce qui concerne les âges supérieurs à 40 ans. De plus on remarque que la variabilité est plus faible pour nos simulations, que pour les placettes.

2. Modifications apportées au modèle d'AmapSim

On a modifié les paramètres dans AmapSimEdit en allongeant la partie néoformée du premier cycle de chaque pousse. On a augmenté le nombre d'entre-noeuds en se basant sur les mesures faites par Coudurier et al (1993) et les conseils d'Yves Caraglio.

Age physiologique	Ancien modèle		Nouveau modèle	
	pré-formé	néo-formé	pré-formé	néo-formé
1	3	13	3	27
2	3	13	3	27
5	8	32	8	46
10	17	68	17	83
15	11	44	11	49
20	8	32	8	37
45	4	16	8	37

Tableau 4- Comparaison des paramètres (ancien/nouveau) pour les longueurs de premier cycle de pousse pour les pousses de l'axe principal.

On passe d'une longueur par pousse pour le premier cycle de 20 à 45cm pour des arbres supérieurs à 40 ans. Cela va permettre de « redresser » la courbe pour les âges avancés.

3. Comparaison des valeurs simulées aux données de terrain après modifications

On obtient alors une hauteur moyenne beaucoup plus proche de nos données de terrain.

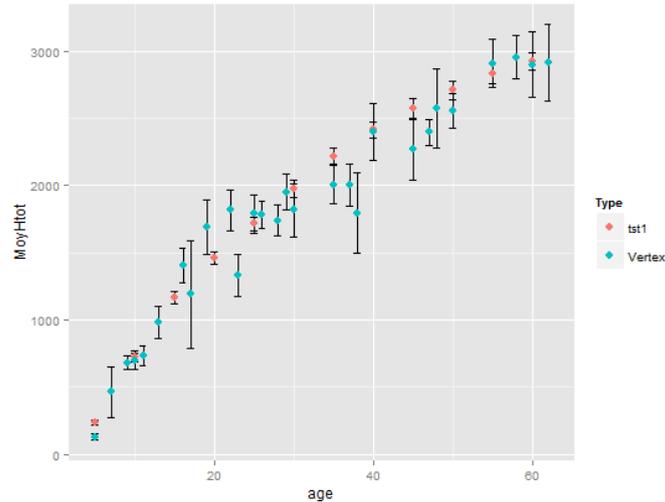


Figure 13- Hauteur totale (en cm) en fonction de l'âge : moyenne mesurée par placette (Vertex, en bleu) et moyenne sur 10 simulations (après modification, en rouge).

Ici sont représentées les moyennes de nos simulations avec leur écart-types : on observe une nette amélioration de ce paramètre de notre modèle. Si on s'intéresse à la variabilité à un même âge de hauteur on remarque quelle est un peu plus forte que pour la simulation initiale.

B. L'épaisseur de houppier

En parallèle du paramétrage de la hauteur totale on paramètre l'épaisseur de houppier. L'épaisseur de houppier est la hauteur entre la plus basse des branches portant des aiguilles et l'apex terminal. Pour ce faire il nous faut obtenir une bonne hauteur de première branche vivante.

1. Comparaison des valeurs simulées avec le modèle initial aux données de terrain

On remarque que la hauteur de la première branche vivante dans les simulations a la même valeur que dans la réalité (*annexe 5*) pour notre modèle initial. Dans ce cas la hauteur totale est plus faible.

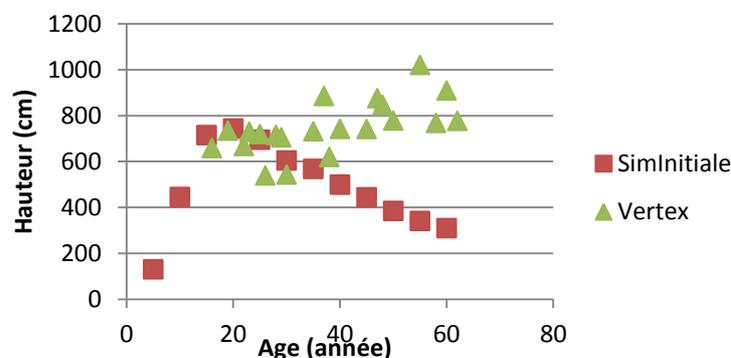


Figure 14- Profondeur du houppier (en cm) en fonction de l'âge : moyenne mesurée par placette (Vertex, en vert) et moyenne sur 10 simulations (avant modification, en rouge).

Donc si on compare l'épaisseur de houppier simulée et celle observée sur le terrain, on constate une importante différence à partir de 40 ans. Le houppier simulé est de moins en moins épais, alors que celui observé sur le terrain est de plus en plus épais. Il nous faut modifier la hauteur de première branche pour obtenir une épaisseur de houppier correct.

2. Rectifications grâce aux données de terrain

L'âge d'élagage initial est de 25 ans à partir de la création des branches qui partent du tronc (A2), de 15 ans pour celles portées par des A2 (A3) et 10 ans pour celles portées par des A3 (A4). J'ai rallongé l'âge de 5 à 10 ans pour les branches principales et de maximum 5 ans pour les ramifications plus fines, afin d'obtenir la même hauteur de première branche

De plus dans le modèle initial la branche tombait dès la mort du bourgeon terminal. Ce qui est non justifiable physiologiquement. En effet sur nos placettes de terrain on observe de nombreuses branches mortes présentes sous le houppier. J'ai donc ajouté un délai de maintien de la branche sur l'arbre après la mort de son apex. Il y a en moyenne 5.8 m entre la première branche morte en partant du bas et la première branche vivante.

3. Comparaison des valeurs simulées aux données de terrain après modifications

Après modification du modèle on obtient une profondeur de houppier plus cohérente avec les données. Le manque de données pour les âges inférieurs à 15 ans ne nous permet pas de connaître la tendance d'élagage sur cette fourchette. Les maquettes simulées sont visuellement cohérentes avec ce que l'on observe sur le terrain.

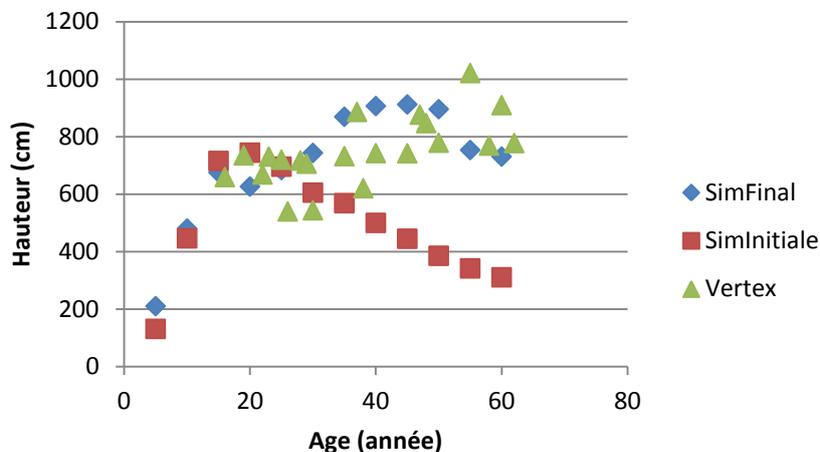


Figure 15- Profondeur de houppier (en cm) en fonction de l'âge : moyenne mesurée par placette (Vertex, en vert), moyenne sur 10 simulations avant (en rouge) et après (en bleu) modification du modèle.

On a comparé les hauteurs de première branche du nouveau modèle (toutes hauteurs corrigées). Elles sont bien cohérentes avec ce que l'on observe sur le terrain (*annexe 5*).

C. La taille de la couronne

1. Comparaison des valeurs simulées avec le modèle initial aux données LiDAR-T

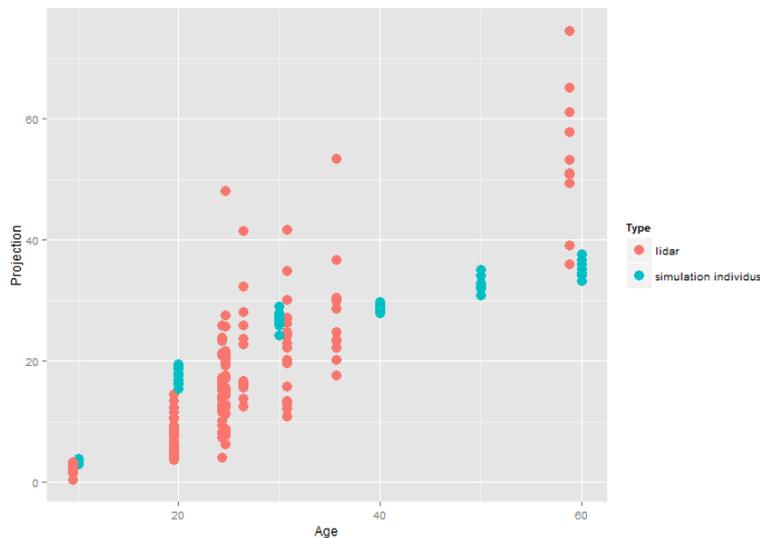


Figure 16- Projection de couronne (en m²) en fonction de l'âge : pour les individus de chaque placette (LiDAR-T, en rouge) et pour chaque individus simulés avant modification du modèle (en bleu).

On observe tout d'abord que l'évolution avec le temps de la couronne n'est pas la même dans les deux cas. Pour les données en Lidar-T, la surface de la couronne projetée évolue de manière exponentielle. Pour les données simulées, on peut observer une augmentation de la surface projetée avec l'âge de moins en moins rapide.

De plus il existe une grande variabilité de surfaces de couronnes projetées des données réelle pour un même âge. Cette variabilité augmente avec l'âge. Cela n'est pas le cas des couronnes simulées.

2. Rectifications grâce aux données de terrain

Il faut augmenter la surface de couronne projetée. Pour ce faire je vais augmenter l'angle d'insertion des branches de 60 à 80. Le jeu de données qui m'a permis de modifier ce paramètre est celui du calibrage initial. Aucune autre modification ne sera envisagée, attendant de savoir l'importance des modifications des houppiers dues à la croissance en peuplement.

3. Comparaison des valeurs simulées aux données de terrain après modifications

On peut après modifications ré-extraire les surfaces de couronnes et comparer les nouveaux résultats aux anciens résultats.

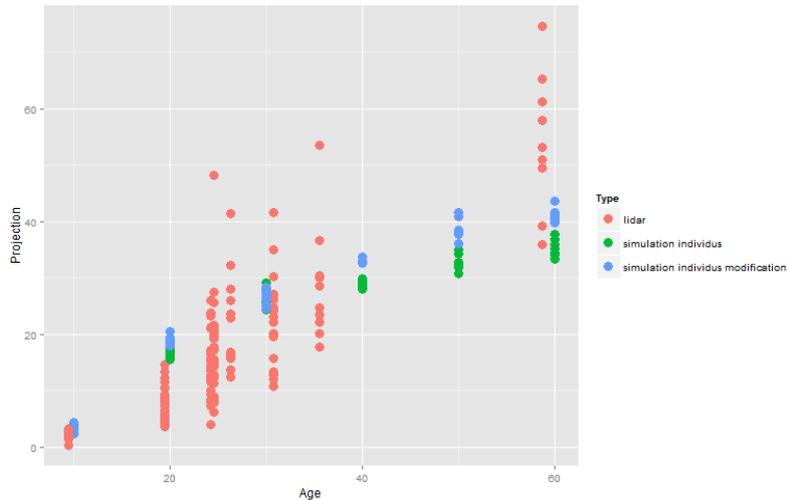


Figure 17- Projection de couronne (en m²) en fonction de l'âge : pour les individus de chaque placette (LiDAR-T, en rouge) et pour chaque individus simulés avant (en vert) et après modification du modèle (en bleu).

On remarque que les nouveaux paramètres de simulation améliorent l'ordre de grandeur de la surface projetée de couronne. On ne fera pas d'autres modifications avant l'étude de la croissance en peuplement.

D. La surface foliaire

1. Comparaison des valeurs simulées avec le modèle initial aux données prédites à partir de relations allométriques

On peut obtenir une prédiction de la surface foliaire en fonction de l'âge de l'arbre de deux manières différentes.

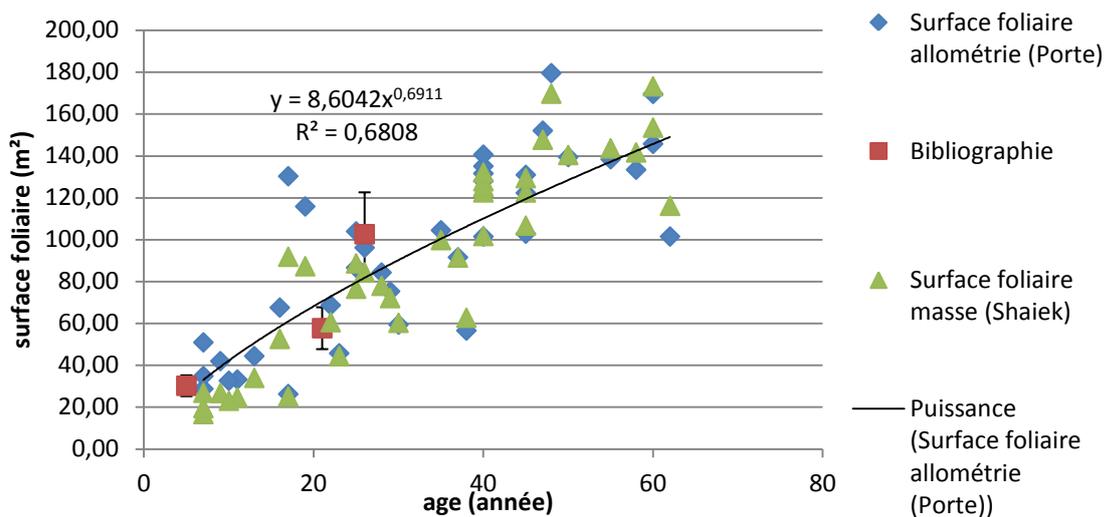


Figure 18- Prédiction de la surface foliaire moyenne par placette en fonction de l'âge de l'arbre à partir des données terrain (selon Porte(1999), bleu et selon Shaiek 2011, vert) et comparaison avec les surfaces foliaires tirées de A. Porte (1999) (rouge).

Ce graphique représente l'évolution de la surface foliaire en fonction de l'âge de l'arbre : il y a superposition des 3 cas. Cela nous permet d'estimer cette prédiction comme assez robuste pour être utilisé dans notre cas.

Pour la suite de notre travail on va considérer la surface foliaire prédite avec le modèle d'A. Porte comme réaliste et essayer de simuler une surface foliaire totale individuelle ayant la même évolution.

Si on observe l'évolution de la surface foliaire avec l'âge on se rend compte qu'elle augmente sur toute la vie de l'arbre dans le cas des données de terrain. A contrario lors de la simulation, à partir de 30 ans on a une décroissance de la surface foliaire. De plus la surface foliaire totale simulée est largement surestimée dans le cas de nos simulations.

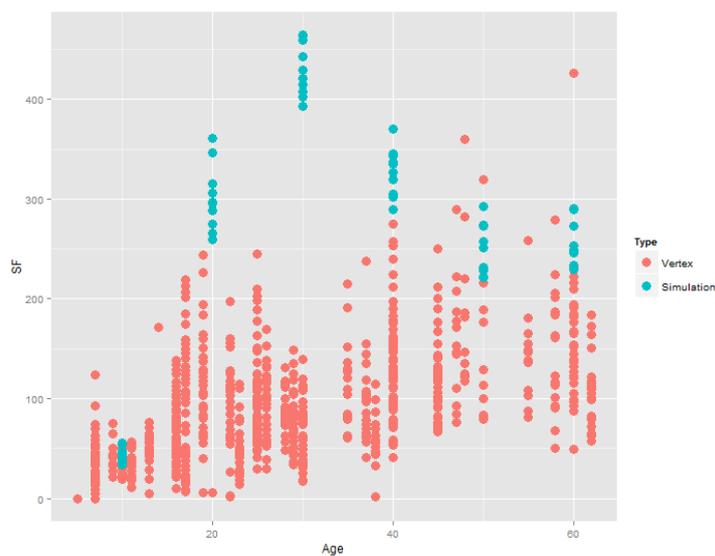


Figure 19- Comparaison des prédictions de la surface foliaire des arbres de terrain (rouge) et de la surface foliaire simulée (bleu).

On reprend les trois aspects abordés dans la partie méthodologie.

- La surface foliaire unitaire et le nombre de feuilles par manchon

Caractéristiques	simulation			Terrain			Facteur multiplicatif
	min	max	moyenne	min	max	moyenne	
Surface foliaire unitaire (cm ²)			60	3	14	9	6
Nombre de feuilles par manchon	270	495	360	4	282	75	5

Tableau 5- Comparaison des caractéristiques déterminant la surface foliaire par manchon pour les données de terrain et les données simulées

On remarque donc que la surface unitaire par manchon de nos simulations est 36 fois plus importante que celle que l'on pourrait attendre sur le terrain.

- Le nombre de manchons

On va donc s'intéresser à l'âge physiologique des pousses portant des feuilles, pour comprendre la répartition des feuilles en fonction de l'ordre de ramification.

Dans l'explication qui suit on utilisera les dénominations de la figure 2. D'après le diagramme ci-dessous on peut observer qu'à 50 et 60 ans le nombre de pousses feuillées en A3 est en forte diminution. De plus on ne recense aucune pousse de niveau trois de ramification alors qu'elles devraient être les plus nombreuses à porter des aiguilles.

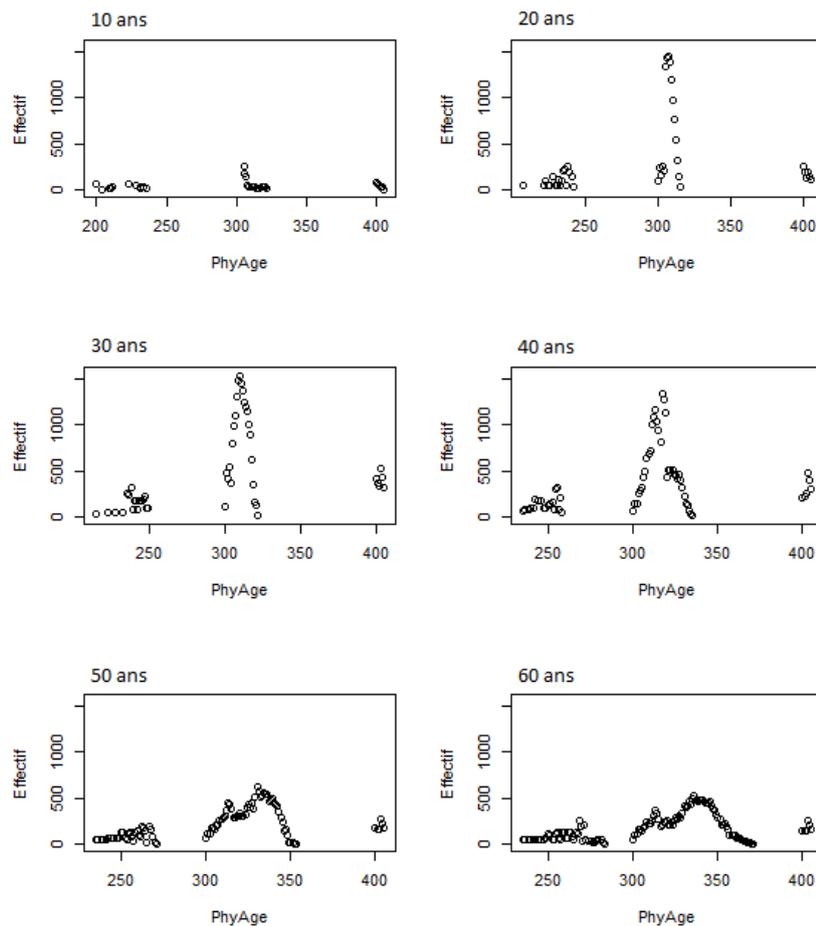


Figure 20- Effectif des pousses feuillées par âge physiologique à différents âges de la vie de l'arbre

On remarque qu'il y a très peu de pousses portées par les ramifications A4 quel que soit l'âge considéré. Cela signifie que les branchaisons les plus fines ne portent pas d'aiguille, ce qui n'est pas réaliste.

De plus en comparant les données de terrain initial avec les simulations on se rend compte que le nombre de ramifications portées par l'axe principal est différent. Cela donne un aspect moins dense au houppier. Cet aspect va également être rectifié.

2. Modifications apportées au modèle AmapSim

Pour cette étape on a préféré détériorer un peu le réalisme de la répartition des feuilles dans le houppier et garder la structure architecturale paramétrée initialement. Cela n'aura pas d'influence sur l'indicateur qui nous sert de référence : la surface foliaire totale de l'arbre.

On a commencé par rétablir la présence de ramification A4, en utilisant deux paramètres distincts :

- La probabilité de ramifier, que l'on a fixée à 0.4
- La moyenne du nombre de ramifications sur une unité ramifiée, que j'ai fixée à 1.5

Puis on a cherché à rétablir la probabilité de ramification au niveau de l'axe principale en utilisant les informations collectées par Heuret et al (2006). Une ramification au niveau de l'axe principal porte quatre branches en moyenne et non seulement deux.

Paramètres	Avant modification	Après modification
Probabilité d'obtenir le maximum de ramification	1	0.7
Maximum de ramification	2	3
Nombre moyen de ramification par entre-noeud	2	2.1
Nombre d'entre-nœud ramifié par pousse	1	2
Nombre moyen de ramification par pousse	2	4.2

Tableau 6- Modifications faites sur la probabilité de ramification de l'axe principal

C'est les seules modifications de la structure architecturale qui peut se faire facilement sans détérioration de l'ensemble de la structure. On compensera avec la modification des autres paramètres notre volonté de ne pas aller plus avant dans les modifications à cette échelle.

Ensuite on va s'intéresser à la surface foliaire par manchon. D'après les résultats ci-dessus on devrait diviser par 30 la surface foliaire dans le manchon. Dans ce cas la surface foliaire totale est vraiment trop basse. On va donc décider de ne diviser que par 8 la surface foliaire par manchon, pour garder une surface foliaire totale cohérente. Ce qui correspond à :

Caractéristiques	Avant modification	Après modification
Largeur de la feuille (cm)	3	0.5
Longueur de la feuille (cm)	20	20
Nombre d'aiguilles par cm	3	2
Longueur de pousses feuillées (cm)	270-495	270-495

Tableau 7- Présentation des nouvelles valeurs des paramètres déterminants la surface foliaire par manchon

3. Comparaison des valeurs simulées aux données prédites à partir de relations allométriques après modification

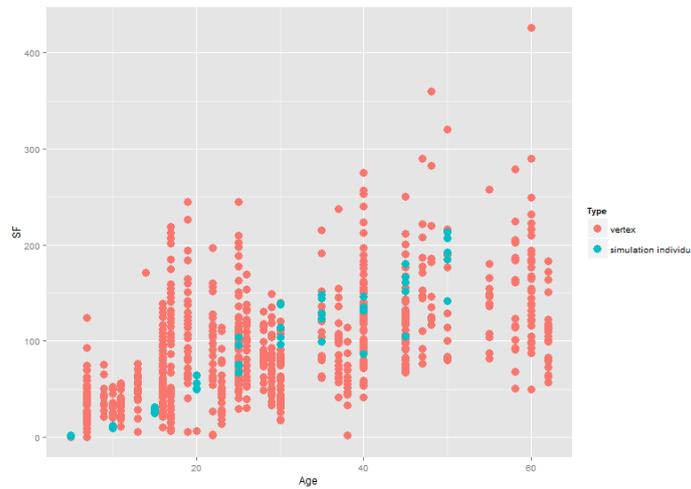


Figure 21- Comparaison des prédictions de la surface foliaire des arbres de terrain (rouge) et de la surface foliaire simulée après modifications (bleu).

On remarque sur ce graphique que la surface foliaire totale simulée est incluse dans la surface foliaire prédite à partir de notre jeu de données de terrain. Ce qui nous permet de valider cette grandeur et d'étudier l'étape suivante.

E. Le diamètre à 1m30

La détermination du diamètre à 1m30 est complètement dépendante de la surface foliaire présente sur l'arbre. Maintenant que cette dernière est paramétrée de manière satisfaisante, on peut s'occuper de calibrer le modèle d'accroissement radial.

1. Comparaison des valeurs simulées avec le modèle initial aux données prédites à partir de relations allométriques

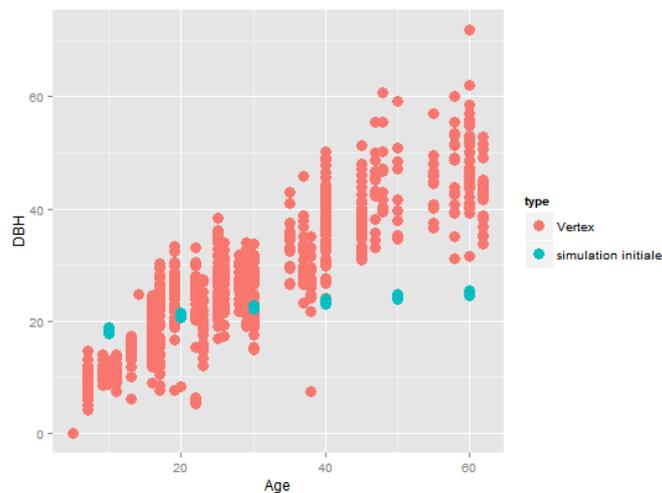


Figure 22- Diamètres observés (bleu) et simulé (rouge) en fonction de l'âge.

On remarque que le diamètre à 1m30 est quasi constant au cours du temps quand on le simule avec le modèle par défaut. Or ce diamètre est en constante évolution au cours du temps quand on observe les mesures de terrain. Il va donc falloir modifier le modèle de diamètre du pin maritime.

2. Paramétrage du modèle de croissance radiale

Comme expliqué plus haut pour obtenir un diamètre cohérent il me faut créer un nouveau modèle d'ajustement de la section de l'arbre. Le modèle théorique a été présenté dans la partie méthode, voici l'estimation des paramètres.

Modèle	Cste	A	ϕ	R ²
Modèle A		0.014*** (0.00025)		0.92
Modèle B ₁		0.070*** (0.0025)		0.62
Modèle B₂	-2.26***(0.035)	0.11*** (0.0026)		0.78
Modèle B ₃		0.084*** (0.0029)	Ordre_Ram2 : -0.18 (0.14) Ordre_Ram2 : -1.71*** (0.062) Ordre_Ram3 : -2.17*** (0.034) Ordre_Ram4 : -2.30*** (0.043) Ordre_Ram5 : -2.12*** (0.20)	0.93
Modèle C		0.95*** (0.0037)		0.94

Tableau 8- Présentation des différents modèles rentrant en compte dans la modélisation de la croissance radiale.

On constate que le modèle qui est le plus représentatif de notre jeu de données est le modèle B3 à associer avec le modèle A et le modèle C (cf Méthode III. B. 4. b.).

Pourtant pour respecter la volonté de simplification et de généralisation à d'autres cas d'étude émis par le développeur d'AmapSim (Jean-François Barczi), on choisira le modèle linéaire passant par 0 le plus proche de la combinaison de modèles A+B2 sur le domaine de validité 500-1000 cm² par manchon (voir *annexe 6* pour plus de détail).

3. Comparaison des valeurs simulées aux données prédites à partir de relations allométriques après modification

Le diamètre que l'on peut observer après modification du module de croissance radiale augmente au cours du temps de manière similaire au diamètre de terrain. Même si la moyenne des diamètres simulés est plus petite que la moyenne des diamètres de terrain, l'ensemble des DBH simulés se trouve dans l'enveloppe représentée par les DBH de terrain.

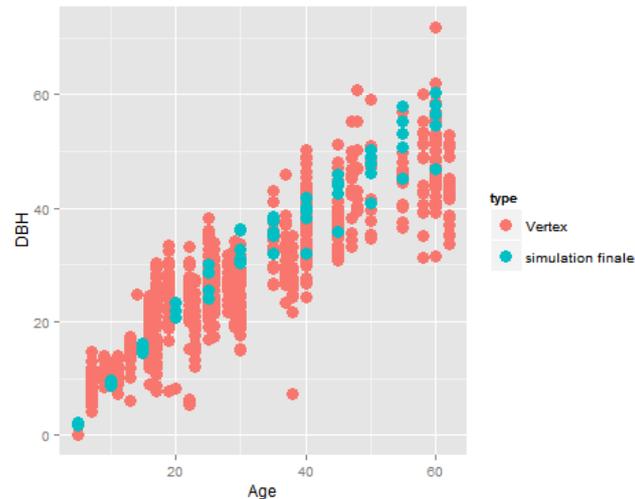


Figure 23- Diamètres observés (bleu) et simulés (rouge) en fonction de l'âge.

III. La création de peuplement

Notre modèle individuel a été validé de manière progressive. Toutes les grandeurs considérées comme pertinentes pour obtenir une maquette réaliste sont maintenant ajustées de manière satisfaisante. On peut donc s'intéresser à la croissance en peuplement.

A. Plan de simulation et paramètre des modules choisis

On a pu relever dans la littérature (CRPF 2008) les espacements de plantations qui sont de 2 m sur une ligne et de 4 m pour les espaces interlignes. Cela signifie que si l'on veut travailler sur une placette de 16m de côté, il nous faut effectuer une simulation de 77 arbres en comptant les bordures supplémentaires (cf *Figure 24*). Les peuplements de notre jeu de données les plus vieux ont plus de 60 ans, on va donc choisir d'effectuer les simulations jusqu'à cet âge-là.

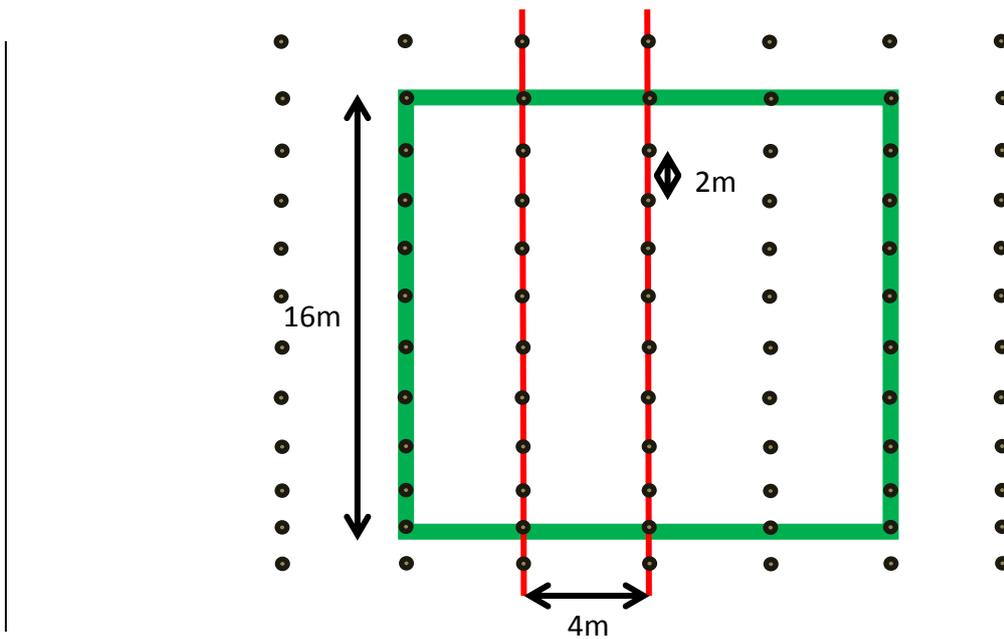


Figure 24-Schéma de la disposition des arbres sur les placettes.

La simulation en peuplement issue de cette configuration va subir les contraintes apportées par les modules de sylviculture et de timidité.

Le module de timidité possède trois paramètres à ajuster : le temps de latence entre le début de la gêne stérique et la mort du bourgeon, le gain de croissance en hauteur lorsqu'il y a gêne latérale et le taille du voxel. Les réglages choisis sont :

Paramètre	Valeur choisie pour le réglage	Signification du réglage
Gain de hauteur	0	Pas de gain de hauteur supplémentaire
Taille du voxel unitaire	50 cm	
Latence avant reprise	0	Mort du bourgeon immédiate

Tableau 9- Ensemble des paramètres à fixer dans le module de gêne stérique

On peut constater visuellement l'effet du module de gêne stérique sur nos simulations.

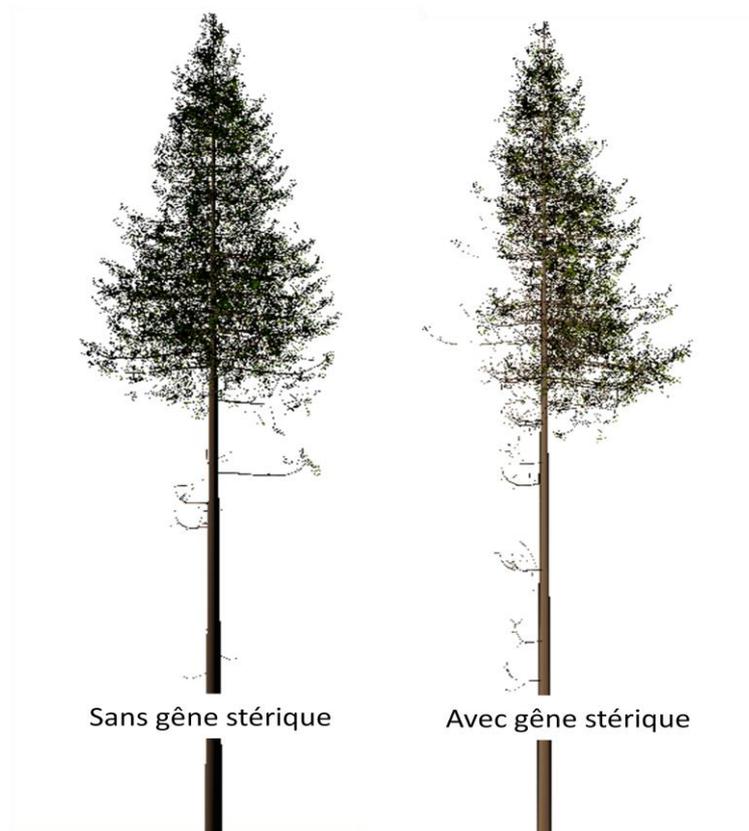
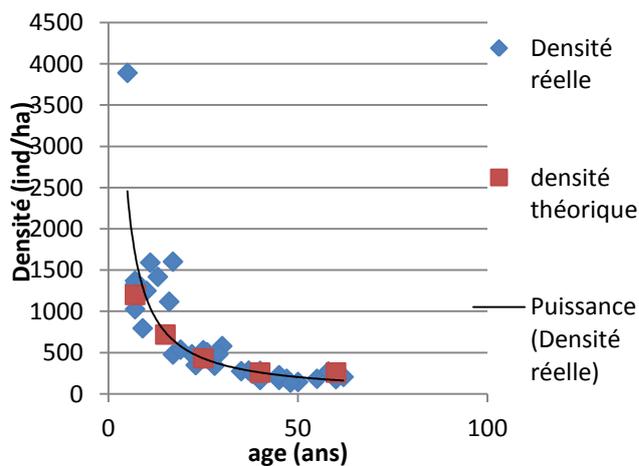


Figure 25-Illustration de l'effet de la gène stérique

Le modèle de sylviculture appliqué s'inspire des fourchettes de pourcentage d'éclaircie trouvé dans le SRGS d'Aquitaine. Le CRPF préconise pour les cycles longs 3 à 4 éclaircies avant la coupe rase entre 10 et 30 ans, qui se situe autour de 50-60 ans. Chaque éclaircie procède à un prélèvement situé entre 35 et 50% pour la première éclaircie et moins de 40% pour les autres. On va adapter ce modèle théorique de sylviculture à notre jeu de données. Ce qui donne les résultats ci-dessous.



Age	Nombre d'arbres de la maquette finale	Nombre total d'arbres de la simulation	Prélèvement (%) lors de l'éclaircie
0			
7	45	77	
15	27	46	40
25	16	28	40
40	10	17	40
60	10	17	

Figure 26-Evolution de la densité du peuplement en fonction de son âge en prenant en compte la sylviculture

Pour que la diminution de la densité de notre modèle corresponde à celle que l'on observe sur nos placettes il faut effectuer trois éclaircies (à 10, 25 et 40 ans) chacune prélevant 40% du peuplement.

On a choisit de prendre comme critère de sélection le diamètre. Ce qui signifie qu'à chaque éclaircie on classe les diamètres par ordre croissant et on décide de prélever les 40 % plus petits diamètres.

La capture d'écran ci-dessous montre le résultat qualitatif de la simulation en peuplement. On étudie ensuite dans les paragraphes ci-dessous certains aspects quantitatifs.

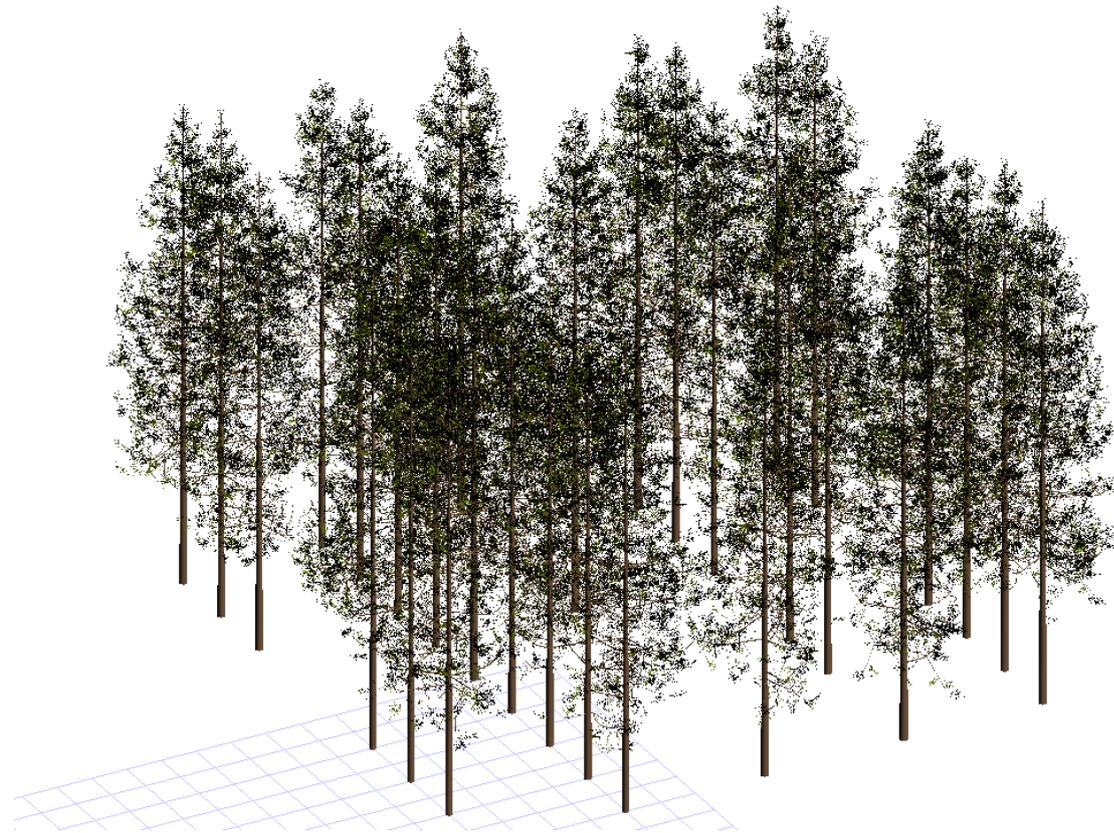


Figure 27- Visualisation d'un peuplement de 19 ans avec les modules de sylviculture et de gène stérique actifs

B. L'épaisseur globale du houppier

1. Comparaison des valeurs simulées avec le modèle initial aux données de terrain

Dans cette partie on va étudier l'épaisseur de houppier simulée avec notre modèle de peuplement et le comparer à la réalité.

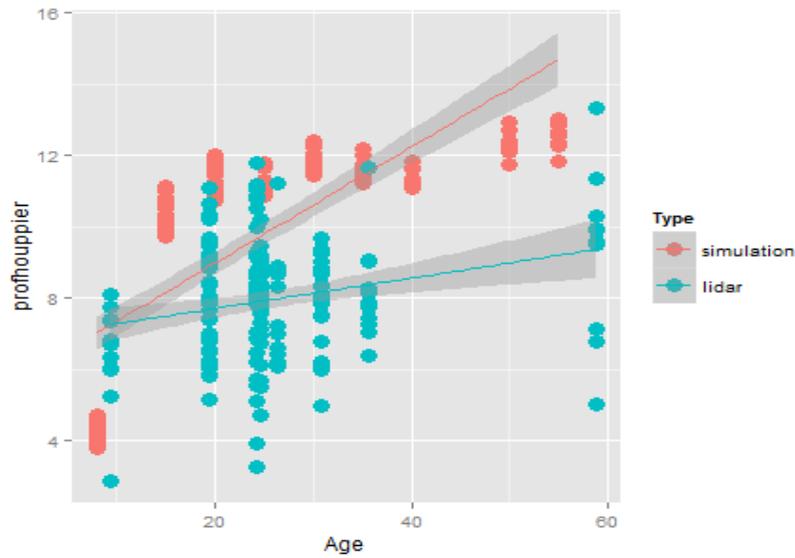


Figure 28- Comparaison de la profondeur de houppier des arbres simulés (rouge) et des arbres des placettes Lidar-T (bleu).

On observe que la profondeur du houppier simulée est supérieure à la profondeur mesurée sur le terrain à partir de 15 ans. Pour les âges inférieurs la profondeur simulée est nettement moins importante. On va modifier la hauteur totale de l'arbre pour diminuer la profondeur de houppier.

2. Modifications apportées au modèle d'AmapSim

On réajuste la hauteur totale au niveau individuel en diminuant la longueur des pousses à 10 ans.

Age physiologique	Ancien modèle		Modèle corrigé		Nouveau modèle	
	pré-formé	néo-formé	pré-formé	néo-formé	pré-formé	néo-formé
1	3	13	3	27	3	27
2	3	13	3	27	3	27
5	8	32	8	46	8	46
10	17	68	17	83	10	80
15	11	44	11	49	11	49
20	8	32	8	37	8	37
45	4	16	8	37	8	37

Tableau 10- Tableau des modifications d'accroissement unitaire en hauteur

La hauteur de première branche étant difficile à ajuster on ne poussera pas les modifications plus avant.

3. Comparaison des valeurs simulées aux données de terrain après modifications

Le graphique ci-dessous présente la profondeur de houppier après modification de la hauteur totale.

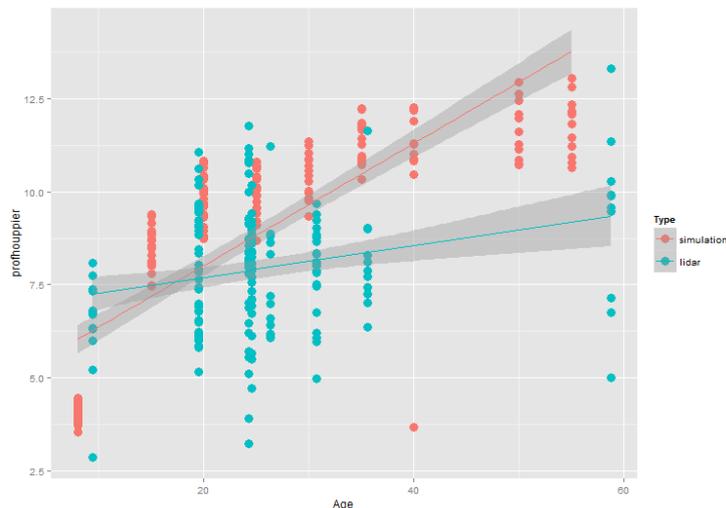


Figure 29- Comparaison de la profondeur de houppier des arbres simulés (rouge) et des arbres des placettes Lidar-T (bleu).

L'épaisseur de houppier est plus proche de la réalité une fois la hauteur modifiée. La profondeur de houppier est encore sous-évaluée à l'âge de 8 ans.

C. Ajustement de l'espace inter-couronne

La grandeur la plus importante à ajuster est l'espace inter-couronnes qui permet d'obtenir la part de sol visible par le satellite Lidar. Dans un souci de concision, seulement certains indices vont être détaillés par la suite : l'effectif des trouées par m², pourcentage de sol visible et effectif par classe des trouées.

1. Comparaison des valeurs simulées avec le modèle initial aux données de terrain

On compare ici les trouées des placettes de terrain de rayon variable (6, 15 et 20) et les trouées des placettes simulées de 16 m de côté.

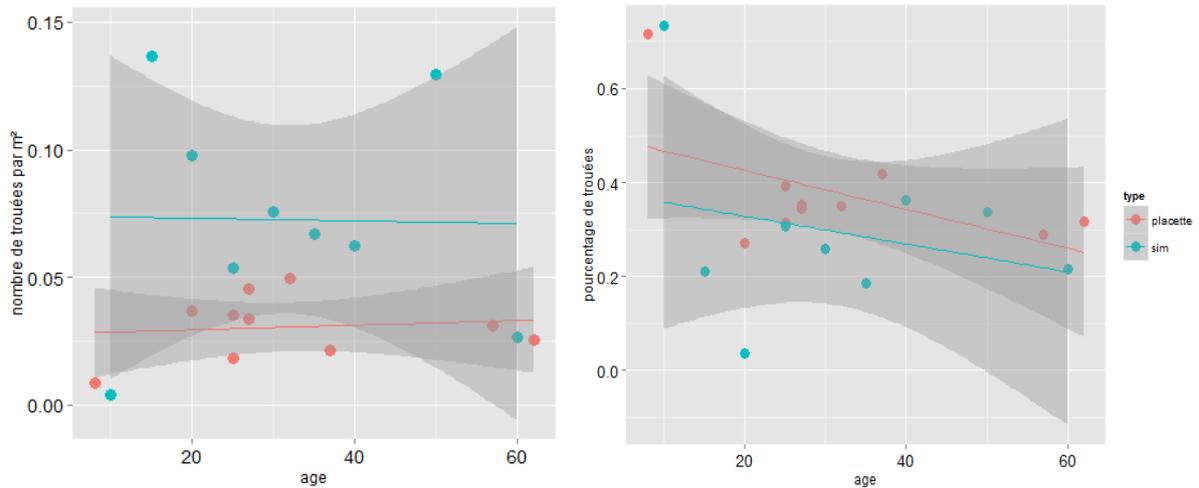


Figure 30- Nombre de trouées (gauche) et pourcentage de sol visible (droite) en fonction de l'âge du peuplement, pour les placettes de terrain (en rouge) et pour les placettes simulées (en bleu).

On peut remarquer que le nombre de trouées observables par unité de surface dans les simulations est plus de deux fois plus important que dans les placettes de terrain. En parallèle on remarque également que le pourcentage de sol visible est en moyenne légèrement plus faible dans le cas de nos simulations.

On constate qu'il faut augmenter la surface occupée par les trouées. Donc on peut diminuer la surface projetée des couronnes ou augmenter le prélèvement par éclaircie. Ces indicateurs nous donnent une bonne vision d'ensemble de l'état des trouées au cours du temps mais on a besoin d'informations plus précises pour savoir quels paramètres il est le plus pertinent de choisir.

On remarque que même si le pourcentage total de sol visible est en moyenne équivalent la répartition des tailles de trouées n'est pas semblable. Par exemple il y a moins de trouées intermédiaires (20-60 m²) et les effectif de très petites trouées sont souvent différents de ce qui est visible sur les placettes Lidar (à 30 et 55 ans).

Le graphique ci-dessous montre la comparaison entre la surface projetée de couronne des pins maritimes en peuplements simulés et de terrain.

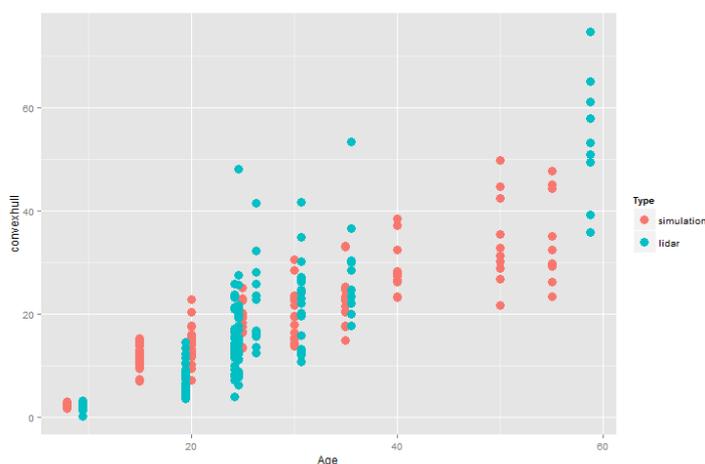


Figure 31- Projection de couronne (en m²) en fonction de l'âge : pour les individus de chaque placette (LiDAR-T, en bleu) et pour chaque individu simulé en peuplement (en rouge).

La variabilité est plus grande que pour les projections de couronnes individuelles. La forme globale de la courbe n'est pas la même dans nos deux cas de figures. La mise en peuplement n'a pas modifié l'évolution de la dimension de couronne de manière aussi significative qu'on l'avait supposé ci-dessus.

2. Modifications apportées au modèle d'AmapSim

On modifie les dimensions de la couronne pour obtenir une bonne répartition des trouées selon les classes de taille. Ci-dessous le tableau des paramètres modifiés dans le modèle.

	AgePhy 215		AgePhy 256	
	préformé	néoformé	préformé	néoformé
Avant modification	7	30	2	8
Après modification	5	22	2	12

Tableau 11- Comparaison des paramètres (ancien/nouveau) pour les longueurs de pousse des premières ramifications.

3. Comparaison des valeurs simulées aux données de terrain après modifications

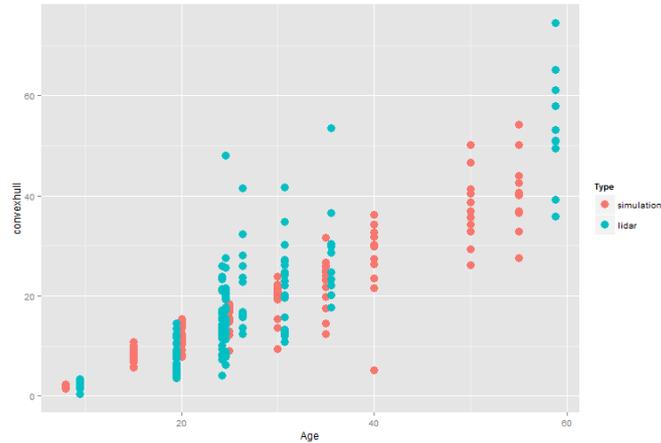


Figure 32- Projection de couronne (en m²) en fonction de l'âge : pour les individus de chaque placette (LiDAR-T, en bleu) et pour chaque individus simulés en peuplement après modification (en rouge).

La courbe d'évolution de la taille de la couronne simulée semble être la même que celle de terrain. De plus la variabilité est du même ordre de grandeur.

Si on s'intéresse maintenant aux grandeurs choisies pour contrôler le paramétrage, on remarque qu'il y a une nette amélioration de la tendance d'évolution de l'effectif unitaire de trouées, mais aussi de l'évolution du pourcentage de sol visible. Les courbes se superposent mieux. Pour ce qui est du pourcentage de sol visible la variabilité semble en plus identique.

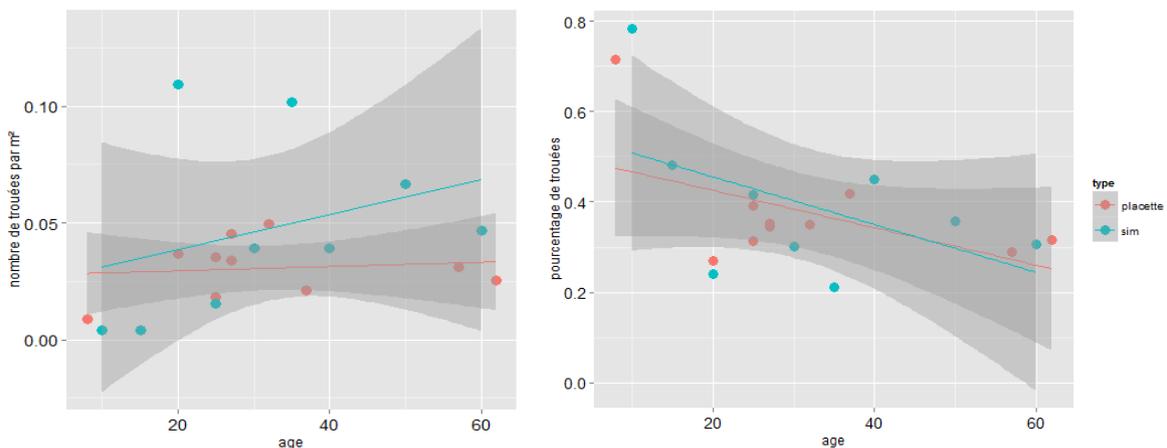


Figure 33- Nombre de trouées (gauche) et pourcentage de sol visible (droite) en fonction de l'âge, pour les placettes terrain (rouge) et les placettes simulées (bleu) après modification du modèle.

D'après Nilson (1999), le pourcentage de trouée mesuré dans des peuplements de résineux, de même densité et de même ordre de grandeur en hauteur, est compris entre 30 et 60 %. Ce qui correspond à ce que l'on obtient avec nos mesures de terrain et nos simulations après modifications.

Discussion

I. Le détail de la démarche et son originalité

A. Présupposés liés à la démarche adoptée

Pour cette étude une démarche s'inspirant de l'analyse de sensibilité a été privilégié. On détermine les grandeurs cibles pour le paramétrage et on les réévalue les unes après les autres, en partant de la grandeur la plus globale et en allant à la plus précise.

Cette structuration du travail permet d'avoir une validation progressive et robuste de la valeur finale des paramètres clefs. En ne travaillant que sur une seule grandeur à la fois et en ne modifiant qu'un paramètre à la fois on connaît au mieux l'effet de tous les paramètres modifiés sur notre modèle. Cela en fait une démarche transparente et reproductible sur des modèles d'autres espèces, comme cela sera le cas du hêtre très prochainement.

Par contre cela nécessite de ne pas être bloqué par un souci technique à un moment dans la chaîne de traitement. Dans ce cas il est difficile de passer à l'étape suivante.

La démarche de travail choisie est énormément basée sur le développement de nouvelles fonctionnalités dans les logiciels utilisés. Ce qui implique une forte dépendance aux développeurs, puisque je ne possède pas moi-même les compétences pour programmer sur les différents langages (C++ pour AmapSim et Computree, java pour Amapstudio et Xplo).

Logiciel	Fonctionnalité développée	Temps de création
Computree	<ul style="list-style-type: none"> Extraction des surfaces de couronnes Extraction du diamètre à 1m30 Extraction de la hauteur de la première branche vivante et du diamètre du tronc à cet endroit 	2 semaines
	<ul style="list-style-type: none"> Extraction des surfaces de trouées 	1 semaine
Simeo	<ul style="list-style-type: none"> Export de point 	
Xplo	<ul style="list-style-type: none"> Script d'extraction pour simulation 	1 journée
	<ul style="list-style-type: none"> Script de simplification 	1 journée
AmapSim	<ul style="list-style-type: none"> Nouveau modèle d'accroissement radial 	2 mois
	<ul style="list-style-type: none"> Modification du modèle de gêne stérique 	2 mois
	<ul style="list-style-type: none"> Module d'éclaircies 	1 semaine
	<ul style="list-style-type: none"> Module d'élagage 	1 semaine

Tableau 12- Développement effectué lors de ce stage

A posteriori travailler à partir d'une hypothèse individu-centré semble donner un résultat satisfaisant au vu des grandeurs de contrôles choisies. Pourtant elle est assez longue à mettre en place et nécessite beaucoup de données ou de relations allométriques. Ici il a fallu :

- Un modèle initial déjà implémenté avec le jeu de données précis (le modèle est également très long à créer si on compte la prise de données et l'implémentation)
- Un jeu de données LiDAR (il faut compter que les données disponibles étaient déjà collectées et pré-traitées)
- Le développement de nombreuses fonctionnalités sur 4 logiciels différents
- Plusieurs relations allométriques (surface foliaire-diamètre et pourcentage bois de cœur-age)

Il serait intéressant de pouvoir appliquer une méthode centré sur le peuplement sur le même cas d'étude. Une fois qu'on aurait comparé les deux méthodes, on pourrait choisir la plus adéquate pour le prochain cas d'étude (le hêtre). De plus de nombreux aspects de ma démarche ne sont pas transposables à des peuplements plus étagés (comme le module de sylviculture tel quel ou la non prise en compte de la lumière comme facteur extérieur central).

B. L'originalité de la démarche

Il faut rappeler le caractère original de cette étude, qui le rend à la fois intéressant et ambitieux.

Tout d'abord on a supposé que l'on pouvait représenter de manière simple et précise un peuplement en trois dimensions en le considérant comme un ensemble d'individus en croissance parallèle. Ce présupposé a de nombreuses implications, comme par exemple simuler les contraintes que représentent les autres arbres dans le développement d'un individu. La mise en place de cette partie a été centrée sur la gêne stérique au lieu de la lumière, car cela a semblé plus facile à mettre en œuvre et tout aussi informatif pour une plantation équienne. C'est un choix original, qui n'avait pas encore été mis en œuvre.

L'autre particularité de cette démarche c'est de travailler sur un modèle architecturale de plante. Cela complique énormément les simulations, car ce type de modèle possède beaucoup de paramètres à ajuster. Cela peut s'avérer délicat de les manipuler tout en gardant une cohérence botanique, mais c'est ce qui rend l'étude unique.

Pour finir dans le cadre de ce travail a été mis en place un modèle de simulation de la sylviculture s'inspirant des conseils donnés par les différents acteurs de la gestion du massif des Landes. Ce module permet de reproduire le plus fidèlement dans sa logique la sylviculture. Pour ce faire on a mis en place un modèle de croissance radiale à partir de principes physique et physiologique prouvés par Schinozaki. Cette démarche n'avait pas encore été concrétisée et développée au niveau du laboratoire pour être réutilisé dans d'autres cas que le pin maritime.

Le modèle a la particularité de permettre avec ces deux modules une retroaction entre la sylviculture et le développement de chaque arbre, ce qui permet de coller le plus possible aux dynamiques naturelles.

C'est ces quatre aspects qui rendent ce travail intéressant et original au vu de ce qui se fait à AMAP.

C. D'autres manière de travailler

Pour critiquer notre démarche on a mis en place d'autres types de démarches, cette partie de la discussion va permettre d'avoir un autre point de vue sur le travail exposé dans ce rapport.

1. Peuplement-collage

Dans la partie méthodologie, il a été présenté un travail parallèle à notre simulation de croissance en peuplement : la «maquette-collage».

Dans ce cas de figure, le travail nécessite moins de conception. En effet il n'y a pas besoin de penser et de tester un modèle de gêne stérique, de sylviculture ou d'accroissement du diamètre.

Mais on a également pu mettre en évidence des points négatifs à cette démarche. Les couronnes sont de dimensions moyennes quel que soit l'environnement des arbres. Cela signifie que la variabilité que l'on retrouve dans la nature n'est pas du tout correctement représentée. De plus dans les zones de peuplement plus denses que la moyenne il y a une très forte interpénétration des houppiers. Cela nécessiterait donc un post-traitement assez important, pour tenir compte de l'effet de gêne stérique que l'on observe sur le terrain.

En plus de l'aspect technique assez insatisfaisant, il n'est pas dans la philosophie d'AmapSim (le logiciel utilisé pour la simulation) de ne servir qu'à obtenir des travaux de visualisation finale sans dynamique.

Cette méthode n'est donc pas spécialement pertinente du point de vue de la réalisation et de la philosophie. Elle est détaillée en *Annexe 11*.

2. Diamètre à 1m30 forcé

Pour obtenir avec certitude un ensemble de diamètre réaliste au cours du temps, on a décidé de calibrer un modèle d'accroissement par défaut. Pour ce faire on a utilisé les diamètres du jeu de données vertex.

Ce modèle de diamètre a l'avantage de ne pas être dépendant du développement d'un nouveau modèle, mais il a de nombreux aspects négatifs. Dans ce calcul du diamètre, on se rend compte que l'on perd l'effet de rétroaction entre le développement de l'arbre et son environnement. Dans la version principale, lorsqu'un arbre est entouré d'autres arbres, le modèle de timidité limite sa croissance. Des branches sont élaguées, donc l'arbre possède moins d'aiguilles. La croissance radiale est moins rapide et ce sont donc les arbres les plus serrés qui sont éclaircies en premier. Sans cela les éclaircies dépendraient que de la part d'aléatoire initiale de la graine et donc pourraient être très hétérogènes (zone très dense à côté de zone très ouverte). La sylviculture appliquée ne reproduirait pas la réalité.

II. Travail préliminaire : la classe de fertilité

On a considéré que nos placettes pouvaient être assimilées à un ensemble de stades d'un même peuplement, en se basant sur une fertilité commune (cf. Résultats. II. A). Or on

peut observer une variabilité importante : on pourrait former plusieurs ensembles de placettes au lieu d'un. Cette variabilité pourrait être expliquée de différentes manières.

D'après les données environnementales étudiées (annexe 3) on peut considérer que les conditions environnementales sont similaires pour toutes les placettes. Pourtant il peut y avoir des hétérogénéités locales (seulement visibles au niveau de la centaine de mètres) qui vont améliorer ou détériorer la fertilité moyenne de la zone. Ce qui peut expliquer la variabilité visible.

Les placettes que l'on considère se situent dans des peuplements avec des propriétaires différents. La variabilité peut donc également s'expliquer par un traitement différent des parcelles (provenance différente, fertilisation possible, différence au moment de la plantation,...).

Il faudrait donc pousser ce travail plus avant. On se contentera de la première approximation qui est de considérer l'ensemble des placettes comme un ensemble homogène.

III. Travail sur l'individu

A. Comparaison de la variabilité des grandeurs considérées

On peut observer une grande variabilité au sein d'un même âge (pour la hauteur, le diamètre, la profondeur de couronne et la surface foliaire : cf Partie Résultat I.). Cela s'explique très simplement par l'effet dominant-dominé. Les dominés vont avoir un accès limité aux ressources (lumineuses et nutritives), ils vont donc moins pousser en hauteur, leur couronnes vont être plus étroites et plus clairsemées et la croissance du diamètre va être plus lente. De plus même en plantation un effet de microenvironnement peut avoir une forte influence sur la croissance.

On a pu observer qu'il y avait très peu de variabilité en ce qui concerne nos grandeurs simulées. Cela signifie que la variabilité « naturelle » n'est pas correctement restituée. Dans notre modèle on a paramétré très peu d'effet aléatoire. On a voulu mettre la priorité sur l'ajustement correct de la moyenne, avant de s'intéresser à la variance. De plus on espère que la croissance en peuplement augmentera la variabilité de nos grandeurs.

Dans un deuxième temps on pourra s'intéresser à simuler la variabilité de nos grandeurs. L'intérêt initial des maquettes c'est qu'elles représentent un peuplement moyen, représentatif de la majorité des cas de notre zone d'étude.

B. La hauteur totale et l'épaisseur de houppier

1. La hauteur totale

La hauteur totale n'est pas correcte. Une explication possible serait que le modèle initiale sous-estime déjà la hauteur totale. Après une comparaison rapide des hauteurs des deux jeux de données avec la hauteur de la simulation initiale, on se rend compte que le biais existait dans le modèle initial.

Age disponible (ans)	Hauteur moyenne de Berganton (m)	Hauteur moyenne de St-Symphorien (m)	Hauteur de simulation (m)
8	4.8	5.1	3.7
22	16	17	13.4
32	21.7	19.1	16.8
47	26.2	23.6	19.7

Tableau 13- Comparaison des différentes hauteurs des données de terrain et de la simulation initiale

2. La hauteur de première branche

On a remarqué que la hauteur de première branche morte était très élevée dans nos simulations. Cela peut être dû à l'élagage systématique qui se produit lors de la mort du bourgeon apical de la branche. Dans la réalité la branche morte reste en place un certain temps avant de s'élaguer en partie, puis totalement. Ce phénomène est observable de manière qualitative sur notre jeu de données LiDAR et quantitative sur notre jeu de données Vertex. On trouve en moyenne 5m80 de branches mortes avant de tomber sur la première branche vivante, composé en grande partie de chicos, que l'on ne cherchera pas à modéliser. C'est pour cela qu'un temps de latence a été ajouté au modèle.

Il est assez difficile de manipuler le modèle initial de manière radicale sans modifier la cohérence initiale voulu par les créateurs. Il est donc difficile d'avoir prise sur tous ses aspects. Comme les profondeurs de houppier semblent bien plus proches de la réalité depuis que les paramètres d'élagage ont été changés, on choisira de garder le deuxième paramétrage.

D'après le SRGS d'aquitaine (Schéma Régional de Gestion Sylvicole) de 2005, l'élagage serait à favoriser sur des bonnes stations afin de faire du bois d'œuvre. Cela explique peut-être la différence entre la réalité et le modèle, quand on considère la hauteur de première branche des jeunes âges.

Le manque de données en dessous de 15 ans ne nous permet pas de conclure pour ce qui est du très jeune âge. Cela peut être dû à un non élagage artificiel ou naturel des parcelles concernées. Cette situation rendrait difficile la prise de données et donc pourrait expliquer l'état des données.

C. La projection de couronne

La tendance de la taille de la couronne en fonction du temps étant due à l'environnement de l'arbre on décide de ne pas essayer de le modifier à l'échelle individuelle, mais plus à l'échelle du peuplement. Une surface de couronne trop élevée peut être réduite par une augmentation de la densité du peuplement. Par contre une surface trop faible doit être corrigée à l'échelle individuelle, c'est le cas des simulations de plus de 50 ans.

La fourchette de surface projetée de couronne augmente avec l'âge pour nos placettes terrain. Cela peut être dû à la sylviculture. En effet dans les jeunes âges la densité étant très forte et homogène, la variabilité des couronnes est faible. Après plusieurs éclaircies la densité est localement moins homogène et plus faible, cela augmente l'hétérogénéité des couronnes,

accentuée par la capacité individuelle à réagir à la modification de son environnement. La même variabilité ne se retrouve pas dans nos arbres simulés à l'état individuel. Cela peut s'expliquer par le fait que seulement peu de variabilité est permise entre les différents individus de notre modèle. Pour simplifier le travail et la prise en main du modèle la grande majorité des événements paramétrés ont une probabilité 100% de se réaliser. On peut espérer que cet aspect s'améliore avec la croissance en peuplement.

A l'échelle du peuplement on n'a pas toutes les évolutions que l'on espérait : la variabilité s'est bien accrue, mais la tendance de la projection de couronne au cours du temps n'est toujours pas correcte. Cela signifie qu'un facteur important n'est pas pris en compte dans notre modèle. Par exemple le manque de lumière peut limiter le développement latéral du houppier avant les frottements dû à l'interpénétration des houppiers.

D. La surface foliaire

Cette grandeur de l'arbre est la plus difficile à appréhender sur le terrain. Les relations allométriques qui permettent l'estimation de la surface foliaire à partir du diamètre et de l'âge d'un arbre sont imprécises, on peut avoir 100 m² de surface de différence pour le même âge. De plus on ne considère dans notre calcul que les valeurs moyennes. On ne cherchera donc pas à tout prix à faire coïncider nos surfaces foliaires simulées avec les prédictions, mais plutôt à obtenir une tendance réaliste.

Le paramétrage de la surface foliaire totale est un aspect du modèle très difficile à maîtriser. En effet elle dépend de trois facteurs : le nombre d'aiguilles par manchon, la surface foliaire d'une aiguille et le nombre de manchon portant des feuilles. Par contre pour le nombre de manchons feuillés on n'a pas accès à une référence. Ce nombre peut varier entre autre à cause de la probabilité de ramification, du nombre moyen de branches sur une pousse ramifiée et aussi de la durée de vie des pousses. Le jeu de données du paramétrage initial donne accès aux deux premiers aspects, mais de manières partielles. Il n'a pas été possible de quantifier le biais que représente la méthode d'échantillonnage.

Ces deux aspects relativisent la précision que l'on peut obtenir de cette grandeur et donc sa robustesse.

E. Modèle de croissance radiale

1. Le choix du modèle et contraintes extérieures

L'objectif des modèles de cette partie de l'étude est de prévoir le diamètre le long du tronc et des branches à l'aide d'informations sur la structure proche. Moins le modèle comporte de paramètres plus il est clair. C'est pour cette raison que l'on n'a pas retenu le modèle B₃ qui est plus complexe, puisqu'il tient compte de l'ordre de ramification, même s'il est plus précis (Partie Résultat II. E. 2.)

On décide donc de choisir le modèle B₂. On a été obligé d'approximer ce modèle pour que le modèle implémenté final soit une régression linéaire sans constante (cf *Annexe 6*). En effet pour des soucis de généralisation et de simplification le développeur qui a permis

d'implémenter le modèle de croissance radiale ne voulait pas d'autres types de modèles. Cette démarche est discutable. N'ayant pas d'autres possibilités d'implémenter le modèle, il a fallu privilégier le généralisable au précis.

2. La complexité du jeu de données

Le travail avec un jeu de données non adapté pour un travail peut s'avérer très compliqué. Dans cette étude il a fallu rapprocher deux jeux de données pour obtenir la relation cherchée. D'un côté la longueur feuillée est liée à la section pour chaque pousse échantillonnée, de l'autre le nombre d'aiguilles est lié à la longueur feuillée. Les relevés ont été faits sur les mêmes individus, mais avec un protocole d'échantillonnage différent, à une date différente. Cela nous a obligé à réduire le jeu de données à un âge. On peut donc se poser la question de la pertinence de cette démarche : Est-il pertinent de déterminer une relation valable pour la vie de l'arbre à partir d'un âge ? ou bien de rapprocher deux jeux de données qui n'ont pas le même protocole d'échantillonnage pour déterminer une unique relation ?

On a voulu étudier si l'âge de l'arbre avait une influence sur le diamètre de la pousse feuillée. Le jeu de données étudié est maintenant composé des 3 âges (8, 22 et 47 ans). Graphiquement on peut constater que l'âge pourrait avoir une réelle influence : il ne change pas la tendance de l'évolution de la section en fonction de la longueur feuillée (cf *Annexe 6*). Le diamètre des pousses terminales semble être significativement relié à l'âge de l'arbre considéré. Or la part expliquée supplémentaire du modèle est assez faible : le R^2 du modèle avec l'âge est de 0.77 au lieu de 0.72 pour le modèle sans l'âge. Considérer l'âge dans le modèle n'est pas indispensable puisque sa prise en compte n'explique pas énormément plus. La première approximation était justifiable.

3. Amélioration possible

Dans une étude ultérieure il sera sûrement possible d'affiner ce modèle et de le complexifier. Dans le cadre de cette étude l'approximation faite n'est pas très importante. En effet les grandeurs importantes à bien paramétrer sont la hauteur et l'importance de l'interception foliaire. Un ordre de grandeur du diamètre est suffisant.

IV. Travail en peuplement

A. Modules utilisés

Avant de discuter de manière plus précise les résultats au niveau peuplement il est bien de faire un point sur les biais apportés par la conception même des modules utilisés.

On a voulu reproduire l'intervention humaine sur le peuplement. Pour ce faire il a fallu mettre en place un modèle de sylviculture moyenne. On a fait l'approximation que toutes les parcelles suivaient le même calendrier de coupe. Cette approximation est justifiable et coïncide avec l'hypothèse initiale d'avoir à faire à un seul et unique peuplement à différents âges. Mais l'éclaircie peut avoir eu lieu dans la simulation et pas dans le peuplement de terrain auquel on la compare ou inversement. Dans ce cas on risque de noter une importante différence qui ne remet pas forcément en compte le réalisme du modèle.

Le modèle de timidité pourrait également être amélioré dans sa conception. En effet avec le modèle actuel il peut y avoir croisement de deux branches d'individus distincts dans un voxel sans élagage. Si les pousses sont plus longues que les dimensions du voxel alors les houppiers se croisent sur au moins la dimension du voxel. Ce qui peut expliquer un chevauchement que l'on a essayé de limiter au maximum lors de nos modifications de dimensions de houppier.

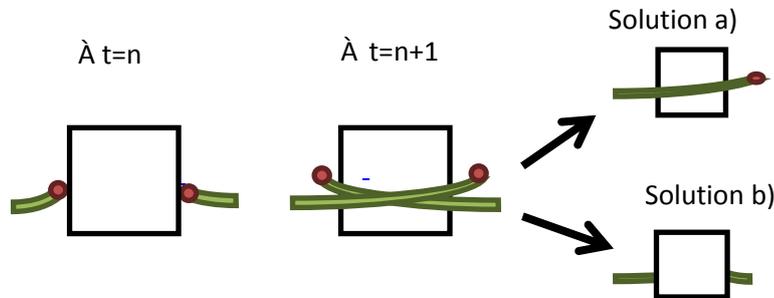


Figure 34-Schéma d'entrecroisement de houppier.

Pour remédier au problème on pourrait envisager de supprimer immédiatement les deux branches sur la dimension du voxel (solution b) de *Figure 34*). Pour avoir une coupe moins franche on couperait seulement l'une des pousses qui a traversé le voxel, mais cette fois sur toute son unité de croissance (solution a) de la *Figure 34*).

On a également rajouté la possibilité de mettre en dormance les bourgeons au lieu de les faire mourir. Mais par manque de temps (création de l'option début Aout) on n'a pas eu la possibilité de tester la nouvelle fonctionnalité, autrement que qualitativement. Dans ce cas des branches basses restent en place, ce qui n'a pas de justification quand on regarde les nuages de points LiDAR ou les photos des placettes terrain (*Annexe 13*)

B. Profondeurs de houppiers

Dans la partie individuelle du travail on utilise majoritairement les données de terrain, alors que dans la deuxième partie du travail on utilise dès que possible le jeu de données LiDAR. Donc on peut expliquer la différence de profondeur de houppier par un changement de manière de mesurer les mêmes grandeurs (hauteur totale et hauteur de première branche vivante). Deux hypothèses sont possibles :

- Cela peut être dû à une mauvaise estimation de la hauteur de la première branche vivante lors de l'extraction des données Lidar. En effet les nuages à traiter peuvent parfois être très denses, il est donc difficile de voir quelles branches sont mortes ou vivantes.
- On peut aussi supposer que cela pourrait être dû à une mauvaise mesure de la hauteur totale des arbres lors de la prise de données au vertex.

On observe bien qu'il y a une sous-estimation de la hauteur vertex par rapport à la hauteur lidar (cf *Annexe 4*).

C. Espace inter-couronne

L'espace inter-couronne est faussé par deux aspects de la forme de la couronne : le fait que la variabilité naturelle n'est pas reproduite dans notre modèle, mais également que les arbres simulés par notre modèle ont des formes de « paquerette ». On ne sait pas expliquer cette forme qui n'est pas aussi marquée dans la réalité (*Annexe 14*).

On peut également travailler à une compréhension plus précise des trouées en raisonnant par classe. Dans ce cas notre estimation de l'âge est rapidement limitante (*Annexe 9*).

D. Pour aller plus loin

Par manque de temps, il n'a pas été possible de faire tous les traitements envisagés. Ce paragraphe me permet de présenter des développements futurs.

1. D'autres traitements possibles pour les trouées

Les analyses qui ont été faites sur les trouées en peuplement restent très globales et ne renseignent pas sur la répartition spatiale de ces trouées.

Des analyses spatiales, comme les analyses du type de Ripley, permettrait de tester l'existence d'une structure spatiale des centres de trouées les uns par rapport aux autres. Une analyse de Ripley adaptée à notre cas d'étude pourrait donc être un moyen de caractériser le type de répartition des trouées. Il risque, avec cette méthode, d'y avoir des problèmes dans le cas des grandes trouées, car leur forme est très étendue et non circulaire. Le centroïde de ces trouées, même associé à une surface, n'aura que très peu de signification.

2. Intérieur de la couronne

On s'intéresse à l'espace qui se trouve entre les couronnes pour connaître la proportion de sol visible, car cela modifie le signal reçu par le LiDAR. Mais ce n'est pas le seul élément qui peut avoir une influence sur le signal. En effet la densité de branches et de feuilles peuvent avoir un très fort impact sur le signal LiDAR. On n'a fait aucune validation préliminaire sur la densité d'élément dans la couronne. Il risque dans ce cas-là d'y avoir une difficulté. En effet il n'existe à ce jour aucun simulateur de LiDAR-T complètement opérationnel (temps de calcul de plusieurs jours pour moins de 5 individus) pour un test sur des peuplements de plusieurs dizaines d'individus. Pour comparer nos simulations aux données de terrain on est obligé de comparer deux modes de répartition des points :

- La répartition systématique de simeo pour les simulations
- La répartition due à la recombinaison des 6 scans de terrain

Dans le cas de la recombinaison de scan des phénomènes d'occultation existent alors que ce n'est pas le cas sous Simeo, donc les deux répartitions ne sont pas comparables. Une méthode de comparaison envisageable est développée en *Annexe 10*.

3. D'autres facteurs environnementaux possibles

On a par manque de temps pu seulement considérer la gêne stérique et l'intervention humaine comme seules contraintes s'appliquant sur le peuplement. Pourtant on pourrait s'intéresser à deux autres facteurs environnementaux : la lumière et la fertilité du sol.

Par exemple pour la fertilité du sol on pourrait mettre en place un plugin qui permettrait de stimuler ou d'inhiber la croissance des arbres d'un peuplement. Cela nécessiterait la création d'un module supplémentaire.

4. Simplification des maquettes

On va fournir des maquettes déjà simplifiées à Eloi Grau de TETIS (aiguilles non exactement représentatives de la réalité). La question est de savoir si on n'introduit pas là une erreur initiale significative en ne prenant pas le modèle le plus précis. Pour répondre à cette interrogation on peut effectuer un travail préliminaire sur nos maquettes. On compare le signal LiDAR aérien reçu après émission sur des maquettes plus ou moins détériorées (suppression de branche de diamètre inférieur à 5cm par exemple). Si le signal ne se modifie pas avec la détérioration de la maquette cela signifie que le niveau de précision fixé initialement est plus important que nécessaire. Dans le cas contraire on devrait faire des maquettes encore plus précises, qui pourraient être limitées par la capacité de calcul des ordinateurs. Une réflexion a été lancée à la fin du stage avec Eloi Grau (UMR Tetis).

V. La commande et les matériels utilisés

A. Limite de la commande et intérêt pour AMAP

Ce stage a plusieurs objectifs que l'on peut regrouper en deux catégories : répondre au besoin spécifique de l'UMR Tetis pour le projet StemLeaf et mettre en place une méthodologie de simulation de plantes en interaction dans un peuplement.

Il a été demandé de fournir une maquette « réaliste », surtout en ce qui concerne la surface foliaire et la hauteur totale et la fraction de sol visible. La surface foliaire étant très difficile à mesurer de manière exhaustive il est donc quasiment impossible de mettre en place un modèle totalement représentatif de la réalité. A partir de quand admet-on que le modèle est assez « réaliste », lorsqu'on a très peu de prise sur la grandeur ?

Est-il raisonnable de chercher une aussi grande précision avec les modèles architecturaux, si on n'est pas sûr qu'ils soient représentatifs de la réalité ?

Il me semble a posteriori qu'une solution aurait été de connaître l'influence de la détérioration des maquettes sur le signal reçu avant de commencer tout travail. Cela aurait permis de comprendre quelle grandeur avait intérêt à être mise en valeur. On aurait sûrement pu alléger la démarche en proposant un parallèle avec le travail qui va être effectué après ce stage. Les maquettes proposées auraient donc été allégées et spécifiquement opérationnelles pour la maison de la télédétection.

De plus pour répondre à la commande sensu-stricto une démarche de peuplement collage (détaillée au B.2.a.) n'aurait-elle pas suffi ?

La discussion sur la pertinence de la démarche au vue de la commande doit être éclairée par la politique d'AMAP. On peut décliner en trois grands axes les intérêts du laboratoire dans le cadre de ce stage: connaître les possibilités d'AmapSim en peuplement, revaloriser le modèle de pin maritime créé lors du projet CARBOFOR pour le rendre généralisable à d'autres problématiques que celles de sa création et justifier l'intérêt des modèles de type architecturaux précis. Dans la deuxième solution proposée les attentes de l'unité de recherche sont moins respectées : pas de test de croissance en peuplement et re paramétrage au cas par cas d'un modèle peu polyvalent.

B. Points positifs et négatifs du matériel utilisé pour ce travail

1. Limite/intérêt d'AmapSim dans la croissance en peuplement

Le paramétrage d'AmapSim nécessite un grand nombre de mesures sur un échantillonnage assez large d'individus. Les arbres sélectionnés pour constituer ce jeu de données sont des individus de peuplement, même si on paramètre un individu isolé. Cela implique que les modèles individuels incluent les effets de la compétition dans leur ajustement de paramètres (par exemple la hauteur de première branche ou la surface projetée de couronne). En peuplement la croissance latérale du houppier est contrainte par le voisinage et l'élagage des branches basses est plus fort par manque de lumière.

Dans le travail présenté ici on utilise un seul logiciel de simulation, à l'étape individuelle comme pour la croissance en peuplement. AmapSim a été initialement créé pour simuler l'architecture des plantes de manière dynamique au cours du temps. Cela en fait un modèle extrêmement précis. Faire croître un si grand nombre d'arbres en peuplement (77 individus jusqu'à 60 ans) est une nouveauté dans le développement de ce logiciel. D'autres essais de croissance en peuplement ont été faits avec InsilEco pour connaître l'influence de la lumière sur le développement des plantes et la répercussion sur le bilan radiatif. Ce modèle fait intervenir ARCHIMED (un autre logiciel développé par AMAP par J. Dauzat) pour connaître la quantité de lumière réceptionnée par chaque feuille et une boucle de rétroaction qui fait pousser plus vite en hauteur les plantes qui reçoivent plus de lumière. L'avantage de la démarche de simulation employée pour ce stage est de ne faire intervenir qu'un seul logiciel et qu'un seul développeur. Cela facilite les discussions lors de la création des modules, de l'identification et la correction des problèmes survenant dans les phases de test. La résolution des problèmes rencontrés lors des phases-test est peut être légèrement plus lente puisqu'il n'y a pas de plateforme collaborative entre différents développeurs.

Utiliser un ensemble d'individus avec une architecture précise permet d'avoir la possibilité d'une approche plus fine de la réalité : meilleure estimation de la biomasse fine (pour les problématique d'incendie ou de récolte des rémanents pour la papeterie ou le bois de chauffage) ou meilleure estimation de la surface de sol visible au LiDAR aérien ou satellital (caractérisation des trouées). Pourtant si on a besoin d'effectuer un grand nombre de simulations en peu de temps ce logiciel peut s'avérer peu pratique. Il faut en effet une nuit entière de calcul pour simuler 77 individus jusqu'à 60 ans sur un ordinateur de 60 Go de mémoire vive. Cela pourrait être en partie dû au fait que les calculs faits lors des simulations d'AmapSim ne sont pas parallélisés. Cela limite la capacité de calcul à un seul cœur. C'est la

très grande précision des modèles individuels qui rend les calculs si longs et les fichiers de sortie si lourds. Si la précision fournie est trop importante alors cela signifie que la simulation sous AmapSim n'est pas la démarche la plus pertinente.

Pour conclure la croissance en peuplement sous AmapSim est opérationnelle, mais elle n'est pas pour l'instant prévue pour un très grand nombre de simulations en un court laps de temps.

2. Capacité de calcul limitante

L'aspect le plus limitant dans ce travail est la capacité de calcul et la mémoire nécessaire pour effectuer les simulations, mais aussi les traitements de ces-dernières. Ici seulement quelques limites techniques seront abordées.

Il est impossible par exemple de traiter dans simeo ou xplo en une fois tous les peuplements que l'on simule. Les fichiers sont chargés l'un après l'autre dans le logiciel, le deuxième s'ajoute au premier et ainsi de suite ce qui monopolise toute la mémoire vive au bout d'un certain temps.

Si on ne considère pas le temps de calcul (qui peut durer jusqu'à 19 heures pour des peuplements de 77 individus à 60 ans) le traitement des simulations dure au moins 4 heures : 1 heure pour la transformation des maquettes en nuage de points (que l'on doit faire manuellement), 2 heures pour le traitement des nuages de points sur COMPUTREE et 1 heure de mise en forme des données sous excel avant d'effectuer le traitement final sous R (un peu plus si la routine des script n'est pas encore faite).

Enfin dernier exemple, il a été impossible de traiter certains nuages de points LiDAR à cause de leur volume. Certains traitements, pour l'obtention de la surface projetée de la couronne et les diamètres de tronc à 1m30 et au niveau de la première branche vivante, peuvent prendre 3 heures à cause du volume des fichiers chargés.

Bibliographie

J-F Barczi, H. Rey, Y Caraglio, P De Reffye,... (2008). "AmapSim : A structural Whole-plant Simulator Based on Botanical Knowledge and Designed to Host External Functional Models." Annals of Botany **101**: 1125-1138.

A Bosc (1999). " Etude expérimentale du fonctionnement hydrique et carboné des organes aériens du Pin maritime (*Pinus pinaster*) : intégration dans un modèle structure-fonction appliqué à l'analyse de l'autonomie carbonée des branches de la couronne d'un arbre adulte." Thèse Univ. Bordeaux 2, 225p.

Centre Régional de la Propriété Forestière d'Aquitaine (2008). "Le pin maritime, pilier de l'économie forestière d'Aquitaine"

T Coudurier, D Barthélémy, B Chanson, F Courdier, C Loup (1993). "Modélisation de l'architecture de Pin maritime *Pinus pinaster* Ait (Pinaceae) : Premiers résultats." Architecture des arbres fruitiers et forestiers (Les Colloques **74**) : 305-321.

P Heuret, C. Meredieu, T Coudurier, ... (2006). "Ontogenetic Trends in the morphological features of main stem annual shoots of *Pinus pinaster* (Pinaceae)." American Journal of Botany **93(11)**: 1577-1587.

M Idrissi-Hassani et P Lebreton (1992). "Les flavonoïdes du Pin maritime : une approche chimiotaxinomique." Forêt méditerranéenne **1** : 3-8

S Knapic, H Pereira (2005). "Within-tree variation of heartwood and ring width in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait)." Forest Ecology and Management **210** : 81-89.

B Lemoine, N Decourt (1969). "Tables de production pour le pin maritime dans le sud-ouest de la France." Revue Forestière Française **1** : 5-16.

C Meredieu, Y. Caraglio, L Saint-André,... (2004). "The advantages of coupling stand description from growth models to tree description from architectural models". 4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models. C Godin and al. Montpellier, France: 243-247.

T Nilson (1999). "Inversion of gap frequency data in forest stands." Agricultural and forest meteorology **98-99** : 437-448

I Pinto, H Pereira, A Usenius (2003). "Heartwood and sapwood development within maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stems." Trees **18** : 284-294

A Porte, A. Bosc., I Champion and D Loustau (2000). "Estimating the foliage area of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) branches and crowns with application to modelling the foliage area distribution in the crown." Annals of Forest Science **57**: 73-86.

A Porte, P Trichet, D Bert and D Loustau (2002). "Allometric relationships for franch and tree woody biomass of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.)." Forest Ecology and Management **158**: 71-83.

O Shaiek, D. Loustau, P Trichet, C Meredieu,... (2011). "Generalized biomass equations for the main aboveground biomass components of maritime pine across contrasting environments." Annals of Forest Science **68**: 443-452.

K Shinozaki, K Yoda, K Hozumi and T Kira (1964). "A quantitative analysis of plant form-the pipe model theory. I. Basic analyses." *Japanese Journal of Ecology* 14 : 97-105

Bibliographie

ANNEXE 1 : TABLE RECAPITULATIF DES RELEVES TERRAIN PAR PLACETTE

ANNEXE 2 : LOCALISATION DES RELEVES ARCHITECTURAUX PRECIS DU PROJET CARBOFOR.

ANNEXE 3 : DONNEES CLIMATIQUES

ANNEXE 4 : CALCUL DE L'AGE DE NOS PLACETTES LIDAR-T A PARTIR DE LA HAUTEUR.

ANNEXE 6 : LE MODELE D'ACCROISSEMENT RADIAL

ANNEXE 7 : PARAMETRES MODIFIES LORS DE L'AJUSTEMENT

ANNEXE 8 : COMPARAISON PROFONDEUR DE HOUPPIER DES PLACETTES RELEVES AU LIDAR ET VERTEX

ANNEXE 9 : COMPARAISON DES EFFECTIFS DE TROUEES PAR CLASSE AVANT ET APRES MODIFICATION DU MODELE

ANNEXE 10 : TRAVAIL SUR L'INTERIEURE DU HOUPPIER

ANNEXE 11 : TRAVAIL DE PEUPELEMENT SOUS FORME DE MAQUETTE-COLLAGE

ANNEXE 12 : FICHE TECHNIQUE DU TRAVAIL SOUS COMPUTREE.

ANNEXE 13 : PRESENTATION DU RESULTAT 3D DE L'OPTION DE REPRISE DE CROISSANCE

ANNEXE 14 : COMPARAISON DE LA FORME DU HOUPPIER ENTRE LE TERRAIN ET LES SIMULATIONS

ANNEXE 1 : TABLE RECAPITULATIF DES RELEVÉS TERRAIN PAR PLACETTE

Nom	Age (an)	Htot (m)	H1br (m)	Diam (cm)	Effectif	Rayon_placette (m)	Densité (ind/ha)
110411-1		21,2		34	18	15	239
120411-2	17	14,3		25	32	15	478
140611-1	40	22,0	14,0	38	15	15	221
140611-2	25	17,2	9,6	26	37	15	530
140611-3	30	18,2	12,8	24	41	15	580
150611-1	37	20,0	11,2	32	20	15	283
150611-2	45	23,1	14,4	39	16	15	226
150611-3	60	29,4	20,3	50	15	15	221
150611-4	35	20,1	12,7	32	19	15	276
160611-1	45	24,2	17,3	40	12	15	170
160611-2	47	24,0	16,0	43	13	15	184
160611-3	50	25,5	18,2	43	10	15	145
160611-4	55	29,1	19,5	45	13	15	184
160611-5	40	22,7	15,2	34	16	15	226
190411-1	38	17,9	12,5	27	18	15	245
190411-2	17	9,9		13	17	6	1603
190411-3	11	7,3		11	18	6	1592
190411-4	48	25,7	17,2	47	10	15	137
190411-5	23	13,3	6,7	19	24	15	349
190411-6	9	6,8		11	9	6	796
190411-7	28	17,4	10,2	27	23	15	342
190411-8	7	1,9			15	6	1372
200411-1	26	17,8	12,3	27	35	15	505
200411-2	13	9,8		14	15	6	1419
200411-3	40	25,0	18,8	37	19	15	280
200411-4	25	18,6	12,1	28	30	15	433
200411-5	7	5,1		8	15	6	1326
200411-6	5	1,3			44	6	3890
210411-2	7	6,1		10	14	6	1238
210411-3	10	7,0		11	14	6	1250
210411-4	29	19,5	12,3	26	33	15	482
210411-5	58	29,5	22,8	45	18	15	272
230511-1	62	29,1	21,5	42	26	20	207
240511-1	7	5,7		9	12	6	1027
240511-2	60	28,8	21,0	48	23	20	179
240511-3	16	14,1	7,4	18	78	15	1118
240511-4	22	18,2	11,2	22	34	15	481
240611-1	45	21,0	14,9	36	15	15	222
240611-2	40	25,9	17,9	38	14	15	198
240611-3	40	24,3	17,5	39	12	15	170
250511-3	19	16,9	9,6	25	38	15	538

ANNEXE 2 : LOCALISATION DES RELEVÉS ARCHITECTURAUX PRECIS DU PROJET CARBOFOR.

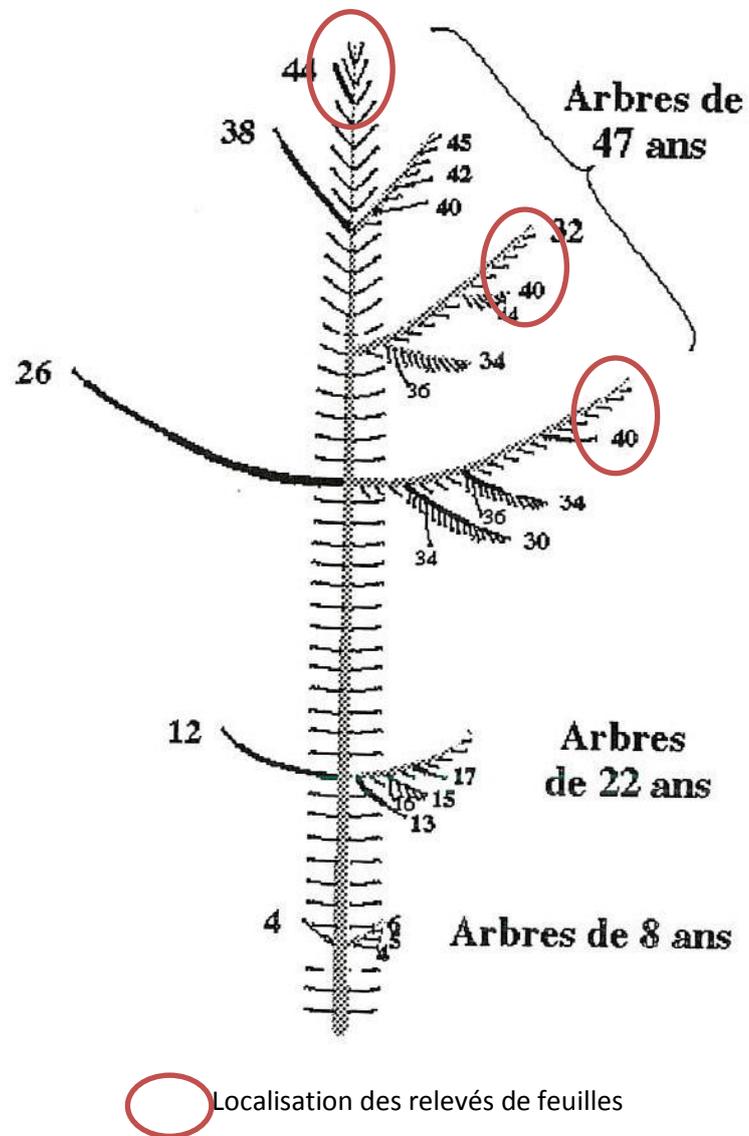


Figure 3- Structures architecturales des arbres relevés à Berganton

ANNEXE 3 : DONNEES CLIMATIQUES

Le tableau ci-dessous présente les variables climatiques sur la zone d'étude de notre jeu de données LiDAR-Relevés terrain.

Grandeurs	Minimum	Maximum
ETPan (été)	65.25 (122.5)	65.81 (123)
Radan (été)	378 (639)	381 (642)
RUan (été)	52 (14)	57 (22)
Tmoy (été-hivers)	11.8 (18.5-5.4)	12 (18.8-5.6)
Pan (été)	172 (171)	173 (172)

Tableau 14- Variables climatiques sur la zone de relevé LiDAR.

Le tableau ci-dessous présente les variables climatiques sur les deux zones où l'on a collecté les données de paramétrage du modèle : le jeu de données de paramétrage initial (Berganton) et le jeu de paramétrage actuel (St-Symphorien).

Grandeurs	Moyenne St-Symphorien	Moyenne Berganton	Différence
ETPan (été)	65 (123)	67 (123)	-2 (0)
Radan (été)	379 (640)	377 (638)	2 (-2)
RUan (été)	55 (18)	52 (13)	3 (5)
Tmoy (été-hivers)	12 (19-5.5)	12 (19-9)	0 (0-4.5)
Pan (été)	952 (171)	969 (163)	-17 (172)

Tableau 15- Comparaison des variables climatiques sur la zone de relevé de reparamétrage (Saint-Symphorien) et de paramétrage initial (Berganton).

ANNEXE 4 : CALCUL DE L'ÂGE DE NOS PLACETTES LiDAR-T A PARTIR DE LA HAUTEUR.

La question que l'on se pose est :

Peut-on prédire l'âge d'un pin maritime de notre zone d'étude connaissant ses caractéristiques individuelles et environnementales?

On émet donc l'hypothèse correspondante :

H_0 : L'âge d'un individu (pin maritime de notre zone d'étude) est entièrement prédictible avec des caractéristiques individuelles ou de peuplement.

On va proposer un modèle qui nous paraît pertinent

Soit $Age_{ij} \rightarrow \mathcal{N}(H_{tot})$ et $\log Age_{ij} = \mu + \alpha H_{tot_{ij}}$

Avec

i représente l'arbre considéré

j représente la placette considérée

Age_{ij} désigne l'âge, pour le ième arbre sur la jème placette

$H_{tot_{ij}}$ désigne la hauteur, pour le ième arbre sur la jème placette

μ est le terme constant

α est l'effet global de la taille

Le modèle qui nous permet de relier l'âge à la hauteur est présenté dans le tableau ci-dessous.

Modèle	μ	α	R^2
Modèle	1.72***(0.018)	0.083***(0.00093)	0.90

Tableau 16- Différents modèles testés permettant de prédire l'âge en fonction d'autres paramètres individuels ou de peuplement.

C'est un modèle de type exponentiel. Avec la correction de Baskerville on obtient l'équation suivante :

$$\text{Age} = 5.58 * 1.00 * \exp(0.083 * H_{tot})$$

La hauteur totale d'un arbre est très significative dans la prédiction de l'âge de l'individu. Ce modèle permet d'expliquer l'essentiel de la variabilité de l'âge en fonction de la hauteur totale seulement, avec un $R^2 = 0.90$. On peut donc prédire l'âge des placettes de relevé manuelle avec seulement cette hauteur. Or la hauteur relevée au vertex est légèrement différente de celle que l'on obtient avec un relevé LiDAR.

On va donc pouvoir estimer l'âge de nos placettes et avoir le temps comme élément de référence pour les comparaisons entre simulation et terrain en combinant les deux modèles choisis.

On utilise dans tous les modèles la hauteur totale de l'arbre. Or les hauteurs mesurées au vertex et les hauteurs mesurées au Lidar peuvent différer légèrement. On va quantifier ce biais à l'aide de nos placettes où les deux ont été relevés (c'est-à-dire 7 placettes).

La question que l'on se pose est :

Peut-on assimiler la hauteur mesurée au vertex à celle mesurée au Lidar?

On émet donc l'hypothèse correspondante :

H_0 : Les hauteurs mesurées au Lidar et au vertex sont identiques.

Modèle :

Soit $H_{totv_{ij}} \rightarrow \mathcal{N}(H_{totl})$ et $H_{totv_{ij}} = \alpha H_{totl_{ij}}$

Avec

i représente l'arbre considéré

j représente la placette considérée

$H_{totv_{ij}}$ désigne la hauteur vertex, pour le ième arbre sur la jème placette

$H_{totl_{ij}}$ désigne la hauteur lidar, pour le ième arbre sur la jème placette

α est l'effet global de la hauteur lidar sur la hauteur vertex

Le tableau ci-dessous présente les résultats du modèle mettant en relation les deux types de hauteurs totales.

modèle	α	R^2
Modèle	0.98*** (0.020)	0.998

Tableau 17- Modèle de prédiction de la hauteur relevé au vertex en fonction de celle au Lidar.

La différence que l'on observe entre la mesure par vertex et la mesure par LiDAR peut être dû à une sous-estimation systématique lors de la prise de données vertex. Pour un arbre de 10 m cela donne 2 cm de différence et pour un arbre de 30 m (le maximum que l'on trouve dans nos placettes) on a une différence de 6 cm. On peut alors dire que la différence entre la hauteur mesurée par le Lidar et par le vertex est négligeable. Il faut tout de même rappeler que nous tirons cette conclusion sur la comparaison d'un jeu de 6 placettes seulement. Ce travail n'a donc qu'une valeur d'étude préliminaire.

ANNEXE 6 : LE MODELE D'ACCROISSEMENT RADIAL

Cette annexe présente deux résultats complémentaires au développement de la croissance radiale : l'approximation faite pour le modèle de section à partir de la surface foliaire et l'interrogation sur l'influence de l'âge de l'arbre dans le modèle de croissance radiale.

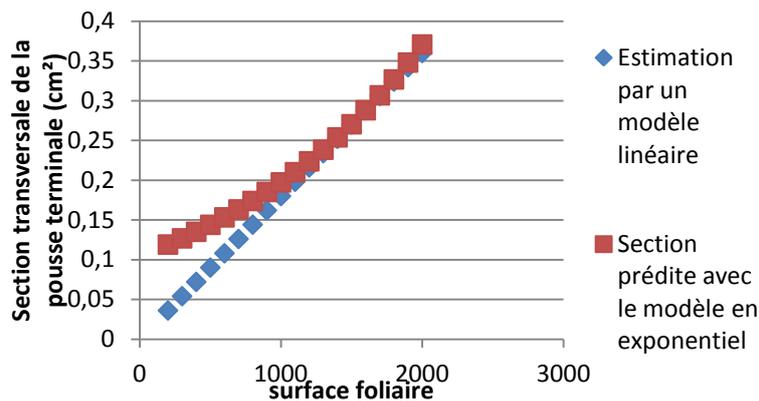


Figure 4-Modèle d'ajustement au modèle de croissance radiale sur les pousses terminales

La droite passant par zéro qui s'approche le plus de la courbe exponentielle du modèle initial pour les valeurs inférieures à 1000 cm² de surface foliaire a pour équation :

$$\text{Section} = 0.0002 * \text{Surface_foliaire}$$

On a fait l'approximation au vu de nos données disponibles (juste un fichier traitant des aiguilles sur uniquement des arbres de 47 ans) de ne pas considérer que l'âge de l'arbre avait une influence sur la relation longueur feuillée section de la pousse. Ce qui va suivre nous permet de relativiser cette affirmation.

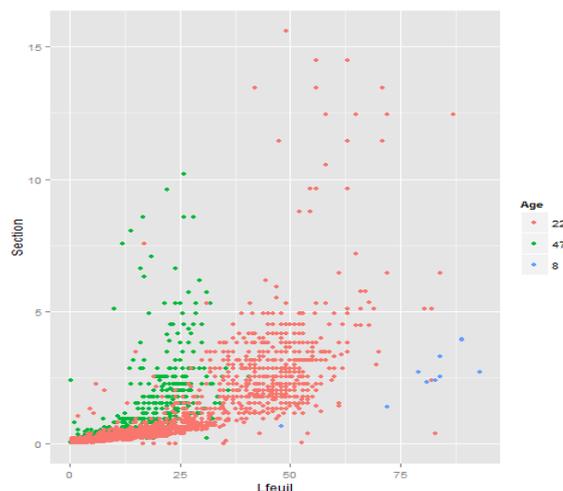


Figure 5- Logarithme de la section des pousses terminales en fonction du logarithme de la longueur feuillée des pousses terminales en différenciant les âges des individus.

La question que l'on se pose maintenant est :

Peut-on prédire la section d'une pousse feuillée en fonction de sa longueur feuillée et de l'âge de l'arbre chez le pin maritime?

On émet donc l'hypothèse correspondante :

H_0 : La section porteuse dépend de la longueur feuillée et de l'âge.

Soit $S_{ij} \rightarrow \mathcal{N}(L_{\text{feuille}}, \text{age})$

Et $S_{ij} = \mu + \alpha L_{\text{feuille}_i} + \beta \text{age}_j$

Avec

i représente la pousse considérée

j représente l'arbre considéré

S_{ij} désigne la section, pour le i ème pousse de l'individu j

μ est le terme constant

α est l'effet global de la somme des sections portées

β est l'effet de l'âge

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)	
Lfeuille	1	4447	4447	14287.0	<2 ^e -16	***
Age	2	279	140	448.5	<2 ^e -16	***
Résiduels	4429	1379	0			

Le diamètre des pousses terminales semble être significativement relié à l'âge de l'arbre considéré. Cela peut peut-être s'expliquer par la variation de la vivacité des bourgeons terminaux au cours du temps, qui peut modifier la relation entre la longueur feuillée et la section de la pousse. En effet à 47 ans certaines longueurs feuillées ne sont jamais atteinte. Pourtant si on compare le même ordre de grandeur de section dans les trois classes d'âge, on remarque qu'il faut une longueur feuillée moins grande pour les arbres plus âgés. Pour compléter cette observation il faudrait obtenir des données sur le nombre d'aiguilles portées par pousse à chaque âge. On remarque tout de même que l'évolution de la section en fonction de la longueur feuillée est la même.

On fait l'approximation que l'âge n'a pas d'influence car on n'a toutes les données sur un seul âge (47 ans)

ANNEXE 7 : PARAMETRES MODIFIES LORS DE L'AJUSTEMENT

Caractères visés	Paramètres fixés	Modèle initial	Modèle final	Ressource utilisée
Hauteur totale	Nombre d'entre-nœud (préformé-néoformé) pour la pousse à l'AgePhy de 1 an	(3-13)	(3-27)	Coudurier et al (1993)
	Nombre à 2 ans	(3-13)	(3-27)	
	Nombre à 5 ans	(8-32)	(8-46)	
	Nombre à 10 ans	(17-68)	(10-80)	
	Nombre à 15 ans	(11-44)	(11-49)	
	Nombre à 20 ans	(8-32)	(8-37)	
	Nombre à 45 ans	(4-16)	(8-37)	
Hauteur de première branche	Age total du bourgeon terminal A2	25 ans	35 ans	Données de réajustement
	Age total du bourgeon terminal A3	15 ans	20 ans	
	Age total du bourgeon terminal A4	10 ans	15 ans	
Dimension latérale du houppier	Angle d'insertion des branches	60	80	Données initiales
	Nombre d'entre-nœud (préformé-néoformé) pour la pousse à l'AgePhy 215	(7-30)	(5-22)	Données de réajustement
	Nombre d'entre-nœud (préformé-néoformé) pour la pousse à l' AgePhy 256	(2-8)	(2-12)	
Surface foliaire totale	Surface foliaire unitaire (longueur*largeur)	20*3	20*0.5	Données initiales
	Nombre de feuille par entre-noeud	3	2	
	Probabilité de ramification des A3	0	0.4	
	Nombre de ramification A4 par pousse ramifié A3	0	1.5	
	Nombre de ramification A2 par pousse ramifié A1 (maximum de ramification*probabilité de ramification = moyenne de ramification/nombre d'entre-nœud portant des branches)	2*1/1	7*0.3/2	Heuret et al (2006)

ANNEXE 8 : COMPARAISON PROFONDEUR DE HOUPPIER DES PLACETTES RELEVÉES AU LIDAR ET VERTEX

La profondeur de houppier des peuplements simulés est plus élevée que celle extraite à partir de placettes de LiDAR. Cela peut être dû à une mauvaise mesure de la hauteur de première branche ou de sommet de houppier.

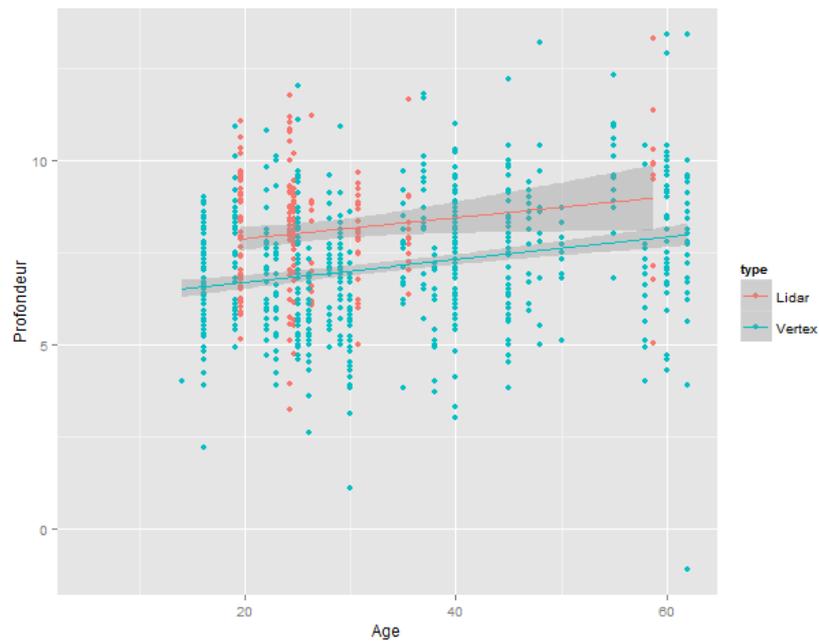


Figure 6- Comparaison de la profondeur des arbres mesurés par le Lidar-T (rouge) et des arbres mesurés au vertex (bleu).

ANNEXE 9 : COMPARAISON DES EFFECTIFS DE TROUEES PAR CLASSE AVANT ET APRES MODIFICATION DU MODELE

On a décidé de choisir un indicateur qui nous permettrait de qualifier de manière plus précise nos trouées. On a donc déterminé 10 classes : 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90 et 90-100. Les effectifs de trouées par classe sont présentés ci-dessous.

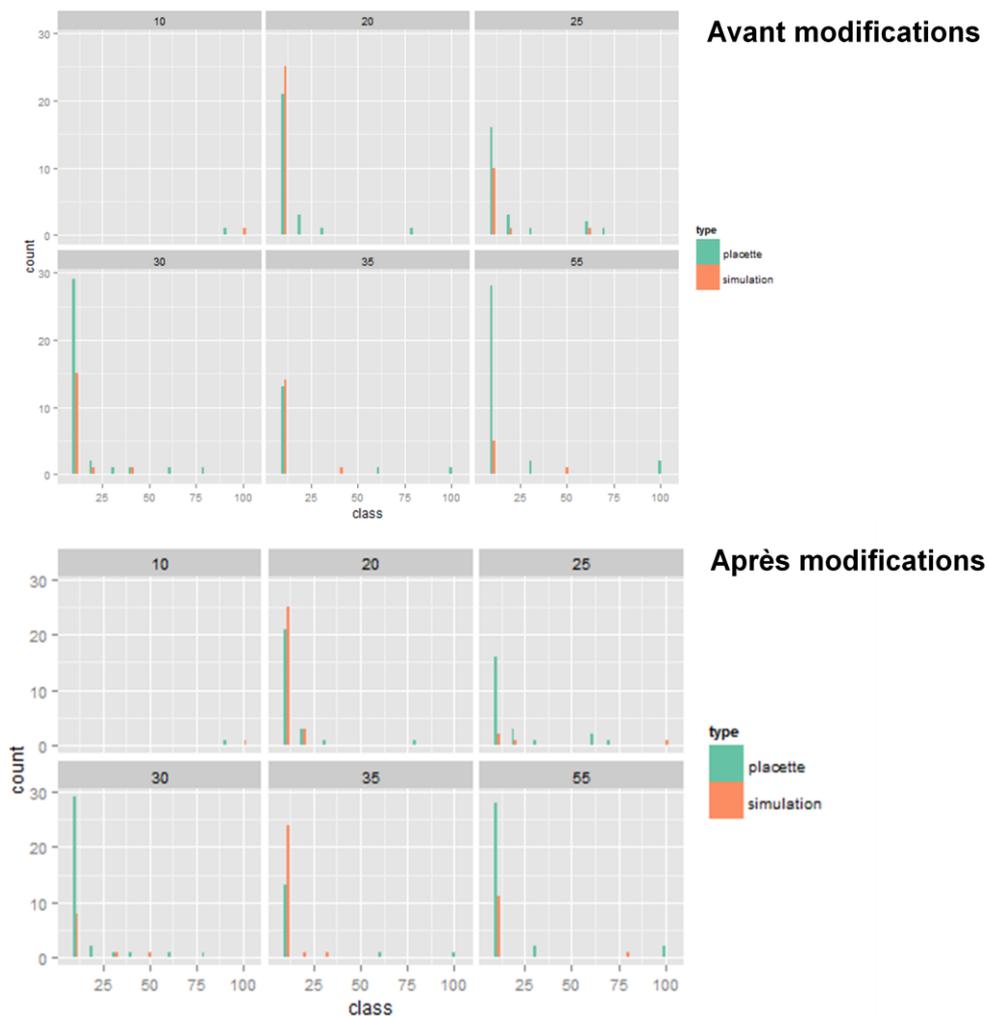


Figure 7- Comparaison des distributions des tailles de trouées entre les placettes simulées (en orange) et les placettes de terrain (en vert) pour plusieurs âges, avant (en haut) et après (en bas) modification.

Dans notre travail sur les espaces inter-couronnes on compare deux à deux les scènes LiDAR avec les simulations. Or on a estimé l'âge des placettes LiDAR, ce qui signifie qu'il peut y avoir jusqu'à 10 ans d'écart entre la réalité et l'âge estimé. La comparaison deux à deux semble peu pertinente. C'est pour cela qu'on n'essaie pas de reproduire exactement les mêmes effectifs.

ANNEXE 10 : TRAVAIL SUR L'INTERIEURE DU HOUPPIER

Comme je l'ai exposé plus haut il est important pour le réalisme de la maquette que la densité de matière au sein de la couronne soit réaliste, sinon le signal renvoyé ne sera pas représentatif de la réponse d'un vrai peuplement équienne de pin maritime.

Pour ce faire il nous faut comparer la densité de matière dans les couronne entre les scans Lidar et les maquettes simulées. Notre seul moyen au vue de nos données initiales est de comparer une densité volumique de points dans l'étage «houppier », en créant un nuage de point à partir de nos maquettes et en les traitants sous Computree.

Or tel quel on ne peut comparer les deux nuages de points (le nuage consolidé avec 6 scans et la répartition homogène des points sur la maquette simulée). En effet il peut y avoir des phénomènes d'occultation dans le houppier avec le LiDAR-T qui ne sont pas présents pour la répartition de points des maquettes. Pour ce faire il me faut dégrader les nuages de points (réduire le nombre de points et les répartir de manière plus homogène) de manière équivalente.

Pour connaitre le niveau de dégradation nécessaire on peut effectuer un test sur une maquette. On va créer un nuage de point lié à la géométrie de la maquette et le comparer avec un nuage de point qui résulterait de la simulation du protocole de prise des données TLS. Il faudrait faire subir à ces deux nuages une dégradation croissante, jusqu'à obtenir un nombre de points similaires.

ANNEXE 11 : TRAVAIL DE PEUPEMENT SOUS FORME DE MAQUETTE-COLLAGE

En parallèle de la démarche de peuplement exposée dans ce rapport, un autre travail a été mis en place.

L'un des attendus fort du stage est la création de maquette « réaliste » de peuplement de pin maritime. En effet comme nous rencontrons des problèmes de simulation de nos maquettes, il a fallu trouver une solution de second ordre.

Le modèle individuel a été validé selon nos critères, et peut donc en théorie servir pour créer des maquettes qui ressemblent point par point aux scènes LiDAR disponibles. Au lieu de simuler la croissance d'un peuplement et en extraire une scène à différents âge, on va assembler des arbres d'un même âge selon une configuration déjà existante.

Dans le cas où cette méthode ne fonctionnerait pas au premier test, il faudrait envisager de créer plusieurs versions de notre modèle individuel. Cela permettrait alors de pouvoir envisager plusieurs âges et plusieurs densités. Ou alors il faudra envisager un post-traitement sur xplo (coupe de branche, par exemple).

Pour se faire on extrait les coordonnées des arbres présents sur chaque placette qui nous intéresse. On pourra créer un ensemble de scènes où l'emplacement de chaque arbre est connu. On comparera ensuite l'espace inter-couronne. On reprendra les mêmes critères de comparaison que pour la version « croissance en peuplement ».

Cela peut également nous donner un objet de comparaison avec la première méthode exposée, afin de relativiser le travail.

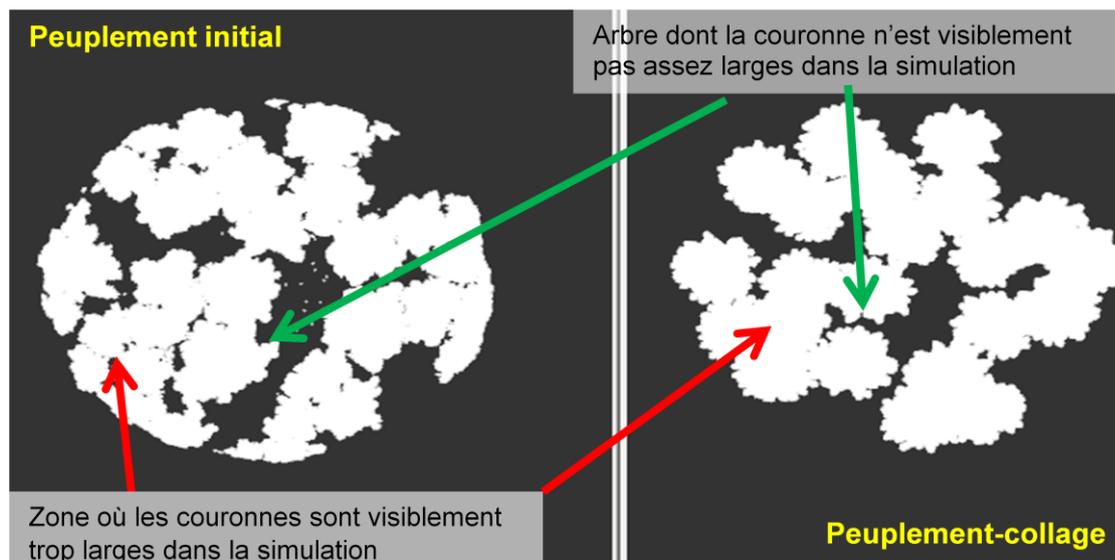


Figure 8- Comparaison visuelle entre les peuplements simulés et les relevés LiDAR.

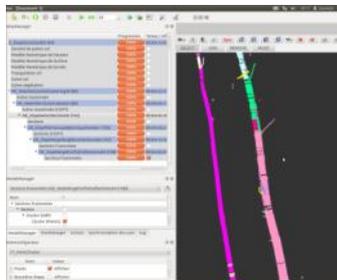
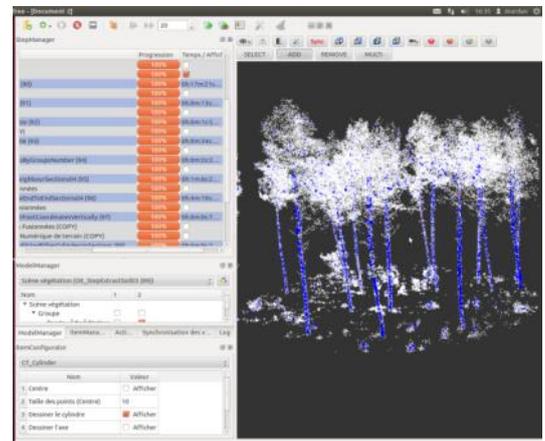
ANNEXE 12 : FICHE TECHNIQUE DU TRAVAIL SOUS COMPUTREE.

Ici seront synthétisées les actions faites sous COMPUTREE. Deux types de travail sont exécutés grâce à ce logiciel : le traitement des peuplements de pins maritimes réels et le traitement des peuplements simulés.

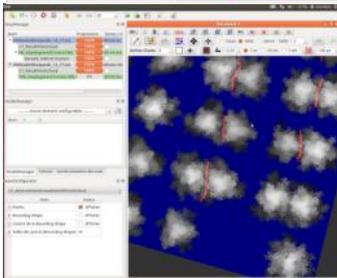
Pour les peuplements de terrain on effectue un ensemble d'opérations qui nous permettent d'extraire trois grandeurs :

- Le diamètre à 1m30 de manière automatique
- Le diamètre à hauteur de la première branche de manière manuelle
- La surface de couronne projetée

Pour se faire on ajuste à notre nuage de point un ensemble de cylindre, qui viendra modéliser les troncs. On sélectionnera de manière automatique le diamètre de tous les cylindres présent à hauteur de 1m30 du MNT (fourchette de 1m20 à 1m40). Cette étape est très insatisfaisante, car elle peut ajuster des cylindres sur de la végétation herbacée présente à 1m30 ou ne pas associer un diamètre à chaque arbre car il n'existe pas de cylindre à 1m30 pour ce dernier.

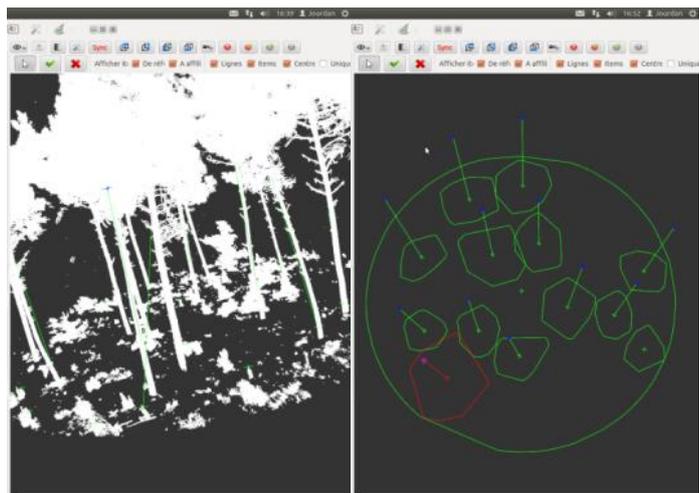


On choisit également le bon cylindre pour la hauteur de la première branche vivante en partant du bas. On extraira comme ceci la hauteur et le diamètre de ce cylindre.



Enfin on extrait la surface projetée de couronne et la hauteur totale de l'arbre.

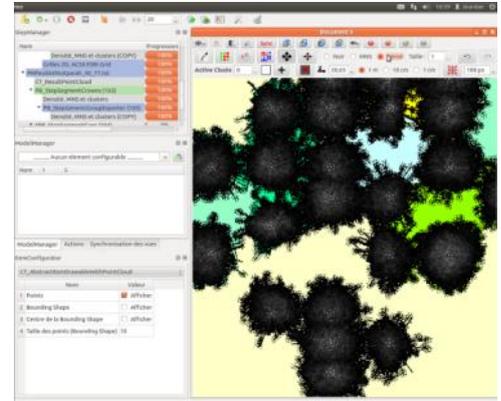
On associe un identifiant à chaque item cité ci-dessous. On crée ensuite un identifiant commun à tous pour pouvoir ensuite avoir toutes les caractéristiques relevées par arbre.



Pour comparer les peuplements simulés et les peuplements de terrain on effectue un ensemble d'opérations qui nous permettent d'extraire deux grandeurs :

- La surface de couronne projetée
- La surface de trouées

On extrait la surface projetée de la même manière que précédemment. On extrait ensuite la surface de chaque trouée.



ANNEXE 13 : PRESENTATION DU RESULTAT 3D DE L'OPTION DE REPRIS DE CROISSANCE

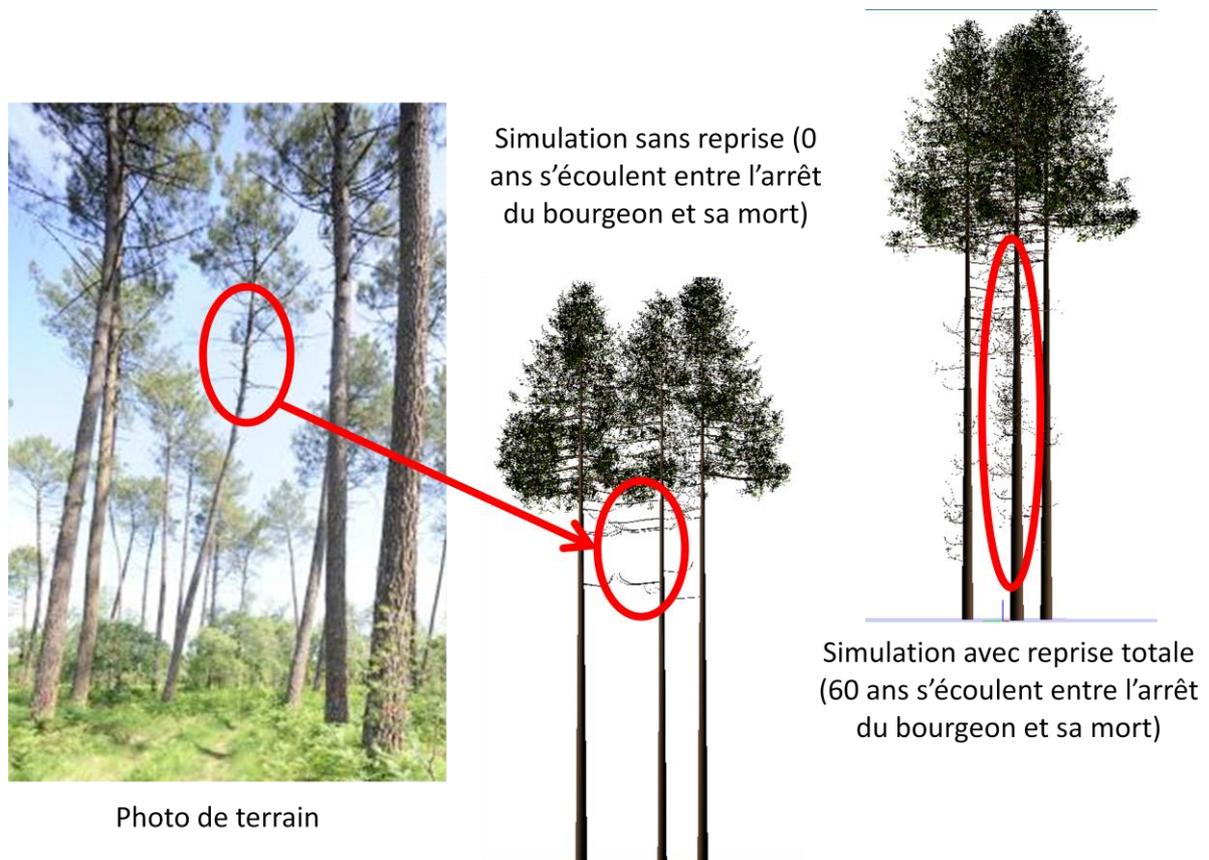


Figure 9-Effet de la reprise de croissance après gêne stérique

On remarque que l'option reprise devra être paramétré pour que 0 années ne s'écoulent entre l'arrêt du bourgeon et sa mort. C'est l'option que l'on a justement choisi pour les simulations faites pour la commande.

ANNEXE 14 : COMPARAISON DE LA FORME DU HOUPPIER ENTRE LE TERRAIN ET LES SIMULATIONS

Comparer la forme du houppier n'était pas dans les considérations initiales, mais après quelques observations rapides on a remarqué qu'il y avait des différences entre la réalité et les simulations.

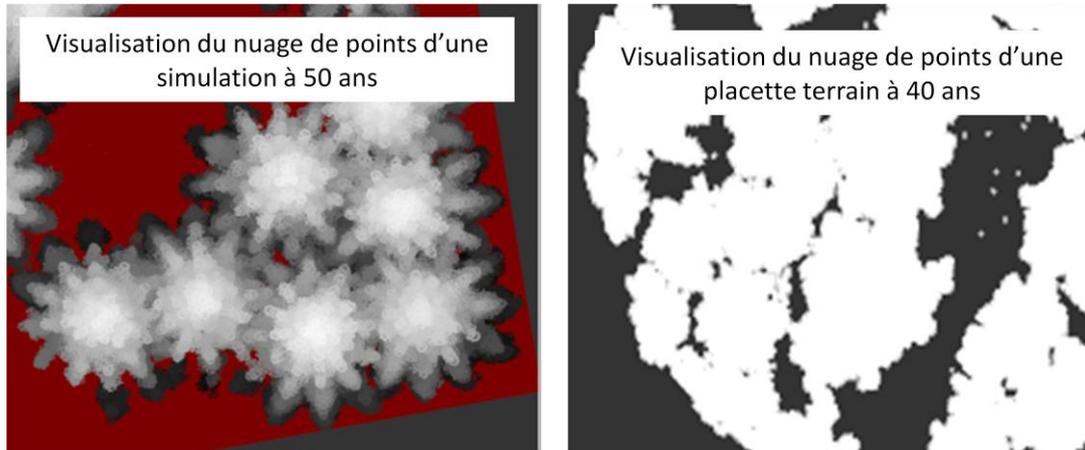


Figure 10-Visualisation de l'effet "paquerette"

On remarque que la forme de pâquerette des simulations vues de dessus n'est pas présente représentative de la forme des houppiers de pins maritimes réels. De la même manière si on compare la forme latérale des houppiers, elles ne sont pas comparables. A 60 ans on observe une forme allongées triangulaire du houppier qui ne se retrouve pas dans les arbres de 60 ans du terrain et peu dans ceux de 30 ans.



Figure 11- Problème de la forme de houppier

