MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE des SCIENCES AGRONOMIQUES de BORDEAUX AQUITAINE
1, cours du Général de Gaulle - CS 40201 - 33175 GRADIGNAN cedex

M E M O I R E de fin d'études

pour l'obtention du titre

d'Ingénieur de Bordeaux Sciences Agro

Analyse de la croissance et de la rentabilité d'itinéraires semi-dédiés et dédiés à la production de bois énergie, mis en place pour le Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.), dans le cadre du programme CLIMAQ

Assessment of g*rowth and profitability of semi-dedicated and dedicated stands of Maritime pine (Pinus pinaster,* Ait.*) for bioenergy production, tested during the CLIMAQ program*

PUYAL Malaurie

Spécialisation : Management forestier et logistique d'approvisionnement en bois

Étude réalisée à : CRPF de Nouvelle-Aquitaine
6 Parvis des Chartrons
33 000 Bordeaux

- 2 0 2 0 -

MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE des SCIENCES AGRONOMIQUES de BORDEAUX AQUITAINE
1, cours du Général de Gaulle - CS 40201 - 33175 GRADIGNAN cedex

M E M O I R E de fin d'études

pour l'obtention du titre

d'Ingénieur de Bordeaux Sciences Agro

Analyse de la croissance et de la rentabilité d'itinéraires semi-dédiés et dédiés à la production de bois énergie, mis en place pour le Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.), dans le cadre du programme CLIMAQ

Assessment of g*rowth and profitability of semi-dedicated and dedicated stands of Maritime pine (Pinus pinaster,* Ait.*) for bioenergy production, tested during the CLIMAQ program*

PUYAL Malaurie

Maitre de stage : MARIS-PAGIS Cécile (Responsable massif des Landes de Gascogne)

Tuteur de stage : DOMEC Jean-Christophe

Spécialisation : Management forestier et logistique d'approvisionnement en bois

Étude réalisée à : CRPF de Nouvelle-Aquitaine
6 Parvis des Chartrons
33 000 Bordeaux

- 2 0 2 0 -

PREFACE

Organisme d'accueil du stage :

Le Centre National de la Propriété Forestière (CNPF) est un établissement public qui a pour rôle d'aider au développement de la gestion durable des forêts privées. Pour cela, différentes missions sont réalisées :

- orienter et agréer les documents de gestion durable de la forêt privée

- accompagner les sylviculteurs et propriétaires dans la gestion de leur forêt

- réaliser des études et expérimentations sur la forêt et diffuser les résultats

Pour réaliser ces missions, le CNPF regroupe l'Institut pour le Développement Forestier (IDF), son service de R&D et d'innovation, et 11 délégations régionales.

C'est au sein de la délégation Nouvelle-Aquitaine, sur le site de Bordeaux, que ce stage a été réalisé. Cette délégation est administrée par un Conseil de Centre composé de 30 sylviculteurs élus par les propriétaires forestiers de plus de 4 ha. Ingénieurs, techniciens et personnels administratifs se répartissent dans toute la Nouvelle-Aquitaine pour répondre aux besoins et demandes des propriétaires privés et de leur forêt.

Evènement extérieur marquant ayant eu lieu au cours de la période de stage :

Ce stage s'est réalisé durant la crise particulière de la Covid-19, de l'année 2020. L'obligation de confinement a démarré mi-mars, un mois et demi après le début du stage. Le télétravail a permis de ne pas mettre en péril le déroulement du stage. Trois mois sur les six mois de stage ont été réalisés en télétravail. Cela n'a cependant pas influencé les résultats émis dans ce rapport.

REMERCIEMENTS

Je remercie INRAE - UEFP (https://doi.org/10.15454/1.5483264699193726E12) et plus particulièrement L. Severin, pour l'installation et le suivi des dispositifs de Cestas et de Luglon. Le FCBA, avec Jean-Mathieu de Boisseson, pour l'installation et le suivi du dispositif d'Hourtin. L'IDF, avec Dominique Merzeau, pour le suivi et la transmission des données issues des essais CPFA, installés dans le cadre du GIS Coopérative de Données, sur la Croissance des Peuplements Forestiers.

Je remercie Céline Meredieu, pour la transmission des données des dispositifs INRAE, la mise au point du protocole pour la campagne de mesure du site Hourtin, ainsi que pour la mise à disposition de Capsis/PP3. Je remercie aussi Jean-Mathieu de Boisseson du FCBA pour la transmission des mesures d'Hourtin, de très précieuses données pour ce rapport.

Je remercie aussi mon tuteur école, Jean-Christophe Domec, pour le suivi du stage et les réponses rapides à mes demandes.

Je remercie tout particulièrement Cécile Maris, Dominique Merzeau et Céline Meredieu pour la continuité du suivi de mon stage, pour les nombreuses heures de discussions, de réflexion et d'interprétation des résultats. Je les remercie aussi pour mon intégration dans ce projet et leur apport de connaissances.

Je remercie aussi les différents acteurs de la filière que j'ai eu l'opportunité de rencontrer au cours des différents entretiens. J'ai eu la chance de discuter avec des personnes très accueillantes et ouvertes, permettant d'enrichir ce rapport.

Enfin, un grand merci à toute l'équipe du CRPF Nouvelle-Aquitaine, qui m'a accueilli, et m'a permis de réaliser ce stage dans un cadre professionnel agréable.

.

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

GLOSSAIRE

I. Introduction 1

i. Contexte pédo-climatique, sylvicole et économique de la filière forêt-bois du massif des Landes de Gascogne, Nouvelle-Aquitaine 1

ii. Evolution de l'environnement forestier, de la demande du marché et développement de nouveaux itinéraires 2

iii. Mise en place du programme CLIMAQ 3

iv. Perceptions et comportements des acteurs de la filière vis-à-vis des scénarios semi-dédiés (SD) et dédiés (D) en Nouvelle-Aquitaine en 2020 4

v. Littérature et hypothèses de travail 6

II. Matériel et méthode 8

i. Présentation des sites d'études et des données disponibles 8

a. Présentation du site principal de l'étude : Hourtin 8

b. Présentation des sites secondaires de l'étude : Luglon et Cestas 9

ii. Méthodologie appliquée pour l'analyse des données 10

a. Prétraitement des données du site Hourtin 10

b. Tests statistiques, scénarios de croissance et témoins des analyses 11

iii. Méthodologie appliquée pour l'analyse économique sur Hourtin 12

a. Hypothèses sylvicoles, volumes disponibles et interventions sylvicoles 12

b. Hypothèses de prix pour la valorisation des bois 13

c. Hypothèses de coûts pour les travaux réalisés et les frais de gestion 13

d. Les Indicateurs économiques retenus 14

IV. Résultats 15

i. Comparaison des résultats dendrométriques des dispositifs SD et D avec d'autres peuplements des Landes de Gascogne 15

ii. Effet de la densité sur la mortalité et la croissance des peuplements (A-1) 16

iii. Effets de l'ajout d'une ligne biomasse sur la croissance du peuplement principal en SD (A-2) 18

iv. Effet du schéma sur la croissance du peuplement principal en SD (B-1) 19

a. Effet de l'augmentation de la densité sur la ligne biomasse (a) 20

b. Effet de l'agencement en double ou simple ligne (b) 20

v. Rentabilité et viabilité économique des itinéraires SD et D (B-2) 21
a. Compensation du surcoût de plantation lié à la ligne biomasse dans les SD à 9 ans (a) 21
b. Résultat économique à l'échelle d'une révolution 23
V. Discussion 25
i. Biais éventuels liés au site expérimental et aux hypothèses de travail 25
ii. Effet de la densité de plantation sur la mortalité et la croissance 26
iii. Effet de l'ajout d'une ligne biomasse et de son agencement sur le peuplement principal des SD 27
iv. Rentabilité et viabilité économique des itinéraires SD et D 28
v. Eléments complémentaires d'analyse 29
Conclusion 30
BIBLIOGRAPHIE 31
ANNEXES

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Hauteurs et circonférences moyennes sur Luglon, Cestas et Hourtin, comparées aux résultats des dispositifs CPFA 15

Figure 2 : Taux de mortalité sur Luglon, Cestas et Hourtin en fonction de la densité initiale de plantation 16

Figure 3 : Circonférences et hauteurs moyennes sur Luglon, Cestas et Hourtin, pour les différents âges de mesure, en fonction de la densité à l'âge de mesure 16

Figure 4 : Volume unitaire moyen sur le site Hourtin à 9 ans, en fonction de la densité à 9 ans 17

Figure 5 : Surfaces terrières et élancements moyens sur Luglon, Cestas et Hourtin, pour les différents âges de mesure, en fonction de la densité à l'âge de mesure 17

Figure 6 : Distribution des individus dans les différentes classes de diamètres sur Hourtin à 9 ans 18

Figure 7 : Boxplots des volumes unitaires du peuplement principal des schémas semi-dédiés par rapport aux témoins, sur Hourtin à 9 ans 19

Figure 8 : Prix minimum d'achat (en €) du MWh pour compenser le surcoût d'installation de la plantation biomasse dans les schémas semi-dédiés, sur Hourtin 22

Figure 9 : Bilan économique de la plantation après la coupe bois énergie dans les schémas semi-dédiés, selon différents prix de vente (en €) du MWh, sur Hourtin 22

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Sites expérimentaux installés dans le cadre de la tâche C3.2 du programme CLIMAQ, pour le Pin maritime 3

Tableau 2 : Faiblesses sylvicoles émises par les acteurs lors des entretiens ……..4

Tableau 3 : Faiblesses et menaces économiques émises par les acteurs lors des entretiens…….....5

Tableau 4 : Faiblesses et menaces environnementales et politiques émises par les acteurs lors des entretiens ……6

Tableau 5 : Forces et opportunités émises par les acteurs lors des entretiens ……..…6

Tableau 6 : Présentation des modalités mises en place sur le site principal de l'étude Hourtin ……..9

Tableau 7 : Présentation des modalités mises en place sur les sites secondaires de l'étude Luglon et Cestas ……10

Tableau 8 : Coûts des travaux forestiers utilisés pour l'étude économique, selon des dépenses ponctuelles ou récurrentes ……..……14

Tableau 9 : Aide à l'interprétation des indicateurs retenus pour l'analyse économique.……..14

Tableau 10 : Résultats des analyses pour évaluer l'effet de la densité du peuplement biomasse sur la croissance du peuplement principal ou final dans les schémas semi-dédiés, sur Hourtin à 9 ans…….20

Tableau 11 : Résultats des analyses pour évaluer l'effet de l'agencement des lignes biomasses sur la croissance du peuplement principal ou final dans les schémas semi-dédiés, sur Hourtin à 9 ans 21

Tableau 12 : Classement des résultats des ACE en base 100, des schémas semi-dédiés, sur Hourtin, à l'échelle du scénario sylvicole ……23

Tableau 13 : Prix minimum d'achat (en €) du MWh pour rendre équivalent le profit des schémas semi-dédiés par rapport à un itinéraire bois d'œuvre standard, sur Hourtin ……23

Tableau 14 : Prix minimum d'achat (en €) du MWh pour rendre les schémas dédiés pour l'énergie rentables, pour un âge de récolte finale à 15 ou 20 ans, sur Hourtin ……..……24

Tableau 15 : Classement des résultats des ACE en base 100, des schémas dédiés pour un débouché bois d'industrie/bois d'œuvre à 20 ans, à l'échelle du scénario sylvicole, sur Hourtin ……24

LISTE DES ABREVIATIONS

BI : Bois d'industrie

BE : Bois énergie

BO : Bois d'œuvre

CLIMAQ : Changement climatique et adaptation des forêts d'Aquitaine au changement climatique

EnR : Energie renouvelable

PCI : Pouvoir calorifique interne

AFB : Alliance forêt bois, anciennement CAFSA, coopérative forestière

FCBA : Forêt cellulose bois-construction ameublement, institut technologique

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement, fusion de l'INRA et de l'IRSTEA, organisme de recherche publique

CRPF : Centre régional de la propriété forestière, organisme public

ETF : Entreprise des travaux forestiers

Vu : Volume unitaire

D : Culture dédiées à une production, comme pour la production de bois énergie

SD : Culture semi-dédiées à la production de bois énergie et de bois d'œuvre

GLOSSAIRE

Les mots définis dans ce glossaire sont identifiés par un astérisque lors de leur première apparition dans le corps du texte.

Alios : roche typique des Landes de Gascogne qui résulte de la cimentation des grains de sable et graviers par de l'aluminium, de fer et de la matière organique. L'alios peut se retrouver à différentes profondeurs dans le sol, et forme une barrière pour le développement racinaire des arbres.

Biomasse forestière : matière organique, vivante ou morte présente en-dessus (tronc, branche, feuilles, aiguilles) ou en dessous (souches, racines) de la surface forestière.

Coupe rase : opération sylvicole qui consiste à récolter l'ensemble des arbres sur pied commercialisable au sein du peuplement et précédant une nouvelle régénération.

Eclaircie : opération sylvicole pratiquée en peuplements forestiers non arrivé à maturité, qui consiste à réduire le nombre de tiges et à récolter des produits marchands. Généralement sélective, les arbres récoltés sont des arbres de moindre valeur (petits diamètres, dépérissant,

mauvais état sanitaire). L'éclaircie a pour but de favoriser la croissance en diamètre des arbres restants.

Futaie régulière/irrégulière : La futaie représente un ensemble d'arbres, d'âges avancés, issus de semis ou de plants. Elle est dite régulière lorsque tous les arbres ont des âges voisins, en revanche, elle devient irrégulière lorsque diverses classes d'âges et diamètres sont présentes.

Houppier : ensemble des ramifications vivantes d'un arbre situées au-dessus du fût (Vocabulaire forestier)

Masse de bois anhydre : masse de bois sec obtenue après séchage dans une étuve et atteinte d'un équilibre de cette masse.

Masse de bois brute : masse du bois vert, c'est-à-dire du bois et de l'eau contenu dans celui-ci, donc sans opération de séchage préalable.

PCI : quantité de chaleur que peut libérer un matériau lors de la combustion, par unité de volume, exprimé en wattheure (wh)

Rémanents : branche, bois mort, feuilles/aiguilles qui restent sur le sol forestier après exploitation.

Ressuyage : séchage des bois à l'air libre, après abattage, afin d'en faire diminuer l'humidité.

Réversibilité : capacité de continuer la gestion planifiée d'un peuplement forestier ou de pouvoir modifier et adapter la gestion de ce peuplement en fonction de l'état du peuplement, et de l'évolution de facteurs extérieurs tels que le marché (modification du débouché en fonction de la demande du marché) ou les évolutions techniques de transformation et de récolte des bois.

Révolution : nombre d'années qui sépare la plantation ou la régénération d'un peuplement forestier et le moment où le peuplement a atteint l'âge de maturité et est abattu à des fins commerciales de récolte finale.

I. Introduction

i. Contexte pédo-climatique, sylvicole et économique de la filière forêt-bois du massif des Landes de Gascogne, Nouvelle-Aquitaine

Le massif des Landes de Gascogne se situe dans le Sud-Ouest de la France, en région Nouvelle-Aquitaine. Avec plus d'un million d'hectares de bois, c'est l'un des plus vastes massifs forestiers cultivés d'Europe (DRAAF, 2019). Les sols landais, majoritairement podzolisés (acides et parfois à alios*), font partie des plus pauvres sols forestiers existants. De plus, leur réserve utile très faible, entrainant un déficit hydrique estival fréquent et un possible engorgement l'hiver, ne laisse que peu d'essences se développer (IGN, 2013). Le Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.), essence indigène sur le massif, est parfaitement adapté à ces différentes contraintes. Cette essence dispose d'une grande variabilité génétique et se retrouve ainsi de l'Europe du Sud à l'Afrique du Nord, ainsi que sur la côte atlantique du Portugal, de l'Espagne et de la France (Alia and Martin, 2002). Essence de pleine lumière (héliophile) considérée à croissance rapide, le Pin maritime est omniprésent sur ce massif, situé au nord de l'aire de répartition actuelle de cette essence (Alia and Martin, 2002; DRAAF, 2019).

En 2020, 91% de ce massif forestier est détenu par des propriétaires privés (FCBA, 2020). La sylviculture classique du Pin maritime dans les Landes privilégie les peuplements en futaie régulière*, à destination BO (Bois d'œuvre). D'autres objectifs de production existent, permettant la diversification de ces itinéraires. De manière schématique, en itinéraire BO, on distingue la longue révolution (45-60 ans) pour la production du bois de haute qualité (Vu (Volume unitaire) > 1.5 m^3) et ***l'itinéraire BO standard*** (35-45 ans ; Vu de 1 à 1.2 m^3). La densité finale de 300 tiges/ha est obtenue après 3 à 4 éclaircies* effectuées sur un peuplement initial de 1000 à 1666 tiges/ha. En itinéraire petits sciages et courte révolution, deux scénarios se distinguent. Le scénario 30-35 ans pour un peuplement final de 450 à 600 tiges/ha (Vu 0.6 à 0.8 m^3) après 1 ou 2 éclaircies, et le scénario en 20-25 ans mené avec ou sans éclaircie, en plus ou moins forte densité initiale (CRPF, 2005; Lesgourgues *et al.*, 2009). Par ailleurs, le Schéma Régional de Gestion Sylvicole (SRGS) d'Aquitaine permet d'autres sylvicultures. Divers débouchés existent pour cette essence : production de pâte à papier, palettes, planchers, panneaux de particules, bois pour la construction, ou encore l'énergie notamment avec les souches et les branches (CRPF, 2005; Lesgourgues *et al.*, 2009).

A l'échelle de la France Métropolitaine, le prélèvement annuel moyen entre 2009 et 2017 est de 48 Mm^3 toutes essences, dont 24.7 Mm^3 de conifères. Le Pin maritime, essence la plus prélevée sur cette période, représente respectivement 14% et 28% de ces volumes récoltés (IGN, 2019). Elle représente aussi 64% de la filière trituration et 61% de la filière BO de Nouvelle-Aquitaine (FCBA, 2020). Pour cette région, le chiffre d'affaire de la filière forêt-bois est de plus de 10 milliards d'euros, la plaçant au 1er rang français. Plus de 50 000 salariés font partie de cette filière, un nombre d'emplois qui surpasse celui de la filière aéronautique dans cette région. Le Pin maritime joue un rôle majeur pour la filière forêt-bois du territoire Nouvelle-Aquitaine, et tient une place importante à l'échelle nationale (DRAAF, 2019).

Les aléas climatiques survenus dans les Landes de Gascogne durant ces 100 dernières années ont cependant redessiné le massif et sa gestion : les grands incendies après la seconde guerre mondiale, plus récemment la tempête Martin de 1999 ; la tempête Klaus de 2009. 17% du volume sur pied avant tempête était touché dans les Landes en 1999, et 33% en 2009 (Colin *et al.*, 2010). La diminution du stock sur pied a entrainé une modification de la ressource disponible et des débouchés, notamment pour les bois moyens (15 – 30 cm de diamètre) (DRAAF, 2019). Ces évènements ont entrainé des réflexions autour de la pérennité des peuplements du massif, de la ressource et de la gestion des risques (Gip-Ecofor, 2009).

ii. Evolution de l'environnement forestier, de la demande du marché et développement de nouveaux itinéraires

En 1990, le développement du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental de travail sur l'évolution du Climat) a permis de mettre en évidence les causes et les effets des changements environnementaux, observés au cours des dernières décennies. Dans leurs différents rapports, l'anthropisation est le facteur majeur de l'augmentation atmosphérique en gaz à effet de serre, principale cause du changement climatique. L'augmentation des émissions de gaz à effets de serre résulte notamment de la combustion de ressources fossiles (charbon, pétrole et des gaz) pour la production d'énergie (électricité, transport, chaleur). Ces rapports ont aussi permis de valider les préoccupations relatives à l'évolution du climat : hausse des températures moyennes, augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2, modification des précipitations ou encore de la durée de la saison de végétation (GIEC, 1992, 2015). Toutes ces modifications influent directement sur l'évolution des écosystèmes forestiers. Le réchauffement des températures devrait stimuler la productivité potentielle du Pin maritime dans la moitié nord de la France, tout en la maintenant dans le sud, à moyen terme (2050) (Lousteau, 2001). De plus, sa croissance rapide, sa capacité à s'adapter sur des sols variés, et l'amélioration génétique constante, en font une essence intéressante dans ce contexte de changement climatique (ONERC, 2015).

De ces constats émis par le GIEC découle la volonté des politiques publiques de limiter l'utilisation des combustibles fossiles en développant l'utilisation de ressources renouvelables (solaire, géothermie, hydraulique, éolien et biomasse) comme matériau de substitution. Le BE (Bois énergie) appartient à la catégorie « biomasse » définie selon le Larousse en ligne comme « la partie biodégradable des déchets et résidus agricoles, industriels et ménagers, utilisable comme énergie ». Ce bois, à destination de la production d'énergie, provient de diverses origines : coproduits issus de la forêt (petits et menus bois d'éclaircies, coupes de taillis, rémanents* d'exploitation (branches et souches), coproduits des activités de transformation du bois (sciages, écorçage, rabotage), recyclage de bois en fin de vie (cagette, palettes, meubles..) ou entretiens de bocages. Le BE est donc principalement issu des différentes opérations sylvicoles et de transformations nécessaires à la production de BO et de BI (Bois d'industrie) (Ollivier, 2010; FBF and SER, 2019). La loi Grenelle adoptée par la France en 2010 avait pour objectif d'encadrer les politiques publiques en proposant la « mutation écologique du pays ». Un premier objectif était d'atteindre 23% d'EnR (Energie renouvelable) dans la consommation finale d'énergie, à l'horizon 2020 et donc de favoriser le développement de la filière EnR et l'utilisation de la biomasse, dont le BE (Lenoir *et al.*, 2008). Le développement du « fond chaleur », géré par l'ADEME (Agence de la transition écologique) en 2009, devait ainsi aider ce développement avec la mise en place de financement. En 2017, en France, les EnR représentaient 16.3% de la consommation d'énergie finale, 3.2% en dessous de la trajectoire fixée initialement. A cette même date, la part de biomasse énergie représentait plus de 55% de la consommation finale d'EnR, dont la majeure partie est issue du bois avec 39.6% (Baudry *et al.*, 2019).

Dans les Landes de Gascogne, le Pin maritime était l'une des essences les plus aptes pour répondre à ces enjeux. De nouveaux schémas sylvicoles, réservés aux landes les plus fertiles, ont été développés. Dans un massif déstabilisé par les dernières tempêtes, ces nouveaux schémas avaient pour but de limiter les effets de concurrence entre les nouveaux besoins de la filière en BE (développement de chaudières collectives et industrielles) et les besoins de la filière traditionnelle (BO/BI). Dès 2008, des essais de production de biomasse pour l'énergie (BE) sont menés par CAFSA (aujourd'hui AFB) pour le Pin maritime. Dans le même temps ont été publiés les premiers résultats d'expérimentations sur la mobilisation des branches et souches de Pin maritime pour le BE (AFOCEL, 2007; Emeyriat, 2019).

iii. Mise en place du programme CLIMAQ

Pour accompagner ces politiques et le développement de ces nouveaux itinéraires, le programme de recherche CLIMAQ (Changement climatique et adaptation des forêts d'Aquitaine) a été mené entre 2008 et 2014. Cofinancé par la Région Aquitaine, la DRAAF et l'Union Européenne, ce programme comprenait 5 partenaires : AFB, les ETF de Nouvelle-Aquitaine (anciennement Aquitaine), FCBA, INRAE (anciennement INRA), et le CRPF Nouvelle-Aquitaine (CRPF *et al.*, 2014). Ce projet visait plusieurs objectifs : recenser dans les réseaux existants des essences potentiellement adaptées (A), expérimenter de nouvelles essences/provenances adaptées au changement climatique (B), expérimenter et évaluer des cultures dédiées à la biomasse forestière* (C) communiquer, transférer des connaissances et développer un réseau de démonstration de peuplements dédiés à la biomasse (D). Une des tâches de l'objectif « C » était d'évaluer la faisabilité de production de biomasse à partir d'espèces à forte croissance juvénile : Robinier faux-acacia, Séquoia sempervirens et Pin maritime. Pour cette dernière, deux itinéraires, qui rejoignent les essais AFB, ont été testés :

- Les ***itinéraires SD (Semi-dédiés)*** destinés à la production de BE (50% minimum du peuplement initial) et de BO. Le BE est récolté à 9 ans, avec un objectif de 30 tonnes/ha à 40% d'humidité, puis le peuplement restant (peuplement principal) est conduit de la même manière que l'itinéraire BO standard (CRPF *et al.*, 2014).
- Les ***itinéraires D (Dédiés)*** destinés uniquement à la production de biomasse forestière (BE). Les densités initiales de plantation peuvent être plus ou moins fortes (1250 à 5000 tiges/ha). L'objectif de coupe rase* était fixé à 15 ans[1].

Différents sites expérimentaux, présentés en Tableau 1, ont ainsi été mis en place dans le cadre de CLIMAQ (C). Le CNPF, FCBA et INRAE se sont répartis leur mise en place :

Tableau 1 : Sites expérimentaux installés dans le cadre de la tâche C3.2 du programme CLIMAQ, pour le Pin maritime. Sont indiqués les sites pour lesquels les mesures sont disponibles pour cette étude

Organisme en charge	Sites	Année mise en place	Age en 01/2020	Semi-dédié	Dédié par plantation	Dédié par semis	Mesure dispo.
FCBA	Hourtin (33)	04/2010	10 ans	X	X	X	X
CRPF	Retjons (33)	03/2011	9 ans	X	X	X	
INRAE	Cestas (33)	11/2011	8 ans		X		X
CRPF	Les Lèches (33)	05/2012	8 ans		X		
CPRF	Parentis (33)	06/2012	8 ans		X		
FCBA	Houeilles (33)	12/2012	7 ans		X		
INRAE	Luglon (40)	01/2013	7 ans		X		X

Ces expérimentations avaient pour but d'apporter des informations sur la rentabilité et la viabilité de ces itinéraires, pour répondre à l'augmentation de la demande en BE, dans un milieu où la ressource est déjà largement consommée :

A) En premier lieu, l'objectif était d'évaluer l'effet de la maximisation de la production de biomasse et donc de l'augmentation de la densité sur le développement de ces peuplements.

B) En second lieu, l'objectif était d'évaluer quel schéma de plantation (espacement entre les lignes, distance sur la ligne) permettrait la meilleure production, et le meilleur résultat économique en prenant en compte les différentes contraintes techniques (lors de l'installation, de l'entretien) et la croissance et qualité des arbres au sein du peuplement. Pour évaluer la rentabilité des itinéraires SD, l'objectif était de comparer l'évolution du peuplement restant,

[1] Il s'agit de dispositifs expérimentaux. Actuellement, les SRGS n'autorisent pas de coupe rase avant 20 ans pour le Pin maritime, sauf accord du conseil de centre du CRPF (CRPF, 2005).

après la coupe BE, par rapport à un peuplement témoin n'ayant pas eu d'ajout de lignes biomasses, et donc suivant un itinéraire BO standard à 1250 tiges/ha.

Au vu des résultats de plantation et de reprise parus dans le rapport CLIMAQ de 2014, pour les différentes essences et itinéraires testés, le Pin maritime en SD semblait être le plus adapté en Aquitaine, pour développer la production de biomasse (CRPF *et al.*, 2014). Le programme CLIMAQ s'est arrêté en 2014. Le GIS Groupe Pin maritime du Futur[2] (GPMF) a intégré dans ses programmes FORTIUS et PINASTER le suivi des expérimentations mises en place et l'installation de nouveaux sites de démonstration de ces itinéraires sylvicoles.

iv. Perceptions et comportements des acteurs de la filière vis-à-vis des scénarios semi-dédiés (SD) et dédiés (D) en Nouvelle-Aquitaine en 2020

Dix ans après le développement de ces nouveaux itinéraires, les contextes politique, économique et technique ont évolué, amenant à des questionnements plus précis sur ces itinéraires sylvicoles. Pendant cette étude, des acteurs de la filière directement concernés par ces itinéraires ont été contactés et des entretiens semi-directifs ont été menés afin de bien comprendre la place actuelle de ces scénarios, les questions qui se posent, ainsi que le lien entre les différents acteurs de cette filière bois-énergie. Entre mai et juillet 2020, des entretiens avec trente et un propriétaires, gestionnaires, conseillers, entrepreneurs ou industriels de la filière forêt-bois ont été réalisés. La méthodologie des entretiens est présentée en Annexe i. Les itinéraires SD ont été mis en place à la fois pour l'expérimentation et la gestion[3]. En revanche, les itinéraires D pour l'énergie, sauf exception, n'ont été installés que pour de l'expérimentation. Les propriétaires contactés disposant de peuplements dits « dédiés » possèdent ou possédaient des peuplements mis sous contrat 15 ans après la plantation pour une coupe rase à 20-25 ans, pour un autre débouché que le BE seul. Les résultats présentés ci-dessous attribués aux peuplements D pour l'énergie (sans contrat initial, sans éclaircie, avec des densités de plantation entre 1250 et 5000 tiges/ha) se basent alors sur la perception actuelle de ces itinéraires par les acteurs questionnés, au vu de leur vécu et de leurs connaissances.

Les opinions émises spontanément par les acteurs sont synthétisées et identifiées entre parenthèse (en noir pour les propriétaires, conseillers et gestionnaires, en rouge pour les ETF et utilisateurs). Ces opinions sont organisées comme dans une analyse SWOT (forces et opportunités, faiblesses et menaces). Trois grands thèmes se sont distingués dans le groupe « faiblesses et menaces » : sylvicoles (Tableau 2), économiques (Tableau 3) et environnementales et politiques (Tableau 4). Dans chaque thème, les points de vue sont regroupés par grandes catégories :

Tableau 2 : Faiblesses sylvicoles émises par les acteurs lors des entretiens

I/ Faiblesses sylvicoles	SD	D
I.1/ Augmentation des risques et de la vulnérabilité des peuplements	**X**	**X**
• Incendie lié à la densité et à l'impossibilité d'entretenir le sous-bois dans le jeune âge (si interlignes < 4m) (3)	X	X
• Prise au vent due à une augmentation plus forte de la masse foliaire post-éclaircie (2)	X	
• Dégâts possibles sur les tiges restantes selon le schéma, lors da coupe BE dans les SD (1)	X	
• Stress hydrique qui peut entrainer des retards de croissance et des risques sanitaires (1)		X
• Appauvrissement de sols déjà pauvres par l'exportation de toute la biomasse aérienne (3)		X
• **Pas de réversibilité* de ces itinéraires (11)**		X

[2] Ce groupement d'intérêt scientifique comprend INRAE, FCBA, CPFA, CRPF Nouvelle-Aquitaine. Il coordonne et mène des travaux de R&D sur la gestion des forêts cultivées des Landes de Gascogne.

[3] Entre 2009 et 2011, 2 377 ha de peuplements SD ont été installés par AFB en contrat avec la SOVEN (CRPF *et al.*, 2014). Les énergéticiens payaient le surcoût de plantation des lignes biomasses. Une aide de 100 €/ha était donnée au propriétaire par le Conseil Régional d'Aquitaine pour le reboisement de peuplement forte densité.

I/ Faiblesses sylvicoles (suite)	SD	D
I.2/ Augmentation des contraintes sylvicoles	**X**	**X**
• **Débroussaillement manuel des interlignes < 3 m (6+1)**	X	X
• Choix de l'emplacement de ces peuplements (stations très fertiles) (3)	X	X
• Station pas assez fertile dans les Landes pour ce type de production (1)	X	X
• **Augmentation du travail à l'installation (5)**	X	X
• Remise en état du terrain après coupe rase (souches nombreuses à faible volume) (2+2)		X
• Tiges dans les peuplements avec des dimensions plus hétérogènes (1)	X	X
• **Manque d'informations techniques sur ces peuplements et leur évolution (5)**	X	X

On constate des faiblesses sylvicoles similaires pour les D et SD quant à l'augmentation des contraintes sylvicoles ; en revanche il existe des distinctions pour les risques et les vulnérabilités.

Tableau 3 : Faiblesses et menaces économiques émises par les acteurs lors des entretiens

II/Faiblesses et menaces économiques	SD	D
II.1/ Perte de rentabilité par rapport à l'itinéraire BO standard (production, qualité)	**X**	**X**
• **Surcoût d'installation (si aucun contrat) (6+1)**	X	
• **Retard de croissance significatif du peuplement final (7)**	X	
• Défauts de forme plus nombreux (2) (courbure basale, écart à la verticalité)	X	
• Pin maritime peu adapté aux fortes densités (1)		X
• **Pas de rentabilité donc d'intérêt aujourd'hui, ni d'avenir pour ces itinéraires (10+3)**	X	X
II.2/ Inadéquation entre biomasse juvénile récoltée et cahier des charges industriel	**X**	
• Taux d'humidité trop important (3),	X	
• Risque sanitaire trop élevé (scolyte) pour effectuer un temps de ressuyage* des piles (3)	X	
• **Tonnage non suffisant (différence tonnage boisé et cadastral) (4+3)**	X	
• Taux de chlore trop important dans les aiguilles (corrosif pour la chaudière) (1)	X	
II.3/ Difficulté de compréhension de l'unité d'achat entre les acteurs	**X**	**X**
• Difficulté de compréhension de l'unité d'achat du bois énergie : utilisation de la tonne pour les petits bois par les forestiers là où les énergéticiens utilisent le kWh PCI* (2)	X	X
II.4/ Incertitude du marché du BE pour le Pin maritime	**X**	**X**
• Différentes citations : trop dépendant du marché et de l'offre (3), marché non stable et dépendant des températures hivernales (2), difficile de voir le marché de la biomasse (2), marché qui n'a pas évolué comme escompté (1), déjà assez de ressources et arrivées des premières éclaircies post tempête (3+2), localisation des chaudières (2+2)	X	X
• **Désengagement des industriels lors de contrats passés qui entraine un retard d'exploitation et un manque de maitrise de son peuplement par le propriétaire (6)**	X	
II.5/ Concurrence avec les autres énergies : renouvelables et fossiles (2+5)	**X**	**X**
• Compétition constante entre les différentes sources d'EnR, utilisation des souches pour le Pin maritime qui ne concurrencent pas la ressource, utilisation d'autres essences plus adaptées pour la production de BE, obligation de recyclage bois fin de vie (2+1)		X
• Compétition constante avec les énergies fossiles (1) : prix du gaz négatif ; développement du gaz de schiste	X	X

Un plus grand nombre de faiblesses économiques semble perçues sur les SD. Ces peuplements sont plus facilement comparés économiquement à un itinéraire BO standard. De plus, les acteurs contactés disposent maintenant d'informations sur la récolte biomasse des SD par rapport aux D. Cependant, l'incertitude du débouché BE pour le Pin maritime est commune aux ces deux itinéraires (SD et D).

Tableau 4 : Faiblesses et menaces environnementales et politiques émises par les acteurs lors des entretiens

III/ Faiblesses et menaces environnementales et politiques	SD	D
III.1/ Désaccord du grand public envers les coupes rases		**X**
• Image négative de la coupe rase accentuée par ces itinéraires « Coupe rase à 15 ans » (1)		X
III.2/ Bilan carbone problématique	**X**	**X**
• Durée de vie du produit BE inférieure au BO (2+2) • Libération plus grande de carbone suite au labour plus fréquent en courte révolution* (1+1)	X	X X
III.3/ Des politiques publiques changeantes, moins tournées vers le bois énergie	**X**	**X**
• Arrêt des financements pour la cogénération, le développement du plan hydrogène (3) soit la priorisation d'autres ressources renouvelables pour l'énergie (1) • Modification des priorités dans les débouchés de la filière forêt-bois (matériau de substitution au plastique, bois pour la chimie verte, bois dans la construction, plutôt que dans l'énergie) (1)	X	X

De manière générale, bien que peu de faiblesses et menaces environnementales et politiques soient perçues par les acteurs pour les itinéraires SD et D, la remise en cause du bois énergie produit par ces itinéraires particuliers est bien présente.

Enfin, quelques forces et opportunités ont pu être citées en Tableau 5 :

Tableau 5 : Forces et opportunités émises par les acteurs lors des entretiens

Forces et opportunités	
SD	**Dédié sans contrat et sans éclaircie**
• **Maximisation de la biomasse générée sur le temps d'une révolution** (2)	• **Débouché pour le bois des coupes rases de peuplements mal venants ou en impasse sylvicole** : dans le cas de semis mal dépressé, de retard de 1ère éclaircie, de peuplements fortement touchés par des dégâts (gibier, fomes) (4) • **Solution de rééquilibrage des classes d'âges par exploitation anticipée de peuplements sur une propriété fortement touchée par un évènement exceptionnel (tempête, incendie)**
• Mise en place de **relais de production post-tempête** (avec ou sans éclaircies pour le dédié) (2) • Surdensité dans la ligne favorise la rectitude des arbres (2)	

Force est de constater que peu de forces et d'opportunités ont été énoncées pour ces itinéraires lors des différents entretiens, reflet de la perception négative par les différents acteurs de la filière en 2020. Notre synthèse vient conforter la publication de Brahic et Deuffic (2017) sur le comportement des propriétaires landais vis-à-vis du bois énergie analysé entre 2013 et 2015. Finalement, notre enquête permet de confirmer la nécessité de répondre aux questions posées il y a 10 ans, lors de la mise en place des expérimentations du programme CLIMAQ.

v. Littérature et hypothèses de travail

A l'aide des Tableau 2 et 3, ainsi que d'une présentation de Meredieu *et al.* (2019) lors d'un colloque sur la plantation, on constate que le choix de développer ces itinéraires SD et D en augmentant la densité de plantation joue directement sur les facteurs de compétition au sein du peuplement et sur : 1) la qualité et la croissance en hauteur et circonférence, 2) la mortalité, 3) la sensibilité des peuplements aux perturbations biotiques (sanitaire) et abiotiques (vent, incendie, sécheresse) et 4) la rentabilité de ces peuplements. Cela joue aussi sur 5) la biodiversité au sein du peuplement, ainsi que sur 6) la relation du grand public avec le milieu forestier (paysage, loisir, acceptabilité des interventions sylvicoles) comme on peut le voir en Tableau 4.

Notre étude se consacre à la mesure de l'impact de la surdensité et des différents schémas sur la croissance (1) et la mortalité (2) ainsi qu'à la rentabilité pour le propriétaire (4). Très peu de publications concernent l'effet du schéma de plantation sur la croissance et la

mortalité. En revanche de nombreuses études ont démontré les conséquences de la compétition entre individus induite par l'augmentation de la densité dans les peuplements.

1) L'augmentation de la densité influe **négativement sur la croissance en circonférence** à 1m30 pour les pins : Pin gris (*Pinus banksiana*) – 1111 à 4444 tiges/ha (Hébert *et al.*, 2016) ; Pin d'Elliott (*Pinus elliottii*), Pin taeda (*Pinus taeda*) - < 400 à < 800 tiges/ha (Lee and Lenhart, 1998), Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) – 800 à 5000 tiges/ha (Vila, Vennetier and Nicault, 2001), mais aussi pour des feuillus comme l'Erable d'asie (*Acer velutinum*) – 2500 à 10000 tiges/ha (Naji *et al.*, 2016) ou le Platane occidental (*Platanus occidentalis* L.) – 1250 à 10 000 tiges/ha (Domec *et al.*, 2017). Plus précisément pour le Pin maritime (*Pinus pinaster*), l'augmentation de l'espacement entre les tiges influe positivement sur la croissance en circonférence, car les effets de concurrence diminuent (Illy and Lemoine, 1970; Lemoine and Sartolou, 1980) :

- 0 à 1.16 m : concurrence pour la lumière, l'alimentation en eau et en élément nutritif
- 1,16m à 3,59m : concurrence pour l'alimentation en eau et en élément nutritif
- 3,59m et plus : absence de concurrence

En revanche, de manière générale, la densité **n'influe pas sur la croissance en hauteur** : Pin sylvestre – 800 à 5000 tiges/ha (Salminen and Varmola, 1993) ; Pin taeda (Lee and Lenhart, 1998)). Il en est de même chez les feuillus comme l'Erable d'asie – 2500 à 10000 tiges/ha (Naji *et al.*, 2016) . Dans certaines études, la densité et l'espacement ont influencé la croissance en hauteurs au cours de certaines périodes et pour certaines densités : Pin taeda et le Pin d'Elliott en permettant d'obtenir des hauteurs supérieures dans des peuplements à plus faible densité dans le jeune âge, mais cet effet disparait avec le temps (Lee and Lenhart, 1998) ; Pin maritime, la diminution de l'espacement peu avoir un faible effet négatif ou positif sur la croissance en hauteur, entre 0 et 10 ans, cet effet pouvant varier selon les années (Illy and Lemoine, 1970; Lemoine and Sartolou, 1980) ; Pin sylvestre - un effet positif de la concurrence des voisins immédiat sur la hauteur entre des seuils de densité (effet positif sur la hauteur à partir d'un seuil minimal de densité, effet négatif sur la hauteur à partir d'un seuil maximal de densité) (Vila 2001). La concurrence pour la lumière et/ou le sol sont les principaux facteurs énoncés dans ces études.

2) L'augmentation de la densité de plantation **accroit la mortalité** lorsque les densités de tiges sont supérieures à un certain seuil : Pin sylvestre - pas d'effet entre 800 et 5000 tiges/ha à 14 ans (Salminen et al. 1993) ; Pin maritime - effet de la densité de plantation sur la mortalité à partir de 20 611 tiges/ha à 10 ans (Lemoine et al 1980).

4) Peu d'études publiées sur la production de biomasse du Pin maritime et la **rentabilité** ont été réalisées comme le montre la synthèse bibliographique effectuée par Berthelot *et al.* (2014). L'étude économique de Rakotoarison *et al* (2015) sur ces itinéraires SD et D pour un débouché BE /BI montre des résultats économiques proches de l'itinéraire BO standard.

Au regard des résultats de la littérature, des deux principales questions (**A**) et (**B**) émises lors de la mise en place de CLIMAQ, et des renseignements obtenus lors des différents entretiens, quatre axes de travails ont été suivis :

A-1) Comment l'augmentation de la densité influe sur la mortalité et la croissance de ces jeunes peuplements semi-dédiés et dédiés ? *On suppose que la densité n'influence pas le taux de mortalité. En revanche, on suppose un effet négatif de la densité sur la circonférence et le volume unitaire, un effet négligeable sur la hauteur, un effet positif sur l'élancement et la surface terrière.*

A-2) Dans les semi-dédiés, quel est l'impact de l'ajout d'une production biomasse sur la croissance du peuplement principal à 9 ans ? *Les mêmes hypothèses que pour la question A-1) peuvent être émises. Un retard de croissance sur le peuplement principal des*

semi-dédiés par rapport au témoin devrait être rencontré pour la circonférence et le volume unitaire.

B-1) Dans les semi-dédiés : comment le schéma de plantation (simple ou double ligne, densité dans la ligne) de la ligne biomasse agit sur la croissance du peuplement principal ? *La densité dans le peuplement biomasse devrait être le seul facteur qui influe sur la circonférence, le volume unitaire et l'élancement comme indiqué précédemment. L'augmentation de la densité dans le peuplement biomasse devrait corroborer les hypothèses émises en A). L'espacement entre les lignes ne devrait pas avoir d'effet sur la croissance des tiges.*

B-2) Quelle est la rentabilité et la viabilité économique de ces schémas semi-dédiés et dédiés ? *Le retard de croissance sur le peuplement principal devrait allonger les durées de révolution et donc diminuer la rentabilité des semi-dédiés par rapport à l'itinéraire bois d'œuvre standard. Les peuplements dédiés à l'énergie devraient être moins rentables que les semi-dédiés, ayant pour seul débouché le bois énergie.*

II. Matériel et méthode

i. Présentation des sites d'études et des données disponibles

Cette étude se consacre aux peuplements de Pin maritime menés en SD (BE/BO) et D (BE). Le site expérimental d'Hourtin est le dispositif le plus complet. Les dispositifs de Luglon et de Cestas (Tableau 1) viennent en appui aux résultats de l'étude d'Hourtin.

a. Présentation du site principal de l'étude : Hourtin

Le site expérimental de Hourtin (33) a été installé en avril 2010, dans le cadre du projet CLIMAQ (FCBA, organisme responsable). La station est une lande humide. Différents travaux d'installation ont été effectués : débroussaillement, fertilisation, labour en plein et reprise au rouleau débroussailleur. Plusieurs modalités de plantation et semis de Pin maritime sont testées, avec une répétition à chaque fois. La plantation de plants VF2, en multipots ajourés 100 cm^3, a été réalisée en juin 2009 au tube à planter sans piquetage préalable de l'emplacement des plants. Un semis direct a été réalisé avec des graines PPA-301-08-03. La surface des placettes unitaires est de 48m x 52m, soit 0,2496 ha.

Dans le cas des modalités SD, l'objectif est de trouver le meilleur agencement pour la production de biomasse et pour la croissance et qualité du peuplement principal. Le peuplement principal présente deux motifs : 4x2m soit 1250 tiges/ha (schéma de plantation pour un objectif BO standard) ou 6x2m soit 833 tiges/ha. L'agencement du peuplement biomasse varie. Différentes modalités ont été installées : i) En simple ligne (S), c'est-à-dire plantation de la ligne biomasse à égale distance des lignes de plantation du peuplement principal, afin d'avoir une optimisation de l'espacement des tiges. Par contre, l'étroitesse des interlignes ne permet pas la réalisation d'entretiens mécaniques. ii) En doubles lignes (D), c'est-à-dire plantation de la ligne biomasse à faible distance des lignes du peuplement principal, pour faciliter l'entretien des interlignes. Cependant la mise en place de doubles lignes peut impacter la verticalité des tiges (essence héliophile). iii) En triples lignes (T), c'est-à-dire la plantation de deux lignes de biomasse de part et d'autre d'une ligne sur deux du peuplement principal. Cette dernière modalité permettrait un plus faible impact sur la verticalité des tiges et un maintien des entretiens des interlignes.

Dans le cas des dédiés, quatre modalités par plantation avec les mêmes objectifs d'optimisation de la répartition dans l'espace et d'entretien des interlignes ont été testées, ainsi que deux modalités par semis en ligne (interligne à 2 ou 4m) afin de diminuer le coût de plantation.

Au final, six modalités SD et six modalités D ont été mises en place et sont résumées en Tableau 6. Les modalités par plantation sont représentées en Annexe ii. Le témoin utilisé par la suite, itinéraire BO standard à 1250 tiges/ha, est dénommé T-4x2-1250/CD1 :

Tableau 6 : Présentation des modalités mises en place sur le site principal de l'étude : Hourtin

Modalité		Organisation des lignes	Peuplement principal		Peuplement biomasse		Densité totale théorique
			Densité	Schéma	Densité	Schéma	
SD-S-2500	SD1	Simple	1250	4x2m	2500	4x1m	3750
SD-S-1250	SD2	Simple	1250	4x2m	1250	4x2m	2500
SD-D-2500	SD3	Double	1250	4x2m	2500	4x1m	3750
SD-D-1250	SD4	Double	1250	4x2m	1250	4x2m	2500
SD-T-1250	SD5	Triple	1250	4x2m	1250	(2-6)x2m	2500
SD-S-1666	SD6	Simple	833	6x2m	1667	(2-4)x2m	2500
T-4x2-1250	CD1/Témoin	Simple	1250	4x2m			1250
D-2x2-2500	CD2	Simple	/	/	2500	2x2m	2500
D-4x1-2500	CD3	Simple	/	/	2500	4x1m	2500
D-2x1-5000	CD4	Simple	/	/	5000	2x1m	5000
D_2xSemis	Semis_2	/	/	/	/	Interligne 2m	
D_4xSemis	Semis_4	/	/	/	/	Interligne 4m	

Le nom des modalités se lit : SD (semi-dédié), D (dédié) ou T (témoin). Pour les SD, on ajoute une lettre : S (simple), D (double) ou T (triple) pour signifier le type de ligne du motif ; puis la densité de plantation du peuplement biomasse. Pour le D, on ajoute le motif et la densité totale pour ceux régénérés par plantation.

Un premier inventaire des circonférences à 1.30 m de tous les arbres vivants a été réalisé en mai-juin 2019 (9 ans/ au cours de la 10ième année de croissance) par le FCBA sur des placettes de mesures de taille variable (entre 240 et 960 m², Annexe iii). Les hauteurs ont été mesurées sur les arbres de deux lignes : une ligne biomasse et une ligne du peuplement principal de chaque placette de mesure. Selon la taille de la placette de mesure, et donc des modalités et répétitions, on dispose entre 15 et 55% de couples hauteur/circonférence, par rapport au nombre de circonférences disponibles. A l'occasion de cette première mesure, les densités réelles ont été estimées et pouvaient varier entre 1 et 19% par rapport à la densité théorique de plantation, résultats en Annexe iii. En l'absence de mesure du taux de reprise 1 ou 2 années après l'installation, nous faisons l'hypothèse que la plantation sans piquetage préalable de l'emplacement des plants pourrait être à l'origine de ces différences.

Des mesures de biomasses ont été réalisées en janvier 2020 par le FCBA. Trente arbres ont été abattus, mesurés (hauteurs, circonférences) et pesés (terrain et laboratoire) dans les modalités SD1 à SD4 de la répétition 1. Le protocole de mesure est disponible en Annexe iv.

A l'installation du dispositif, l'exploitation des lignes biomasses des peuplements SD devait être réalisée pendant l'hiver 2018-2019, c'est-à-dire à 9 ans. Suite à des imprévus, les lignes biomasses des peuplements SD n'ont toujours pas été exploitées.

b. Présentation des sites secondaires de l'étude : Luglon et Cestas

Le site expérimental de Cestas (33) a été installé en novembre 2011, et celui de Luglon (40) en janvier 2013. Ces sites sont en lande mésophile. Différents travaux d'installation ont été effectués : dessouchage et broyage (Cestas), débroussaillement, fertilisation, labour en plein et reprise au rouleau débroussailleur. La plantation de plants VF2 en godets 110cm^3 d'un an a été réalisée à la canne, avec la matérialisation au préalable de l'emplacement des plants. Quatre modalités de cultures dédiées de Pin maritime par plantation sont testées sur ces sites avec une répétition pour chaque modalité. Les placettes unitaires sont de 45m x 54m, soit 0,2430 ha. Les différentes modalités sont présentées en Tableau 7, et schématiquement en Annexe ii.

Tableau 7 : Présentation des modalités mises en place sur les sites secondaires de l'étude : Luglon et Cestas

Modalité		Peuplement biomasse		Densité totale théorique
		Densité réelle	Schéma	
T-4,5x1,8-1250	CD1/Témoin	1250	4,5x1,8m	1250
D-4,5x0,9-2500	CD2	2500	4,5x0,9m	2500
D-2,25x1,8-2500	CD3	2500	2,25x1,8m	2500
D-2,25x0,9-5000	CD4	5000	2,25x0,9m	5000

Plusieurs campagnes de mesures ont été réalisées conformément au protocole :
- Mesure de toutes les hauteurs à 3 ans (Luglon), 5 ans et 7 ans
- Mesure de toutes les circonférences à 5 ans et 7 ans

Les densités de plantation ont respecté les densités théoriques (Tableau 7), grâce à la matérialisation de l'emplacement des plants. Par la suite, de plus faibles dégâts de cervidés, et donc des plus faibles taux de mortalité (Annexe v), ont permis d'être au plus proche des densités théoriques. Ces sites sont utilisés pour mettre en perspective les résultats d'Hourtin.

ii. Méthodologie appliquée pour l'analyse des données

a. Prétraitement des données du site Hourtin

Le Vu de chaque tige est obtenu après différentes étapes :

1) Une hauteur pour chaque arbre est estimée après ajustement des courbes de régression (Hauteur=f(Circonférence)) par modalité, répétition et type de peuplement (principal, biomasse). Ces modèles sont appliqués aux arbres mesurés uniquement en circonférence.

2) Le Vu est estimé sur les arbres abattus, avec la formule du cône tronqué[4] pour chaque tronçon, et la formule du cône[3] pour le volume de la cime (protocole biomasse, Annexe iv).

3) Le Vu peut aussi s'exprimer avec la formule de Vallet *et al* (2006) : Vu=f*h*g avec f le coefficient de forme, h la hauteur et g la surface terrière[5]. La relation entre le coefficient de forme et la circonférence des arbres mesurés est alors ajustée à l'aide des courbes de régression. Grâce à une hauteur et un coefficient de forme ajustés à chaque arbre, le Vu de toutes les tiges du dispositif Hourtin mesurées en circonférence peut être estimé. Aucune mesure de volume n'ayant été réalisée sur Luglon et Cestas, le Vu n'a pas été estimé sur ces sites plus jeunes.

La biomasse disponible est obtenue à partir des mesures terrains et des pesées des prélèvements réalisés dans les modalités SD1 à SD4, répétition 1 :

1) Pour obtenir la biomasse anhydre* (sèche) de chaque arbre, le taux d'humidité[6] est estimé à partir des pesées des échantillons prélevés, avant et après séchage en laboratoire, pour les différents compartiments (branches mortes, vivante et tronc) et modalités.

2) La biomasse totale brute* est estimée à partir des pesées terrain des 30 arbres abattus. De la même manière, la relation est estimée entre la biomasse et la circonférence à partir des courbes de régression, puis appliquée à chaque arbre des peuplements biomasse mesuré en circonférence par modalités. Pour les modalités SD-T-1250 et SD-S-1666, aucun arbre n'a été mesuré pour estimer la biomasse. La relation obtenue pour la modalité SD-S-1250 a été appliquée à la modalité SD-S-1666, et la modalité du SD-D-1250 à la modalité SD-T-1250 en raison de leur schéma d'installation (Annexe ii).

[4] $Volume\ du\ cône\ tronqué\ (m^3): V = \frac{\pi * h}{3} * (r_1^2 + r_1 * r_2 + r_2^2)$ | $Volume\ du\ cône\ (m^3) : V = \frac{\pi * h * r^2}{3}$)

[5] $Surface\ terrière\ :\ g = \frac{circonférence\ à\ 1m30\ ^2}{4 * \pi}$

[6] $Taux\ d'humidité\ (\%) = \frac{Masse\ avant\ séchage\ (brute) - Masse\ après\ séchage(sèche)}{Masse\ avant\ séchage\ (brute)}$

Afin d'analyser la distribution des effectifs, les circonférences sont divisées en quatre classes. Le diamètre 7.5 cm, qui correspond au diamètre minimum de la catégorie « petit bois » de l'IFN, est utilisé comme limite d'une des classes.

b. Tests statistiques, scénarios de croissance et témoins des analyses

Différents tests statistiques sont réalisés avec le logiciel R-studio pour répondre aux questions **A** et **B-1)** pour les paramètres circonférence, hauteur, Vu, élancement et surface terrière. Les tests paramétriques sont utilisés lorsque la normalité et l'homoscédasticité sont validées, sinon, lorsque la transformation des données n'est pas possible, des tests non paramétriques sont appliqués. Un seuil de risque d'erreur de 5% est défini pour nos hypothèses. Une p.value inférieure à 5% implique un rejet de l'hypothèse H_0.

1) Le test de signification du coefficient de corrélation de Spearman (non paramétrique) permet de mettre en évidence des niveaux de concordance et de définir des relations ou non de monotonies entre deux variables. Il est utilisé pour **A-1**) ***Evaluer l'effet de la densité sur la croissance des peuplements entiers***, des itinéraires SD (Hourtin) et D (Hourtin, Cestas et Luglon). Deux résultats sont à analyser pour ce test :

- Hypothèse H_0 : les résultats ne sont dus qu'au hasard, il n'y a pas de relation entre les variables x et y
- Le résultat de la corrélation de Spearman (rho) : rho<0, la relation entre les variables x et y est inversement proportionnelle (si x augmente, y diminue), rho >0, la relation est proportionnelle (si x augmente, y augmente). La relation est : faible [0 ; 0.2] ; moyenne]0.2 ; 0.5] ; forte]0.5 ;0.8] ; très forte]0.8 ;1].

2) Le test de proportionnalité permet de valider ou non l'hypothèse H_0 d'homogénéité de distribution des effectifs entre deux groupes. Il est utilisé pour évaluer ***A-2) l'effet de l'ajout d'une ligne biomasse sur la croissance du peuplement principal,*** sur la distribution des effectifs dans les classes de diamètre. Les deux répétitions de la modalité T-4x2-1250, plantée en 4x2m, qui n'a pas de lignes biomasses sont utilisées comme témoins. Elles correspondent au peuplement principal des modalités SD, planté en 4x2m, soit à 1250 tiges/ha, sur Hourtin.

3) Les tests de Kuskal Wallis (non paramétrique) ou l'Anova (paramétrique) permettent de vérifier l'hypothèse H_0 d'égalité des moyennes de plus de deux groupes d'échantillons. Ils sont utilisés pour évaluer ***A-2) l'effet de l'ajout d'une ligne biomasse sur la croissance du peuplement principal***. Lorsque l'on montre des différences entre les moyennes des groupes au seuil de 5%, le test post-Hoc de Dunnett est utilisé pour comparer la moyenne de chaque groupe d'intérêt avec le groupe témoin (T-4x2-1250).

Le ***retard de croissance,*** estimé en nombre d'années, du peuplement principal des SD par rapport au moins bon témoin est estimé selon deux scénarios :

Scénario 1 : la coupe des lignes biomasses à 9 ans n'a pas lieu. Après 9 ans, un accroissement linéaire optimal, qui se base sur l'accroissement des 9 premières années du peuplement principal des SD est utilisé (ex : une hauteur moyenne de 4.82 m à 9 ans indique un accroissement après 9 ans de 0.54 m/an).

Scénario 2 : la coupe biomasse est réalisée à 9 ans. La réaction de croissance du peuplement principal après coupe du BE n'est pas connue. L'accroissement du peuplement principal est alors estimé à partir de résultats d'un peuplement SD référence situé sur Sabres, en lande sèche, installé en double ligne à 2500 tiges/ha. Les gains d'accroissements[7] obtenus 3 ans après coupe BE sur Sabres sont appliqués à nos peuplements.

[7] Gain d'accroissement après coupe BE : $\frac{(\text{accroissement annuel après coupe BE} - \text{accroissement annuel avant coupe BE})}{\text{accroissement annuel avant coupe BE}}$

4) Les tests de Student (paramétrique) ou de Wilcoxon (non paramétrique) permettent de vérifier l'hypothèse H_0 d'égalité des moyennes de deux groupes d'échantillons. Ils sont utilisés pour évaluer ***B-1) l'effet du schéma sur la croissance du peuplement principal.*** Les modalités avec les mêmes densités dans le peuplement principal, et les mêmes « écarts entre la ligne principale et la ligne biomasse » sont comparées pour évaluer ***l'effet de l'augmentation de la densité dans la ligne biomasse (a).*** Les modalités avec les mêmes densités dans le peuplement principal et biomasse, mais avec des « écarts entre la ligne principale et la ligne biomasse » différents sont comparées pour évaluer ***l'effet de l'espacement entre la ligne biomasse et la ligne du peuplement principal (b).*** Les modalités avec des densités actuelles trop éloignées des densités théoriques d'installation sont écartées pour ces comparaisons.

Les analyses 3 et 4 sont réalisées pour le peuplement principal et le peuplement dit « final ». Le peuplement final est défini à partir des 300 plus grosses tiges/ha (en circonférence), mesurées à 9 ans dans le peuplement principal. Cela correspond aux tiges qui seraient conservées jusqu'à la coupe finale pour une production de BO.

iii. Méthodologie appliquée pour l'analyse économique sur Hourtin

L'analyse économique est réalisée sur les données d'Hourtin. Il est difficile d'estimer la mortalité à venir dans les peuplements D issus de semis et donc de réaliser des simulations correctes de production. De la même manière, les peuplements de Luglon et Cestas sont encore trop jeunes pour permettre des initialisations et réaliser des simulations correctes. Différentes analyses sont réalisées pour répondre à nos hypothèses économiques ***B-2) sur la rentabilité et la viabilité de ces itinéraires SD et D par plantation :***

a) Dans les SD, le ***prix minimum d'achat du BE pour compenser le surcoût de plantation*** des lignes biomasses est estimé. Dans ce cas, seuls les coûts d'achat des plants, de leur mise en place, et le revenu procuré par la biomasse à 9 ans sont pris en compte.

b) La ***rentabilité économique des scénarios D et SD*** à l'échelle d'une révolution est estimée. Les résultats économiques sont comparés à l'aide d'indicateurs. De plus, les résultats des scénarios SD sont comparés au témoin (itinéraire BO standard) et le prix de vente minimum du BE pour atteindre la rentabilité du témoin est estimé. De la même manière, le prix minimum de vente du BE pour compenser les coûts du scénario sylvicole des itinéraires D est estimé. Enfin, lorsque les dimensions en diamètres le permettent, la rentabilité économique des scénarios D est analysée pour un débouché BI voire BO.

Afin de réaliser cette étude économique, différentes informations sont nécessaires : biomasse disponible à 9 ans, volume, Vu espéré lors des coupes (éclaircies et coupe rase), âge de coupe, prix de vente du bois et coût des travaux réalisés pendant la révolution.

a. Hypothèses sylvicoles, volumes disponibles et interventions sylvicoles

Dans les peuplements SD : 1) Le choix des dates d'éclaircies et leur intensité est piloté par la norme de décision de Maugé de 1987 (densité/circonférence), disponible en Annexe vi. Aujourd'hui, les sylviculteurs sont incités par le CRPF Nouvelle-Aquitaine à utiliser cette norme pour prendre leur décision de coupe partielle : il semble donc pertinent d'utiliser le même schéma pour notre étude. 2) Un débroussaillement est réalisé avant chaque éclaircie dans les scénarios. Le débroussaillement est indispensable, tant pour diminuer le risque incendie, que pour favoriser la croissance des jeunes peuplements (Trichet *et al.*, 2019).

- ⇨ Deux scénarios, avec ou sans débroussaillement à 2 ans, sont évalués afin de mesurer l'impact économique de cet ajout, sans toutefois tenir compte de l'effet positif de cet entretien sur la croissance, aucun débroussaillement n'ayant été fait sur Hourtin à 2 ans.

Dans les peuplements D d'Hourtin : 1) aucune éclaircie n'est réalisée, 2) un débroussaillement est réalisé à 9 ans et 15 ans, 3) la récolte finale est réalisée à 15 ou 20 ans.

⇨ Quatre scénarios sylvicoles sont testés : récolte à 15 ans ou à 20 ans, récolte avec ou sans débroussaillement à 2 ans.

Afin de connaitre les volumes, Vu et âge de coupe, la croissance des peuplements est simulée grâce à la plateforme de simulation de la croissance en forêt Capsis (Meredieu *et al.*, 2009), et du modèle de croissance PP3. Ce modèle de type « arbre dans peuplement – indépendant des distances » est un modèle de dynamique forestière pour les peuplements homogènes, monospécifiques et réguliers de Pin maritime pour les Landes de Gascogne. Ce modèle ne prend pas en compte la mortalité par compétition (Meredieu, 2002).

b. Hypothèses de prix pour la valorisation des bois

Le prix de vente des bois des éclaircies et coupe rase (BI/BO) est basé sur les résultats des ventes des experts et des ventes ONF entre 2010 et 2020, pour des Vu entre 0,04 et 1,2m^3. La courbe de régression avec le meilleur R^2 est sélectionnée. Cette courbe intègre la chute des prix post-tempête de 2009, puis la hausse des prix à partir de 2014, et enfin l'impact de la crise du Covid-19 de 2020. La variabilité du cours du bois sur les 10 dernières années permet de ne pas surestimer les ventes de bois simulées. A partir du Vu obtenu en sortie de Capsis/PP3 pour les éclaircies et les coupes rases, la courbe de tendance permettra d'estimer le prix de vente au m^3 pour chaque coupe.

Le BE, issu des forêts, est livré en chaudière sous forme de plaquette forestière (bois déchiqueté). Il se distingue en trois classes :

- Classe 1 : petite granulométrie, humidité inférieure à 30%
- Classe 2 : moyenne granulométrie, humidité entre 30 et 40%
- Classe 3 : grosse granulométrie, humidité supérieure à 40%

La valeur énergétique du BE, qui s'exprime en MWh PCI (Pouvoir calorifique inférieur), est fortement dépendante du matériau, de sa densité et de son humidité. Le PCI humide est obtenu par la relation PCI anhydre * (1-Taux humidité) + (678.6*Taux d'humidité). Le PCI anhydre du Pin maritime est fixé à 5200 kWh/t (Ollivier, 2010). Plus un matériau est humide, et moins son PCI est bon. A 9, 15 et 20 ans, les bois récoltés devraient avoir un taux d'humidité supérieur à 40%, donc appartenir à la classe 3.

Le prix d'achat du bois sera donc inférieur pour des plaquettes forestières de classe 3, avec un moins bon PCI, par rapport à des plaquettes de classe 1. En 2019, le prix d'achat des plaquettes varient entre 25 et 30 €/MWh PCI (Yordanova and Migette, 2019). Au vu des éléments précédents et des entretiens avec les acteurs de la filière énergie (Annexe i), le prix d'achat moyen entrée usine est défini à 25€/MWh PCI $_{\text{classe 3}}$. Ce prix correspond au prix d'entrée de l'énergie dans l'usine, donc après prélèvement du bois, déchiquetage et transport. Le prix d'achat du bois au propriétaire représente entre 5 et 10% de ce prix d'entrée en chaudière (Husson, 2016, entretien Jean-Bernard Carreau, Annexe i) ce qui donne un prix d'achat sur pied du BE entre 1,25 et 2,5€/MWh PCI classe 3.

La formule reliant PCI humide/ PCI anhydre est utilisée pour définir le PCI (kWh/tonne brute) disponible dans nos peuplements, selon l'âge de récolte de la biomasse (9, 15 ou 20 ans selon les scénarios et modalités), en fonction de leur taux d'humidité. En découlera alors le prix d'achat minimum et maximum de la tonne brute de BE, à l'aide d'un produit en croix. Ces deux valeurs, minimum et maximum, seront utilisées pour l'étude économique.

c. Hypothèses de coûts pour les travaux réalisés et les frais de gestion

Les coûts des travaux sylvicoles, fixés à partir des résultats d'enquêtes des ETF Nouvelle-Aquitaine 2018[a], de publications scientifiques (Rakotoarison 2015)[b], de rapport interne du

CETEF[8/c] et de devis pour le débroussaillement manuel des essais[d] (données CRPF) sont présentés en Tableau 8:

Tableau 8 : Coûts des travaux forestiers utilisés pour l'étude économique, selon des dépenses ponctuelles ou récurrentes

Dépenses ponctuelles	Coût	Dépenses récurrentes	Coût
Préparation du sol[a]	650 €/ha	Impôt sur le revenu en nature de culture « Lande »[c3]	3 €/ha
Installation et coût des plants[b]	0,4 €/ plants	Impôt sur le revenu en nature de culture bois résineux[c3]	3 €/ha
Débroussaillement interligne[d/a]	85 €/ha	Taxe DFCI[c3]	2,3 €/ha
Débroussaillement manuel[d/a]	305 €/ha	Frais de gestion[c3]	30 €/ha
Marquage[c]	50 €/ha	Impôt foncier[c3]	3 €/ha
Traitement fomès[c]	1 à 1.5€/m3 (selon Vu et densité)	Assurance incendie[c3]	7 €/ha
Débroussaillement av CR[a]	123 €/ha	Assurance incendie et tempête[c3]	12 €/ha
Immobilisation foncière [c]	2000 €/ha	Assurance tempête[c3]	10 €/ha

L'aide économique proposée par le Conseil Régional lors de la mise en place de ces peuplements n'est pas prise en compte dans ces résultats économiques. La valeur du fond de terrain est prise en compte afin de donner une valeur à l'immobilisation du terrain en intégrant dans les calculs économiques l'achat de la parcelle à l'année 0 et la vente de la parcelle 2 ans après la coupe rase. Le débroussaillement est manuel si les interlignes sont inférieures à 4m, sinon celui-ci est mécanique. Les dépenses récurrentes sont des dépenses que l'on retrouve chaque année durant l'itinéraire sylvicole. Pour tenir compte de l'occurrence des risques, l'assurance incendie[9] est souscrite entre l'installation et la 3ème éclaircie, l'assurance tempête[10] est souscrite entre 15 ans et la coupe rase. Pour les terrains plantés en résineux, une exonération de la taxe foncière les 30 premières années est accordée (Ministère chargé des finances, 2020). Les frais de gestion comprennent les frais classiques liés à la gestion forestière : rédaction plan simple de gestion, surveillance des peuplements, suivi des travaux.

d. Les Indicateurs économiques retenus

Quatre indicateurs, présentés en Tableau 9 et détaillés en Annexe vii, sont retenus, au vu des caractéristiques présentées, pour comparer les différentes modalités et scénarios sylvicoles. Pour toutes les analyses, un taux d'actualisation (i) de 3% est utilisé. L'actualisation des dépenses dans le temps permet de tenir compte de la préférence du sylviculteur pour le présent et de l'incertitude liée à l'avenir (Gosselin *et al.*, 2011; Rakotoarison *et al.*, 2015).

Tableau 9 : Aide à l'interprétation des indicateurs économiques retenus pour l'analyse économique

Indicateur	Interprétation	Caractéristiques
BASIF	Si >0, rentable : dans un scénario infini, les recettes seront supérieures aux dépenses	Compare des projets de différentes durées, utilisé par le CETEF des Landes
ACE (€/ha/an)	Si > 0, rentable : chaque année, un bénéfice est théoriquement perçu	Compare des projets de durées de révolution différentes
TIR (%)	Si > taux actualisation (3%), rentable	Utilisé par un certain nombre d'acteurs du massif
B/C (€)	Si > 1, rentable. Ex : B/C = 1,2 €, on espère gagner 0,2 € pour chaque € investi	Facilité de compréhension

[8] Le CETEF est un regroupement de sylviculteurs qui travaillent en commun sur les techniques et l'économie du Pin maritime ; qui bénéficie d'une animation du CRPF Nouvelle-Aquitaine.

[9] La résistance du Pin maritime au feu est principalement caractérisée par l'épaisseur de son écorce. L'impact des incendies sur le peuplement est considéré amoindri après la 3ème éclaircie (Rigolot and Fernandes, 2005).

[10] Avant 15 ans, les hauteurs dominantes sont suffisamment faibles pour limiter le risque des vents (Données CPFA, Colin, Riou-Nivet 2009).

Par la suite, les résultats sont entrés dans un tableur, regroupant l'âge des interventions, les recettes et les coûts (outil interne CRPF adapté pour les besoins de l'étude). Le cycle de révolution total est rallongé de deux années correspondant à une période d'attente entre deux révolutions pour limiter notamment les dégâts d'hylobe (DSF, 2018) .

III. Résultats

Pour Hourtin, les courbes de régression avec les meilleurs R^2, de type exponentiel, en Annexe viii ont été utilisées pour estimer les hauteurs manquantes. La linéarité n'a pas pu être choisie, surestimant les hauteurs lorsque les circonférences sont faibles. La relation satisfaisante $y = -0.1 \ln(x) + 0.89$ (R^2 : 0.64) du coefficient de forme en fonction de la circonférence a aussi été appliquée afin d'obtenir par la suite le Vu. Visuellement, en Annexe ix les hauteurs et les coefficients de forme estimés en fonction de la circonférence, sont cohérents. Les résultats dendrométriques moyens utilisés tout au long de l'analyse sont disponibles en Annexe x pour Hourtin, et en Annexe xi pour Luglon et Cestas, pour les différents itinéraires SD et D, modalités, types de peuplement, et années de mesure.

i. Comparaison des résultats dendrométriques des dispositifs SD et D avec d'autres peuplements des Landes de Gascogne

Les résultats de hauteurs et circonférences sont comparés en Figure 1 aux mesures réalisées entre 2 et 10 ans dans des plantations expérimentales de Pin maritime du massif landais du CPFA (130 placettes, tous milieux, niveau génétique et fertilisation, densité entre 1000 et 1666 tiges/ha).

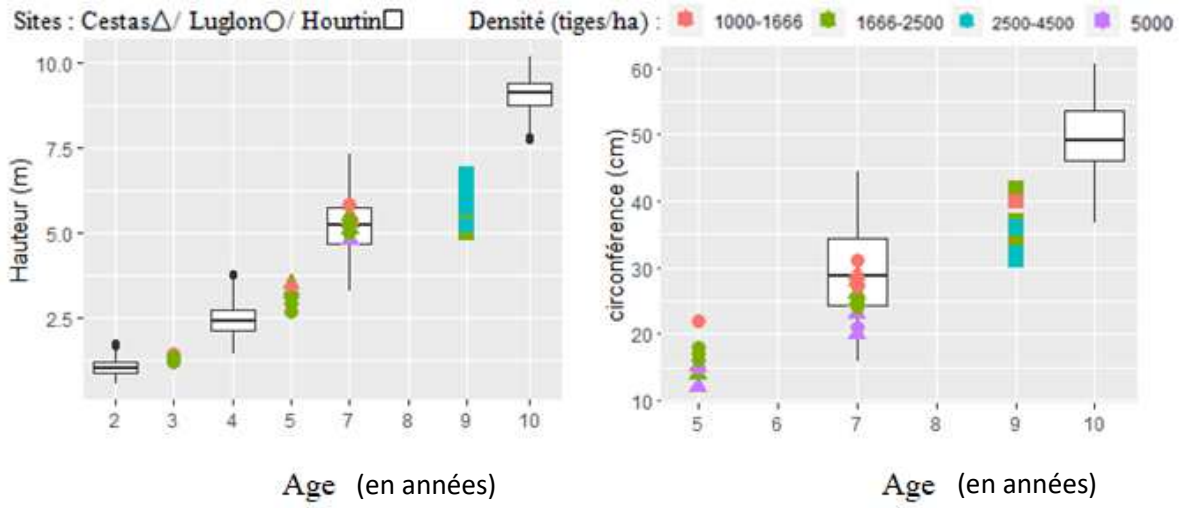


Figure 1: Hauteurs moyennes (gauche) et circonférences moyennes (droite) sur Luglon, Cestas et Hourtin, pour les différentes campagnes de mesures, comparés aux résultats des dispositifs CPFA (Boxplot)

Les *hauteurs* moyennes sur les sites de Luglon (3, 5 et 7 ans) et Cestas (5 et 7 ans) suivent la même tendance que les hauteurs des sites CPFA. Sur Hourtin (9 ans), les hauteurs sont inférieures à l'évolution des hauteurs en fonction de l'âge des dispositifs CPFA. Aucune distinction n'apparait en fonction de la densité.

Pour les *circonférences*, les différents sites suivent la même tendance, avec des circonférences plus faibles dès que la densité dépasse 1666 tiges/ha, et donc les références CPFA. La dispersion des circonférences pour un âge donné rejoint le caractère de densité de plantation dès 5 ans. Les modalités avec les plus faibles densités sont celles avec les meilleures circonférences, et inversement. Nous pouvons conclure que nos 3 dispositifs n'ont pas un comportement atypique en hauteur et en circonférence comparé à des peuplements moyens des Landes de Gascogne.

ii. Effet de la densité sur la mortalité et la croissance des peuplements (A-1)

Le *taux de mortalité* (résultats disponible en Annexe v et en Annexe xii) en fonction de la densité initiale de plantation est représenté en Figure 2. Sur Hourtin à 9 ans, ce taux est très dispersé, avec des résultats variant entre 3 et 31%. Sur Cestas et Luglon, ce taux de mortalité à 7 ans reste inférieur à 10%. Aucune relation statistique n'est montrée entre taux de mortalité et densité de plantation, sur les différents sites, et aux différents âges de mesure.

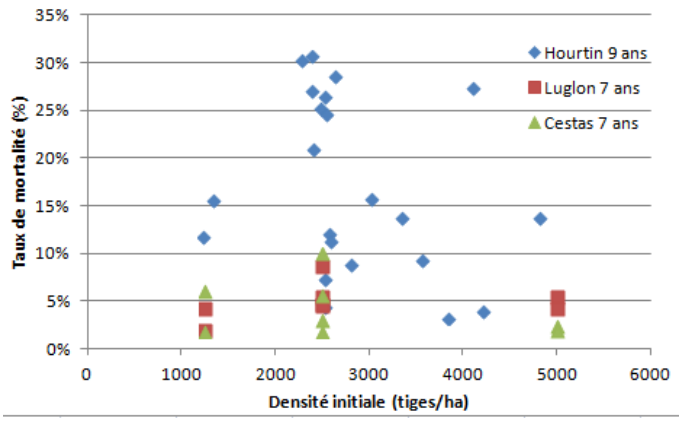


Figure 2 : Taux de mortalité, sur les sites Luglon, Cestas et Hourtin, en fonction de la densité initiale de plantation

Les résultats des différents tests statistiques sur les variables de dimensions, présentés ci-dessous, sont disponibles en Annexe xiii. La circonférence (gauche) et la hauteur (droite) moyenne des différents sites, en fonction de l'âge de mesure et de la densité sont présentées ci-dessous :

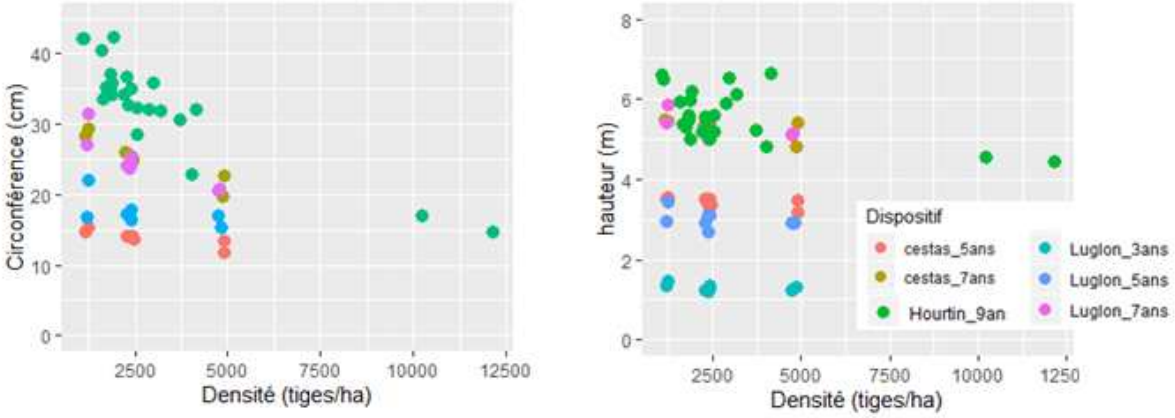


Figure 3 : Circonférences moyennes (cm) (gauche) et hauteurs moyennes (m) (droite) sur Luglon, Cestas et Hourtin, pour les différents âges de mesure, en fonction de la densité à l'âge de mesure

Lorsque la densité augmente, la *circonférence* moyenne diminue pour tous les sites et tous les âges. Le même résultat est mis en évidence entre densité et répartition des individus dans les classes de diamètre en Annexe xiv. Lorsque la densité augmente, le nombre d'individus dans les classes de diamètre inférieurs augmente, et donc la circonférence moyenne du peuplement diminue. Cela rejoint la relation inversement monotone, forte à très forte, montrée statistiquement pour les trois sites. L'effet négatif de la densité sur la circonférence moyenne des peuplements est montré dès 5 ans sur Cestas et à partir de 7 ans sur Luglon. La même relation est montrée pour Hourtin à 9 ans. Des résultats similaires existent pour la croissance entre deux âges de mesure, à Luglon et Cestas. Enfin, l'augmentation de la densité entraine une augmentation de la dispersion des circonférences à Hourtin (9 ans), à Luglon (7 ans) et à Cestas et Luglon sur la période de croissance 5-7 ans.

En revanche, il est difficile de conclure à une relation entre *hauteur* moyenne et densité. Au niveau statistique, l'augmentation de la densité entraine une diminution significative de la hauteur uniquement à 5 ans à Cestas. Le même résultat est montré pour la croissance en hauteur entre 3 et 5 ans à Cestas, ainsi qu'entre 5 et 7 ans à Luglon.

Lorsque la densité augmente, le *Vu* diminue comme on peut le voir ci-contre sur Hourtin à 9 ans. Une relation inversement monotone, forte statistiquement est obtenue pour le Vu moyen, médian et minimum. Enfin une augmentation de la densité entraine une augmentation de la dispersion des Vu à Hourtin, 9 ans.

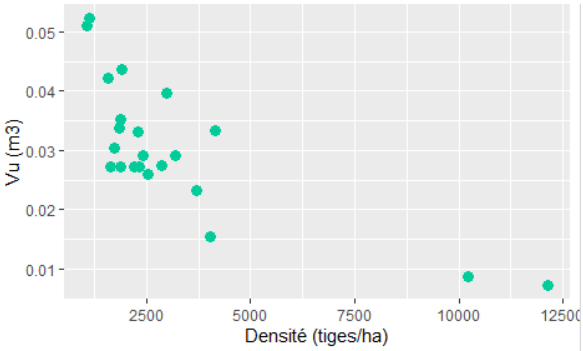


Figure 4 : Volume unitaire moyen sur Hourtin à 9 ans en fonction de la densité à 9 ans

La surface terrière (gauche) et le facteur d'élancement (droite) moyen des différents sites, en fonction de l'âge et de la densité sont présentés en Figure 5 :

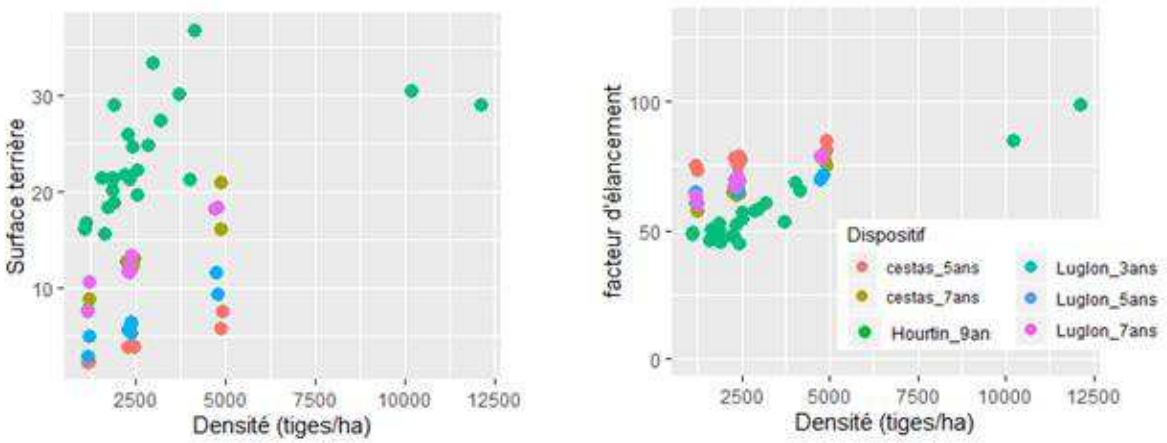


Figure 5 : Surfaces terrières moyennes (m²) (gauche) et facteurs d'élancements moyens (droite) sur Luglon, Cestas et Hourtin, pour les différents âges de mesure, en fonction de la densité à l'âge de mesure

Lorsque la densité augmente, la *surface terrière* augmente pour tous les sites, et tous les âges. Une relation positive monotone, forte à très forte, est montrée statistiquement pour les trois sites, à tous les âges. Un seuil est atteint sur Hourtin à 9 ans, où la surface terrière n'augmente plus au-delà de 5 000 tiges/ha. De manière logique, l'augmentation de la densité entraine une augmentation de la croissance en surface terrière, sur une période donnée à Luglon et Cestas.

Lorsque la densité augmente, les tiges sont plus *élancées,* pour les différents sites, et âges. La relation est positivement monotone, forte à très forte, statistiquement pour les trois sites. L'effet « positif » de la densité sur la l'élancement moyen est montré dès 5 ans sur Cestas, et à partir de 7 ans sur Luglon. La même relation est montrée pour Hourtin à 9 ans. Enfin, la densité influe sur la valeur maximale d'élancement des tiges dans le peuplement. Une augmentation de la densité entraine une augmentation de l'élancement maximum des tiges à Hourtin (9 ans), et à Luglon et Cestas dès 5 ans.

La densité de plantation n'influe pas sur la mortalité. En revanche, elle influe négativement sur la circonférence moyenne et donc directement sur la répartition des individus dans les classes de diamètre. La densité n'influe pas sur la hauteur, sauf dans quelques cas minoritaires où elle influe négativement. La densité influe positivement sur la surface terrière, dès le plus jeune âge, jusqu'à un seuil atteint pour une densité de 5 000 tiges/ha à 9 ans, à partir duquel la surface terrière totale n'augmente plus. L'augmentation de la densité entraine la présence de tiges plus élancées et avec des Vu plus faibles. Enfin, l'augmentation de la densité génère des peuplements plus hétérogènes en termes de circonférence et de volume unitaire.

iii. Effets de l'ajout d'une ligne biomasse sur la croissance du peuplement principal en SD (A-2)

L'ajout d'une ligne biomasse influe négativement sur la *circonférence* du peuplement principal des SD (Annexe xv). En effet, les circonférences moyennes du peuplement principal des SD varient entre 29 et 37 cm, là où les témoins sont à 42 cm (5 à 13 cm supérieur). Ces différences sont significatives au seuil de risque de 5%, avec une exception pour SD-D-1250, où il faut augmenter le seuil du risque à 6%.

Des résultats similaires sont obtenus avec la *distribution des effectifs*, présentée ci-dessous :

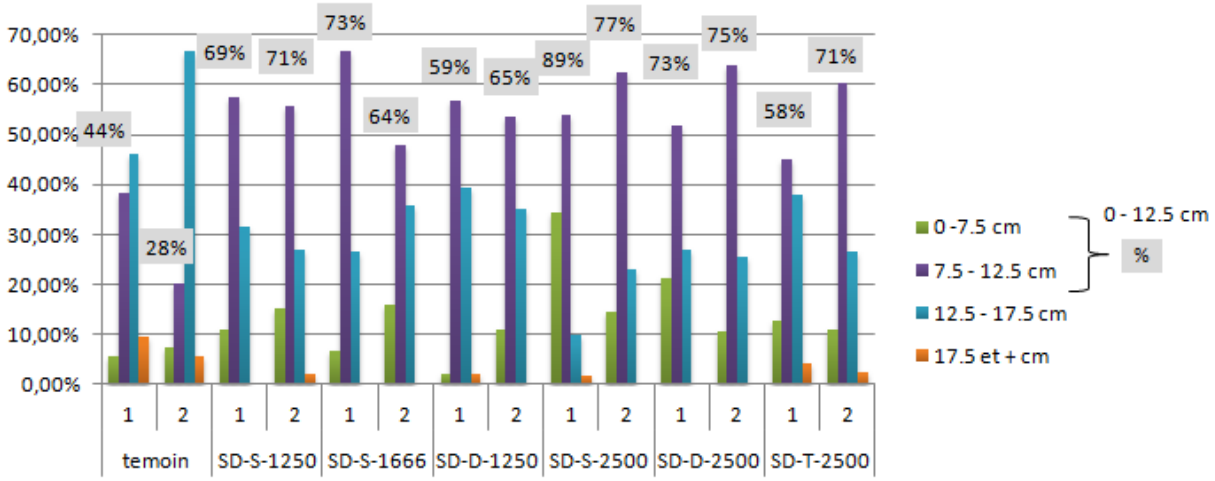


Figure 6 : Distribution des individus dans les différentes classes de diamètres, pour chaque modalité, sur Hourtin à 9 ans

Le peuplement principal des SD comprend des effectifs plus importants dans les classes de diamètre inférieur à 12.5 cm, par rapport au témoin. Pour les témoins, 28 et 44% des individus se situent dans les classes de diamètre inférieur à 12.5cm. Dans le peuplement principal des SD, cette répartition varie entre 58 et 89%. Dans 83% des comparaisons de proportion Témoin/peuplement principal des SD, des différences significatives existent (sauf entre Témoin répétition 2 et SD-S-1666_2, SD-D-1250, SD-T-2500_1).

L'ajout de lignes biomasses n'a pas d'effet clair sur l'*élancement* moyen du peuplement principal en Annexe xv. L'élancement moyen varie entre 44 et 58 dans le peuplement principal des SD, et entre 48 et 50 pour les témoins. Des différences significatives existent avec les témoins, au seuil de risque de 5%. Cependant, l'élancement du peuplement principal des SD est significativement inférieur au témoin ; ex : témoin_2 et SD-S-1666 ; soit supérieur au témoin ; ex : témoin_2 et SD-D-2500.

En revanche, de la même manière que pour la circonférence, l'ajout d'une ligne biomasse influe négativement sur la *hauteur* (Annexe xv) et sur le *Vu* (Figure 7) moyen du peuplement principal des SD. Le peuplement principal des SD varie entre 4.9 et 6 m en hauteur moyenne, et entre 0,022 et 0.037 m^3 en Vu moyen. Respectivement, les témoins sont à 6.5-6.6 m (0,5 à 1,6m supérieur) et à 0,051 m^3 (0,018 à 0,029 m^3 supérieur). Les hauteurs et Vu moyens des peuplements SD sont significativement inférieurs aux témoins, au risque de 5%.

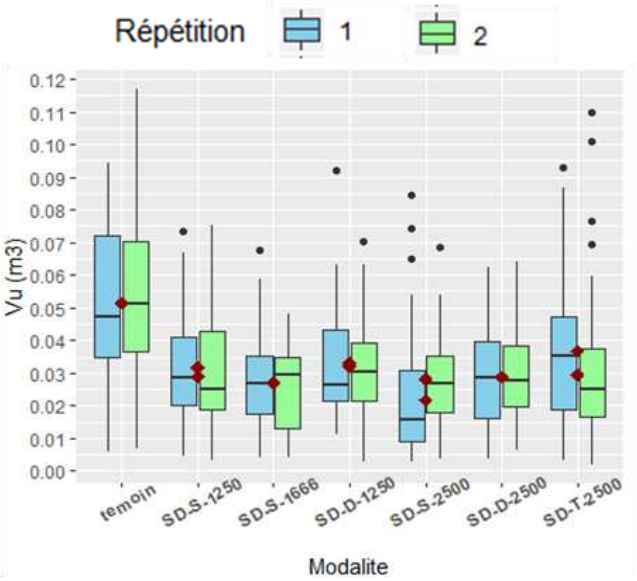


Figure 7 : Boxplots des volumes unitaires pour le peuplement principal des schémas en semi-dédiés par rapport aux témoins, sur Hourtin à 9 ans

En Annexe xvi sont représentés les résultats dendrométriques du *peuplement final* des SD par rapport aux témoins. Statistiquement, ils sont tous significativement inférieurs aux témoins, au seuil de risque de 5%. Les dimensions du peuplement final des SD varient entre 5.4 et 6.9 m en hauteur moyenne, entre 42 et 49 cm en circonférence moyenne, entre 0,041 et 0.062 m3 en Vu moyen. Respectivement, les témoins sont à 7.4 m (0.9 à 2 m supérieur), 53 cm (4 à 11 cm supérieur) et à 0,081-0.082 m3 (0.019 à 0.040 m3 supérieur) (Annexe xvii).

Le *retard de croissance* du peuplement principal des SD est estimé par rapport au moins bon témoin, CD1_2. Pour le scénario 2 (coupe BE réalisée à 9 ans), le gain d'accroissement estimé après la coupe BE sur Sabres (44% pour la circonférence, 26% pour la hauteur) est appliqué à nos données sur Hourtin. Les données de références utilisées de Sabres et les résultats estimés sont présentés en Annexe xviii. Dans le scénario 1 (accroissement linéaire), pour atteindre les résultats dendrométriques de CD1_2, le peuplement principal des SD devra pousser 1 à 4 saisons de végétation de plus pour la hauteur ; 2 à 4 pour la circonférence. Dans le scénario 2, prenant en compte la réaction du peuplement principal suite à l'éclaircie du BE, on obtient une diminution du retard de croissance (par rapport au scénario 1) d'une année au maximum, en circonférence et en hauteur. Cela induit toujours un retard total variant entre 1 et 3 ans en circonférence et hauteur par rapport au moins bon témoin.

L'ajout d'une ligne biomasse entraine un retard de croissance du peuplement principal et final en circonférence, hauteur et en volume unitaire. Aucun effet de l'ajout d'une ligne biomasse n'est montré sur l'élancement.

iv. Effet du schéma sur la croissance du peuplement principal en SD (B-1)

Le schéma d'installation des lignes biomasses dans les SD se caractérise à l'aide de deux critères : la densité sur la ligne biomasse, l'espacement entre la ligne biomasse et le peuplement principal (double ou simple ligne). Six peuplements sur les huit disponibles pour répondre à cette question ont été retenus, les peuplements retirés ne sont pas éligibles en raison de leur trop faible densité pour réaliser une comparaison correcte (Annexe xix).

a. Effet de l'augmentation de la densité sur la ligne biomasse (a)

Quatre comparaisons, notées de A à D, sont réalisées sur le peuplement principal et le peuplement final (300 tiges/ha) pour analyser l'effet de l'augmentation de la densité dans la ligne biomasse sur la croissance du peuplement principal :

- A : SD-D-1250_1 (faible densité biomasse) / SD-D-2500_1 (forte densité biomasse)
- B : SD-S-1250_1 (faible densité biomasse) / SD-S-2500_1 (forte densité biomasse)
- C : SD-S-1250_2 (faible densité biomasse) / SD-S-2500_1 (forte densité biomasse)
- D : SD-D-1666_1 (faible densité biomasse) / SD-S-2500_1 (forte densité biomasse)

Les résultats des différents tests sont présentés en Tableau 10. L'augmentation de la densité dans la ligne biomasse entraine une diminution significative de la *circonférence* du peuplement principal pour toutes les comparaisons. En revanche, une seule comparaison reste significative pour le peuplement final. Un résultat similaire est obtenu pour le *Vu*. Une augmentation de la densité dans la ligne biomasse entraine une diminution du Vu. Trois comparaisons sur quatre sont significatives dans le peuplement principal. Ces différences ne sont plus significatives pour le peuplement final. L'augmentation de la densité dans la ligne biomasse influence quelque fois la *hauteur* du peuplement principal et du peuplement final mais quand ces comparaisons sont significatives, l'augmentation de la densité peut favoriser ou défavoriser la hauteur. Enfin, l'augmentation de la densité dans la ligne biomasse entraine une augmentation de l'*élancement* des tiges. Ce résultat est significatif pour trois comparaisons sur les quatre réalisées dans le peuplement principal. Deux comparaisons sur les trois sont encore significatives dans le peuplement final.

Tableau 10 : Résultats des analyses statistiques pour évaluer l'effet de la densité du peuplement biomasse sur la croissance du peuplement principal ou du peuplement final (300tiges/ha) sur Hourtin à 9 ans. Le tableau présente les dimensions moyennes du peuplement principal ou du peuplement final pour les comparaisons décrites ci-dessus.

	Peuplement principal				Peuplement final			
Groupes	**A**	**B**	**C**	**D**	**A**	**B**	**C**	**D**
Circ (cm)	**32**<37	**29**<35	**29**<35	**29**<35	**42** < 48	**43**/46	**43**/47	**43**/43
Hauteur (m)	**6.0**>5.5	**4.9**<5.6	**4.9**/5.2	**4.9**/4.9	**6.4**<6.0	**5.9**/6.3	**5.9**/5.9	**5.9**>5.5
Vu (dm^3)	**29**/33	**22**<32	**22**<29	**22**<27	**47**/55	**46**/54	**46**/51	**46**/41
Elancement	**58**>46	**53**/51	**53**>47	**53**>44	47>40	**43**/43	**43**>40	**43**/41

Mise en forme : **forte densité (2500 tiges/ha)** dans le peuplement biomasse/ faible densité (1250 tiges/ha) du peuplement biomasse/ Rose : forte densité significativement inférieure/Verte : forte densité significativement supérieure/ Blanc : pas de différence significative entre forte et faible densité

L'augmentation de la densité sur la ligne biomasse influe négativement sur la circonférence et le volume unitaire du peuplement principal des semi-dédiés. Cet effet est moins notable, voire inexistant, lorsque l'on regarde à l'échelle du peuplement final de 300 tiges/ha. L'augmentation de la densité sur la ligne biomasse entraine des tiges plus élancées dans le peuplement principal et final.

b. Effet de l'agencement en double ou simple ligne (b)

Quatre comparaisons, notées de A à D, sont réalisées pour analyser l'effet de l'agencement en double ou simple ligne sur la croissance du peuplement principal ou du peuplement final (300 tiges/ha) :

- A : SD-S-2500_1 (simple ligne) / SD-D-2500_1 (double ligne)
- B : SD-S-1250_1 (simple ligne) / SD-D-1250_1 (double ligne)
- C : SD-S-1250_2 (simple ligne) / SD-D-1250_1 (double ligne)
- D : SD-S-1666_1 (simple ligne) / SD-D-1250_1 (double ligne)

Les résultats sont présentés en Tableau 11. L'agencement du motif en simple ou double ligne n'influence pas la croissance en *circonférence* du peuplement principal. Une comparaison est cependant significative, sur les quatre réalisées dans le peuplement final. La double ligne a favorisé la croissance en circonférence des meilleures tiges dans cette comparaison. L'agencement du motif en double ligne favorise la croissance en *hauteur*, dans trois comparaisons sur les quatre réalisées dans le peuplement principal, et dans deux sur les quatre réalisées dans le peuplement final. L'agencement du motif en double ligne favorise le *Vu* dans un cas sur les quatre dans le peuplement principal, et dans un autre cas dans le peuplement final. Ce ne sont pas les mêmes comparaisons qui sont significatives entre le peuplement principal et le peuplement final. Enfin, l'agencement a une influence sur l'*élancement* des tiges dans le peuplement principal ou final dans deux comparaisons sur les quatre, par type de peuplement. Cependant, lorsque ces comparaisons sont significatives, la double ligne peut entrainer des tiges plus élancées ou inversement, des tiges plus trapues.

Tableau 11 : Résultats des analyses statistiques pour évaluer l'effet de l'agencement des lignes biomasses (simple ou double ligne) sur la croissance du peuplement principal ou final (300tiges/ha) sur Hourtin à 9 ans. Le tableau présente les dimensions moyennes du peuplement principal ou du peuplement final pour les comparaisons décrites ci-dessus.

	Peuplement principal				Peuplement final			
Groupes	**A**	**B**	**C**	**D**	**A**	**B**	**C**	**D**
Circ (cm)	**29**/32	**35**/37	**35**/37	**35**/37	**43**/42	**46**/48	**47**/48	**43**<48
Hauteur (m)	**4.9**<6.0	**5.6**/5.5	**5.2**<5.5	**4.9**<5.5	**5.9**<6.4	**6.3**/6.0	**5.9**/6.0	**5.5**<6.0
Vu (dm^3)	**22**<29	**32**/33	**29**/33	**27**/33	**46**/47	**54**/55	**51**/55	**41**<55
Elancement	**53**/58	**51**>46	**47**/46	**44**<46	**43**<47	**43**>40	**40**/40	**41**/40

Mise en forme : **simple ligne (écart de 2m entre les lignes)** / double ligne (écart de 1m entre les lignes)
Rose : l'agencement simple ligne significativement inférieur/Verte : l'agencement simple ligne significativement supérieur/ Blanc : pas de différence significative entre simple et double ligne

Globalement, le motif en double ligne ou simple ligne n'a pas d'effet sur la circonférence et l'élancement du peuplement principal et final. En revanche, la double ligne favorise la croissance en hauteur et le volume unitaire, de façon moins marquée toutefois pour ce dernier.

v. Rentabilité et viabilité économique des itinéraires SD et D (B-2)

Les courbes de régression polynomiale de degré 2, correspondant aux courbes avec les meilleurs R^2, ont été utilisées pour estimer la biomasse brute et anhydre, par modalité, à 9 ans. La cohérence des estimations est validée graphiquement par le nuage de points représenté en Annexe xx. Les résultats par modalité de taux d'humidité, la répartition de la masse au sein des tiges entre les compartiments, et le tonnage de biomasse estimé sont disponibles en Annexe xxi. Le prix de vente de la tonne brute à 9 ans des scénarios SD est estimé entre 3 et 6€, au vu des forts taux d'humidité du BE à 9 ans et des prix du marché (II .iii.b.). La courbe de régression polynomiale de degré 5 utilisée pour estimer le prix de vente du BI/BO en fonction du Vu est disponible en Annexe xxii. Les différents résultats de récolte, issus de Capsis/PP3, sont disponibles en Annexe xxiii.

a. Compensation du surcoût de plantation lié à la ligne biomasse dans les SD à 9 ans (a)

Aucune différence significative entre modalité n'est montrée pour les *taux d'humidité*. En moyenne, le taux d'humidité mesuré dans les branches mortes, vivantes et le tronc est respectivement de 59%, 27% et de 64%. Cela représente un taux d'humidité moyen de 61 % à l'échelle de l'arbre entier, soit un PCI disponible de 2,44 MWh/tb[11]. Aucune différence significative entre modalités n'est montrée pour le rapport masse du tronc/arbre entier. En

[11] Rappel : PCI brute (kWh/t)= PCI anhydre (5200)*(1- Taux humidité)+(678.6*Taux humidité)

moyenne, le tronc représente 64% de la masse brute totale de l'arbre, et 60% de la masse anhydre (= Masse Sèche, MS) totale de l'arbre. A 9 ans, la *récolte (bois et rémanents)* estimée dans les peuplements SD varie entre 41 et 82 t/ha, pour un taux d'humidité de 40%. Le tonnage espéré de 30 t/ha à 40% d'humidité est toujours atteint. Le rendement de production varie entre 2,2 et 4,5 t MS/ha/an.

Le surcoût de plantation du peuplement biomasse dans les SD, actualisé à 9 ans, en fonction de la densité, varie entre 483€/ha et 1000€/ha (Annexe xxiv). Pour compenser ce surcoût de plantation, la biomasse disponible à 9 ans doit être valorisée entre 3.1 et 5.6€/MWh $PCI_{classe\ 3}$ (Figure 8). Pour un prix d'achat actuel de la biomasse forestière pour l'énergie entre 1,25 et 2,5€/MWh $PCI_{classe\ 3}$ (traits rouges), la production de biomasse ne permet pas de compenser le surcoût de plantation, quel que soit l'itinéraire. En écartant les peuplements avec des taux de mortalité supérieur à 20%, un lien entre prix de vente minimum et densité de tiges biomasse se dessine. Plus la densité dans le peuplement biomasse est élevée, plus le prix de vente doit être élevé pour compenser le surcoût de plantation.

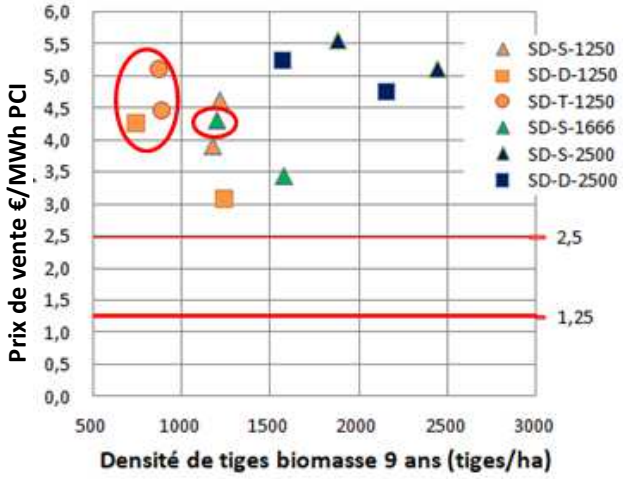


Figure 8 : Prix minimum d'achat du MWh pour compenser le surcoût d'installation de la plantation biomasse dans les schémas semi-dédiés, en fonction de la densité dans le peuplement biomasse à 9 ans. Les traits pointillés rouge indiquent la fourchette actuelle de prix. Les peuplements cerclés sont ceux où la mortalité est > 20%.

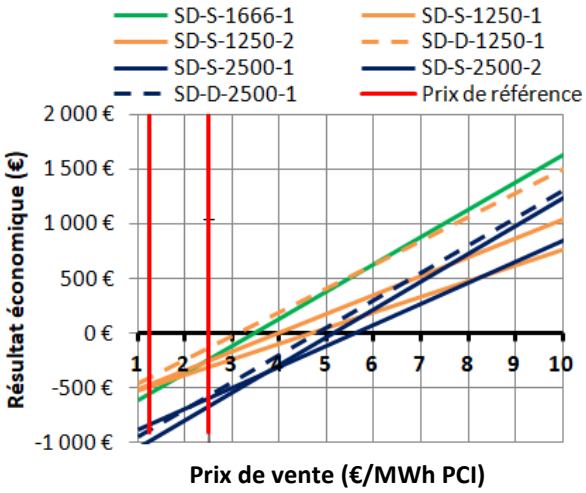


Figure 9 : Bilan économique de la plantation après la coupe bois énergie dans les schémas semi-dédiés, pour différents niveaux de prix de vente au MWh, en tenant compte des coûts d'installation, sur Hourtin

L'évolution de la *rentabilité* de l'opération vente du bois énergie, par rapport aux coûts d'installations, est simulée pour différents niveaux de prix de vente du BE (Figure 9). Seules les modalités avec un taux de mortalité inférieur ou égal à 10% sont retenues. Trois résultats sont à distinguer :

- La modalité SD-S-1666 devient rapidement la plus rentable
- Pour les prix de vente les plus bas (maximum 5€/MWh, soit 15€/tb), les modalités à faible densité biomasse sont plus rentables que les fortes densités biomasses
- Au-delà de 9€/MWh, soit 22€/tb, certaines modalités à forte densité biomasse deviennent plus intéressantes que celles à faible densité biomasse

L'objectif de récolte 30 t/ha à 40% d'humidité est atteint pour tous les peuplements semi-dédiés. Cependant, au prix actuel de vente du bois énergie, la biomasse récoltée ne permet pas de compenser le surcoût lié à leur plantation. De plus, le taux d'humidité moyen du bois énergie est à 61%, ce qui rend plus difficile la combustion et donc l'intérêt de ce produit ou nécessite des coûts de séchage pour les industriels. Les modalités à plus faibles densités biomasses pourraient rentabiliser le surcoût de plantation, pour des prix de vente supérieurs ou égaux à 5€/MWh PCI (15€/tb), soit deux fois supérieurs au prix du marché bois énergie en 2020.

b. Résultat économique à l'échelle d'une révolution

Rentabilité des scénarios SD : l'âge de coupe rase théorique est atteint entre 32 et 40 ans dans les SD, là où celui-ci est atteint à 28-29 ans pour les témoins (Annexe xxiii). Les résultats des indicateurs économiques pour les différentes simulations sont disponibles en Annexe xxv. Pour les quatre indicateurs, les résultats sont similaires. En Tableau 12 les résultats des ACE en base 100 (ref : témoin_2) sont présentés pour illustrer ces résultats. Le gradient de couleur vert correspond à la densité à 9 ans. Plus l'intensité du vert est élevée et plus la densité totale à 9 ans est élevée (1083 à 3708 tiges/ha).

Tableau 12 : Classement des résultats des ACE en base 100 (Réf : Témoin_2) des schémas semi-dédiés, sur Hourtin, à l'échelle du scénario sylvicole, et représentation de la densité totale à 9 ans, à l'aide du grade de couleur verte.

ACE (base 100, ref : Témoin_2)							
Avec débroussaillement à 2 ans				Sans débroussaillement à 2 ans			
min		Max		min		Max	
SD-S-2500_1	-3	SD-S-2500_1	2	SD-S-2500_1	3	SD-S-2500_1	8
SD-D-2500_1	6	SD-D-2500_1	12	SD-D-2500_1	13	SD-D-2500_1	19
SD-S-1666_2	18	SD-S-1666_2	22	SD-S-1666_2	24	SD-S-1666_2	28
SD-S-1666_1	20	SD-S-1666_1	26	SD-S-1666_1	27	SD-S-2500_2	32
SD-S-2500_2	21	SD-S-2500_2	26	SD-S-2500_2	28	SD-S-1666_1	32
SD-S-1250_2	33	SD-S-1250_2	37	SD-S-1250_2	40	SD-S-1250_2	44
SD-T-1250_2	35	SD-T-1250_2	38	SD-T-1250_2	41	SD-T-1250_2	44
SD-D-2500_2	39	SD-D-2500_2	43	SD-D-2500_2	45	SD-D-2500_2	48
SD-D-1250_2	42	SD-D-1250_2	45	SD-D-1250_2	48	SD-D-1250_2	51
SD-D-1250_1	49	SD-S-1250_1	53	SD-D-1250_1	55	SD-S-1250_1	59
SD-S-1250_1	50	SD-D-1250_1	54	SD-S-1250_1	56	SD-D-1250_1	60
SD-T-1250_1	55	SD-T-1250_1	59	SD-T-1250_1	62	SD-T-1250_1	65
Témoin_2	100			Témoin_2	100		
Témoin_1	121			Témoin_1	120		

Tableau 13 : Prix minimum d'achat du MWh pour rendre équivalent le profit des schémas semi-dédiés par rapport à l'itinéraire bois d'oeuvre standard, en rouge les modalités avec un taux de mortalité supérieur à 20%, sur Hourtin.

Modalite	Prix minimum d'achat du MWh (€)
SD-S-1666_2	24,6
SD-T-1250_2	24,6
SD-S-2500_2	22,5
SD-D-1250_2	20,9
SD-D-2500_1	20,1
SD-S-1250_2	20,1
SD-S-2500_1	18,4
SD-D-2500_2	18,4
SD-S-1666_1	18,4
SD-S-1250_1	18,0
SD-T-1250_1	17,6
SD-D-1250_1	12,7

Une seule modalité, SD-S-2500_1, pour un seul scénario, débroussaillement 2 ans, prix de vente minimum, n'est pas économiquement rentable. Avec ou sans débroussaillement à 2 ans, quel que soit le niveau de valorisation du BE, les modalités

sont toujours classées dans le même ordre. Les modalités présentant les densités initiales les plus fortes obtiennent les moins bons résultats économiques. La modalité SD-S-1666 semble cependant déroger à cette règle en se plaçant parmi les moins bons résultats. On distingue un léger effet négatif du débroussaillement sur le résultat économique, mais celui-ci reste négligeable.

Quel que soit l'itinéraire étudié, les résultats des modalités SD restent très inférieurs à ceux des témoins. Le meilleur scénario SD-T-1250_1 « Sans débroussaillement à 2 ans, prix de vente maximum », n'atteint que 65% du résultat du moins bon témoin. Pour rendre l'itinéraire « sans débroussaillement à 2 ans » aussi rentable que le témoin, le prix d'achat du BE devrait atteindre entre 13€ et 25€ le MWh PCI (Tableau 13), soit un prix d'achat entre 31€/tb et 61€/tb (contre 3 à 6€/tb actuellement). Si on élimine les modalités avec un taux de mortalité supérieur à 20% (SD-T-1250, SD-D-1250_2 et SD-S-1666_2), les modalités avec les plus fortes densités (motif 2500 tiges/ha dans le peuplement biomasse) sont celles qui ont besoin du plus fort prix de vente pour atteindre la rentabilité économique du témoin.

Rentabilité des scénarios D pour une valorisation BE : la production varie entre 107 et 195 t/ha (12% humidité) à 15 ans, et entre 168 et 281 à 20 ans (Capsis/PP3), soit une production entre 7 et 14 t MS/ha/an en fonction de l'âge et de la densité. Le taux d'humidité de 12% correspond à un PCI de 4657 kWh, soit des prix d'achat du BE pour ce taux d'humidité entre 5,8 et 11,6€/t à 12% d'humidité. Les résultats des indicateurs économiques pour les différentes simulations sont disponibles en Annexe xxvi. Les résultats sont négatifs pour le BASIF, le TIR et l'ACE. De la même manière, le ratio B/C est inférieur à 1. Pour chaque euro investi, ces scénarios font perdre de l'argent. On distingue un léger effet négatif

supplémentaire du débroussaillement sur le résultat économique, mais celui-ci reste négligeable (perte de 3% sur le résultat économique). Dans tous les cas, aucun de ces scénarios n'est rentable au prix de vente actuel de l'énergie. Pour les indicateurs ACE et BASIF, le classement entre les différentes modalités suit toujours la même relation : l'augmentation de la densité de plantation entraine une diminution de la rentabilité. Plus la densité d'installation est élevée et moins bon est le résultat économique. Des variations sont présentes pour les indicateurs B/C et TIR. Lorsque l'on augmente le prix de vente du BE, les plus fortes densités de plantation semblent être plus rentables. Cependant, ceci n'est pas montré pour toutes les répétitions.

Le prix d'achat minimum du bois pour rendre ces itinéraires rentables est défini en Tableau 14. Plus l'intensité du vert est élevée et plus la densité à 9 ans est élevée (1083 à 4146 tiges/ha). A 15 ans, il faudrait atteindre des prix de vente entre 36 et 46€/tonnes, soit entre 7,7 et 9,9€/ MWh pour rendre ces scénarios rentables, et à 20 ans, entre 31 et 37€, soit entre 6,6 et 7,9€/MWh. Lorsque l'on recule l'âge de récolte à 20 ans, l'écart de prix minimum d'achat diminue entre les modalités extrêmes (2,2 MWh à 15 ans, 1,2 MWh à 20 ans).

Tableau 14 : Prix minimum d'achat du MWh pour rendre les schémas dédiés pour l'énergie rentables, pour une récolte finale à 15 ou 20 ans, sur Hourtin. Sont présentés le taux de mortalité à 9 ans et la densité initiale total à l'aide du grade de couleur verte.

- rentable

+ rentable

15 ans			20 ans		
Mortalité	Modalité	Prix achat €/MWh	Mortalité	Modalité	Prix achat €/MWh
31%	D-4x1-2500_1	9,9	31%	D-4x1-2500_1	7,9
29%	D-2x2-2500_2	9,2	29%	D-2x2-2500_2	7,5
16%	T-4x2-1250_2	8,4	27%	D-2x1-5000_1	7,3
12%	T-4x2-1250_1	8,4	12%	T-4x2-1250_1	7,1
27%	D-2x1-5000_1	8,2	25%	D-2x2-2500_1	6,9
30%	D-4x1-2500_2	7,9	30%	D-4x1-2500_2	6,9
14%	D-2x1-5000_2	7,7	16%	T-4x2-1250_2	6,9
25%	D-2x2-2500_1	7,7	14%	D-2x1-5000_2	6,7

Rentabilité des scénarios D pour une valorisation BI/BO : les diamètres moyens simulés par Capsis/PP3 sont compris entre 15-21cm à 15 ans et entre 16-25 cm à 20 ans. Ce sont des diamètres exploitables pour du BI dès 15 ans et du petit sciage à partir de 20 ans (dès 22,5 cm). A 15 ans, ces scénarios ne sont pas économiquement rentables, mais le deviennent à 20 ans, sauf pour la modalité D-4x1-2500_1 (Annexe xxvii). Le meilleur résultat (D_2x1-5000_2) ne représente cependant que 78% du moins bon témoin (Tableau 15).

Modalité	ACE (base 100, ref : Témoin_2)	Densité 9 ans (tiges/ha)
D-4x1-2500_1	-36	1646
D-2x2-2500_1	18	1917
D-2x2-2500_2	22	1875
D-4x1-2500_2	40	1583
T-4x2-1250_2	55	1125
D-2x1-5000_1	66	2979
T-4x2-1250_1	73	1083
D-2x1-5000_2	78	4146
Témoin_2	100	1125
Témoin_1	121	1083

Tableau 15 : Classement des résultats des ACE en base 100 (Réf : Témoin_2), des schémas dédiés pour un débouché bois d'industrie/bois d'œuvre à 20 ans, à l'échelle du scénario sylvicole, sur Hourtin.

Les itinéraires semi-dédiés ne sont pas compétitifs avec l'itinéraire bois d'œuvre standard pour les prix actuels du bois énergie. Ceux avec les plus fortes densités dans le peuplement biomasse sont les plus déficitaires. Ces itinéraires ne deviendraient compétitifs que pour des prix de vente du bois énergie 10 à 20 fois supérieurs au prix actuel. Les itinéraires dédiés pour l'énergie ne sont pas rentables. Ils le deviendraient, sur des rotations de 20 ans, pour un débouché bois d'industrie/bois d'œuvre, mais seraient toujours moins intéressants que l'itinéraire bois d'œuvre standard.

IV. Discussion

i. Biais éventuels liés au site expérimental et aux hypothèses de travail

L'étude réalisée sur Hourtin ne permet pas de généraliser les résultats à l'échelle du massif des Landes de Gascogne. Certaines densités sont éloignées des densités théoriques à 9 ans (mode de plantation, dégâts de gibier). Cela n'a pas permis d'avoir la puissance statistique requise (réaliser les tests pour chaque répétition) pour tester correctement certains effets de la densité. Cependant, les résultats obtenus pour ce site sont en accord avec les connaissances générales sur la dendrométrie et avec les résultats sur Luglon et Cestas (sites INRAE).

Différentes hypothèses de travail ont aussi dû être émises au cours de cette étude :

1) Un modèle par modalité et répétition pour la hauteur a pu être déterminé à partir des mesures disponibles. L'utilisation de ces modèles pour les hauteurs entraine directement une plus faible variabilité de celles-ci, des volumes unitaires et de l'élancement (H/D), ce qui peut masquer certains effets mais n'influence pas les tendances observées.

2) Les mesures de biomasses ont été réalisées seulement dans les modalités SD1 à SD4, pour la répétition 1. Pour estimer la production de biomasse dans les modalités non mesurées, l'hypothèse a été réalisée uniquement pour un même schéma de plantation, la production de biomasse suivait la même calibration. Shaiek *et al.* (2011) ont montré qu'il était possible de généraliser les modèles de biomasse aérienne pour une essence comme le Pin maritime. Nos estimations biomasses sont donc pertinentes.

3) Pour obtenir le volume total, le coefficient de forme sur les 30 arbres abattus a été estimé à partir de la formule généralisée par Vallet *et al.* (2006), basé sur des peuplements standards des Landes. L'hypothèse est que la relation coefficient de forme /circonférence à 1 m 30 est indépendante du schéma de plantation. Or, dans notre étude, nous montrons un effet de l'agencement en double ou simple ligne sur la croissance en hauteur et donc sur la forme des tiges. On peut ainsi supposer que les coefficients de forme et les volumes unitaires des tiges des modalités en double ligne dans les itinéraires semi-dédiés pourraient être légèrement sous-estimés, la littérature ne permettant pas de confirmer l'existence de ce biais puisque qu'aucune étude n'a été trouvée.

4) Le modèle Capsis/PP3 utilisé ne tient pas compte du schéma de plantation (localisation précise des tiges), mais intègre la compétition entre individus liée à la densité, qui est le facteur le plus discriminant dans cette étude. Ce modèle PP3 se base sur l'indice de fertilité à partir d'une mesure de hauteur dominante à 12 ans. Dans nos simulations, les estimations sont réalisées plus jeunes, à partir d'inventaires réalisés à 9 ans, pouvant surestimer cet indice de fertilité. Dans le cas des peuplements dédiés, simuler une croissance sans éclaircie a surestimé obligatoirement la croissance globale du peuplement puisque le modèle ne régule pas automatiquement la surface terrière maximale, celle-ci devant être atteinte avant 20 ans.

5) Les volumes et tonnages sont estimés à l'échelle d'un hectare plein et ne prennent pas en compte les bordures de terrains, fossés, chemins. Ce biais peut entrainer une diminution de 10% des résultats annoncés mais n'influence pas les comparaisons des itinéraires entre eux.

6) La courbe de prix utilisée pour les simulations économiques se base sur les 10 dernières années. Cela permet de prendre en compte des évènements externes pouvant affecter le marché. Cependant, il est difficile de prévoir l'évolution de ces prix pour les prochaines années comme précisé par Rakatoarison *et al* (2015). Il en est de même pour les coûts des travaux sylvicoles. La transformation en base 100 de l'ACE a permis de comparer ces itinéraires, en faisant abstraction du résultat économique obtenu.

ii. Effet de la densité de plantation sur la mortalité et la croissance

Les différents résultats obtenus sur l'effet de la densité de plantation sur la croissance rejoignent les grandes généralités de la littérature :

1) Le seuil minimal à partir duquel la densité a un impact sur la mortalité entre 5 et 10 ans n'est pas atteint par les densités de plantation des itinéraires semi-dédiés et dédiés. Cela rejoint les résultats de l'étude de Lemoine et Sartolou de 1980 sur le Pin maritime, ainsi que la perception des acteurs enquêtés sur ce point. En revanche, dans le cas des peuplements dédiés, il reste à observer comment la mortalité va évoluer au cours du temps. La compétition entre les individus va continuer à augmenter et peut-être atteindre les limites de l'auto-éclaircie avant le déclenchement de la coupe rase (Charru *et al.*, 2012).

2) La densité a un effet négatif sur la croissance en circonférence moyenne dès 5 ou 7 ans selon les sites, confirmé par la littérature : Hébert et al (2016, Pin gris), Lee et Lenhard (1998, Pin d'Elliott, Pin taeda), Vila (2001, Pin sylvestre), Lemoine et Sartolou (1980, Pin maritime). L'augmentation de la densité de plantation influe directement sur la disponibilité des ressources partagées entre un plus grand nombre d'individu (éléments nutritifs, eau dans le sol, lumière), et donc sur la croissance en circonférence (West and Smith, 2019).

3) Effet variable de la densité sur la hauteur moyenne. Dans un seul cas, un effet négatif de la densité sur la croissance en hauteur moyenne a été observé (à Cestas à 5 ans). Dans tous les autres cas, aucune relation ne se dessine. Cela rejoint les résultats issus de la littérature qui montrent une relation indépendante entre hauteur et densité pour des densités de plantation inférieures à 12 000 tiges/ha (Lee et Lenhart (1998), Lemoine et Sartolou (1980), Varmola et Salminen (1993), Hebert (2016)). En effet, bien que les ressources disponibles soient plus faibles, les études sur l'allométrie des arbres (relation diamètre-hauteur –(Franceschini and Schneider, 2014)) montrent que dans le jeune âge, les arbres vont maintenir l'investissement de leurs ressources dans la croissance en hauteur au détriment de leur croissance en grosseur. Ce maintien de la croissance en hauteur est d'autant plus important pour les espèces résineuses de lumière à forte dominance apicale, comme le Pin maritime.

4) De ces résultats sur la circonférence et sur la hauteur, validés par la littérature, découle :

- ⇨ *l'effet négatif de la densité sur le Vu,* comme l'énonce Lemoine et Sartolou (1980)
- ⇨ *l'effet « positif » de la densité sur l'élancement (H/D) dès 5 ans ou 7 ans selon les sites,*

cohérent avec les résultats Vila *et al.* (2001). L'augmentation de la densité entraine la formation de tiges plus élancées puisque la croissance en hauteur est maintenue mais la croissance en circonférence est plus faible. Bien que l'élancement ne soit pas aujourd'hui un critère prioritaire pour analyser la stabilité des pins maritimes (Colin and Riou-Nivert, 2009), cette variable permet tout de même d'apprécier la modification de la forme des arbres liée à l'augmentation de la densité. La tendance de la sylviculture actuelle est de favoriser la croissance en circonférence, et donc l'obtention d'arbres trapus. Cependant, certains industriels remettent en cause cette conicité des arbres qui entraine un moins bon rendement matière (Communication personnelle CRPF).

5) L'augmentation de la densité permet d'augmenter la production totale du peuplement (G), jusqu'à un plateau dans les plus fortes densités (10 000 tiges/ha, obtenues par semis). La surface terrière dépend de deux grandeurs : le diamètre moyen à 1m30 des tiges et la densité.

En l'absence d'une concurrence forte, on observe une relation positive entre surface terrière et densité qui découle d'une plus grande capacité de croissance due à un plus grand nombre de tiges disponibles (West and Smith, 2019). Dans les modalités plantations, les densités jusqu'au seuil de 5 000 tiges/ha ne permettent pas d'atteindre le seuil maximal de production ou de déterminer si celui-ci est atteint à cette densité à 9 ans. En revanche, pour des densités de 10 000 tiges/ha dans les modalités semis, l'augmentation de la densité entraine une diminution de la production totale du peuplement. La perte de croissance en circonférence, provoquée par l'augmentation de la densité, devient trop forte pour que la production totale continue d'augmenter. Cela rejoint les résultats de Lemoine et Illy (1970) sur l'évolution du volume par unité de surface.

6) L'effet négatif de la densité sur l'homogénéité du peuplement en circonférence et en volume unitaire dès 7 ans selon les sites rejoint les résultats de Lemoine et Sartolou (1970). L'augmentation de la concurrence accentue l'hétérogénéité du peuplement. Ce résultat rejoint aussi West and Smith (2019) sur la compétition entre les arbres qui devient plus asymétrique lorsque la taille des arbres augmente et que les arbres sont plantés plus rapprochés. Cependant l'effet semble apparaitre plus tardivement dans nos peuplements que dans la littérature, la concurrence ne devant pas être encore assez forte pour la gamme de densité testée. Ce résultat d'hétérogénéité des tiges, évoqué lors des entretiens (Tableau 2), est ainsi vérifié.

iii. Effet de l'ajout d'une ligne biomasse et de son agencement sur le peuplement principal des SD

1) L'ajout d'une ligne biomasse entraine une augmentation de la densité totale (passage de 1250 à 2 500 ou 3750 tiges/ha), ce qui devrait rejoindre les résultats énoncés précédemment, validés par la littérature :

- En effet, l'ajout de la ligne biomasse a eu un effet négatif sur la croissance en circonférence et volume unitaire, du peuplement principal et des 300 meilleures tiges. Lors des différents entretiens avec les acteurs de la filière, cet effet négatif de la densité n'était pas perçu par tous (Tableau 3).

- Le doublement de la densité dans la ligne biomasse (passage de 2500 à 3750 tiges/ha) accentue cet effet sur le peuplement principal, mais curieusement, pas sur les 300 meilleures tiges. Ce phénomène pourrait s'expliquer par la plus grande hétérogénéité liée à l'augmentation de la densité, cumulée à l'aptitude des plus gros arbres à pousser plus vite (West and Smith, 2019).

- En revanche, l'ajout de lignes biomasses impacte négativement la croissance en hauteur du peuplement principal et final (passage de 1250 à 2500 tiges/ha), alors qu'aucune relation hauteur/densité n'a été observée sur le peuplement total, ce qui contredit les résultats émis pour le Pin maritime dans la littérature. Cet effet négatif sur la hauteur n'est pas accentué lorsque l'on double la densité dans la ligne biomasse (passage de 2500 à 3750 tiges/ha), ce qui est difficile à expliquer aujourd'hui. Il sera nécessaire de vérifier si ce phénomène est observé sur le dispositif de Retjons, qui doit être mesuré prochainement. Cependant, il semble que la modification de la densité et donc du nombre de tiges dans l'espace ait un effet sur la structure du houppier* (diamètre moyen, Lemoine and Sartolou, 1980) et sur sa capacité à capter la lumière (West and Smith, 2019).

2) L'agencement en simple ou double ligne a un effet variable sur la croissance du peuplement principal :

- Il n'a pas d'effet sur la circonférence. Cela rejoint les résultats de Salminen et Varmola (1993, Pin sylvestre) sur l'indépendance du diamètre moyen du peuplement par rapport au motif de plantation, bien que ce ne soit pas des motifs semblables à ceux de notre étude.

- En revanche, la mise en place de double ligne a réduit l'impact négatif sur la croissance en hauteur du peuplement principal. Ce résultat est en désaccord avec Salminen et Varmola, qui ne montrent pas de relation entre hauteur et motif de plantation. Cependant, on peut supposer que ce phénomène résulterait de l'effet positif de la concurrence des voisins immédiats sur la croissance en hauteur à partir de certains seuils, montré par Vila *et al.* (2001) pour le Pin sylvestre. La répartition des tiges dans l'espace est moins homogène que dans un motif simple ligne et que dans l'étude de Salmlinen et Varmola. La concurrence immédiate pour la lumière par la mise en place d'une double ligne pourrait alors devenir plus importante. Cependant, cet effet positif de la double ligne sur la hauteur reste faible et n'entraine pas d'effet significatif sur le volume unitaire ni l'élancement des tiges du peuplement principal.

3) Cependant, dans un souhait de maximiser la production de biomasse tout en maintenant une production bois d'œuvre, le schéma d'installation en double densité sur la ligne biomasse (2500 tiges/ha) semble plus intéressant, puisqu'il n'augmente pas l'impact sur le peuplement final de 300 tiges/ha. L'agencement en double ligne (écart d'un mètre entre la ligne peuplement principal et la ligne du peuplement biomasse) permettrait une meilleure croissance en hauteur. De plus, cet agencement permettrait un entretien plus facile des interlignes par rapport à un motif simple ligne.

4) Notre étude a porté sur l'impact de la densité et du motif de plantation sur des paramètres de croissance. Il serait aussi intéressant de voir l'effet de ces paramètres sur la forme et la qualité des arbres : écart à la verticalité, branchaison (Hébert *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018) et la forme des houppiers (West and Smith, 2019).

iv. Rentabilité et viabilité économique des itinéraires SD et D

Dans les peuplements semi-dédiés, l'objectif de production biomasse de 30 t/ha à 40% d'humidité à 9 ans est atteint. Cependant, ce résultat ne permet pas de compenser les coûts d'installation, au prix de vente actuel du bois énergie. Même dans le cas où la mise en place des plants ne serait pas à la charge du propriétaire, le retard de croissance sur le peuplement principal entrainera une rentabilité moins intéressante que l'itinéraire bois d'œuvre standard. Les résultats émis par Rakoatarison *et al.* (2015), quant à une rentabilité proche de l'itinéraire bois d'œuvre standard pour un débouché bois d'industrie/bois énergie, ne peuvent être validés pour un débouché bois énergie uniquement, à 9 ans. De plus, le taux d'humidité élevé, 62%, de la biomasse pour une production de bois énergie ne correspond pas à la demande actuelle des industriels, ni au cahier des charges à l'entrée des chaudières (Tableau 3). Par ailleurs, le schéma actuel de la filière bois énergie ne favorise pas la mise en place de zone de ressuyage pour ces bois, au vu des coûts de stockage trop importants et des risques sanitaires (crise scolyte).

Par ailleurs, un certain nombre de peuplement semi-dédiés installés en grandeur réelle, ayant atteint l'âge de récolte de la biomasse, restent aujourd'hui inexploités, traduisant le manque d'intérêt des entreprises pour ces itinéraires. De nombreuses difficultés existent quant à l'exploitation de ces peuplements : accès aux lignes biomasse, coûts de transformation, coût de transport.

Dans les peuplements dédiés, l'accroissement moyen est entre 7 et 14 t MS/ha/an entre 15 et 20 ans en fonction de la densité. Cela correspond aux résultats de la synthèse bibliographique de Berthelot *et al.* (2014) pour le Pin maritime. Cependant, ce rendement de production reste inférieur à celui obtenu pour d'autres essences, comme l'eucalyptus qui peut atteindre une production de 10 t MS/ha/an à 10 ans, pour des densités initiales de plantation de 1250 tiges/ha et sur des sols peu fertiles (Melun, 2018). Ces itinéraires ne sont pas rentables pour la production d'énergie, mais le deviennent pour une valorisation bois

d'industrie/bois d'œuvre à 20 ans. Dans l'analyse économique réalisée par Rakotoarison *et al.* (2015), les scénarios dédiés pour du bois d'industrie/bois énergie (1250 à 2000 tiges/ha, à 25-30 ans), pour le Pin maritime, donnaient des rentabilités proches de l'itinéraire classique. Ici, les itinéraires à 5 000 tiges/ha à 20 ans pour un débouché bois d'industrie/bois d'œuvre se retrouvent au plus proche de l'itinéraire classique. Cependant, la prise en compte du coût de dessouchage indispensable après l'exploitation des peuplements dédiés pourrait venir modifier ce résultat. En effet, la coupe rase réalisée à 15 ou 20 ans entrainera des volumes unitaires plus petits, avec un grand nombre de souches qui pourrait poser des problèmes pour la plantation. Des études expérimentales sont en cours (Communication personnelle AFB).

L'évolution de la surface terrière et de la mortalité dans les années à venir pour ces différents peuplements permettra d'évaluer l'âge critique à partir duquel la densité et donc la compétition entre les individus devient trop forte pour permettre d'augmenter la production totale. Pour Zhao *et al.* (2012), le seuil de production pour le Pin taeda est de 2 224 tiges/ha à 12 ans. Pour le Pin maritime réputé plus sensible à la concurrence que le Pin taeda (Tableau 3), le seuil maximal de production pourrait être atteint dans les prochaines années. Au-delà de ce seuil, l'augmentation de la densité n'entraine qu'une augmentation du risque.

Dépendance du prix des énergies. Le prix de vente minimum permettant de rendre les itinéraires semi-dédiés aussi rentables que l'itinéraire bois d'œuvre classique se situe entre 31 et 61€/tb (prix actuel 3 à 6 €). Pour les scénarios dédié, le débouché bois énergie ne permet pas de promouvoir ces itinéraires aujourd'hui. Lors de la mise en place de ces scénarios, l'hypothèse était celle d'une augmentation du prix de l'énergie et donc du bois énergie au cours de la décennie. Cependant, le marché de l'énergie n'a pas évolué de la manière escomptée. La concurrence avec les autres énergies fossiles, ainsi que le développement du plan Hydrogène à faible coût rend la biomasse forestière peu compétitive sur le marché aujourd'hui (Tableau 3, Tableau 4).

v. Eléments complémentaires d'analyse

Cette étude s'est consacrée à la production des itinéraires semi-dédiés et dédiés, cependant d'autres paramètres, évoqués pour certains, lors des entretiens (Tableau 2, Tableau 3 et Tableau 4) viennent enrichir l'analyse :

- Tout d'abord, les itinéraires semi-dédiés n'ont pas d'avantages pour le propriétaire, pour qui le risque augmente, à cause de l'allongement de la durée de révolution, liée au retard de croissance pour obtenir le même objectif de récolte de BO.
- Les itinéraires dédiés ne sont pas réversibles*, ne permettant pas au propriétaire de s'adapter au marché ou à l'évolution de son peuplement, un point important aujourd'hui.
- De plus, l'augmentation de la densité dans ces itinéraires entraine directement une augmentation de la compétition pour les ressources de l'écosystème, dont la ressource en eau.
- La difficulté de débroussailler dans les modalités avec des interlignes inférieures à 3 m avec le matériel disponible aujourd'hui, entraine une augmentation de la vulnérabilité au risque incendie, déjà présent dans les itinéraires standards. D'autres part, cela rend impossible la maitrise de la végétation concurrente, ce qui accentue encore plus l'exposition du peuplement Pin maritime au stress hydrique.
- L'éclaircie de plus de 50% des tiges dans les semi-dédiés augmente la vulnérabilité au vent (Colin and Riou-Nivert, 2009).
- La récolte des rémanents (aiguilles, branches, souches pivots) conduit à une exportation importante de nutriments, donc de la fertilité des sols, et une perte de 5% du carbone du sol (Martel *et al.*, 2019). La récolte d'arbres jeunes pour de la biomasse dans les semi-dédiés et dédiés exporte davantage d'éléments minéraux car leur concentration diminue avec l'âge des arbres. De plus, une perte de productivité dans les années après coupe rase dans les courtes révolutions pourrait apparaitre suite aux plus faibles retours au sol de matière organique (Martel *et al.*, 2019).

- La sylviculture de ces peuplements va impacter négativement le taux de carbone dans le sol et la biodiversité dans ces peuplements : perte de carbone dans la couche de litière suite aux fortes éclaircies (> 35%), diminution des stocks de carbone dans la litière et la partie supérieure du sol et risque de tassement suite aux coupes rases et à la préparation mécanisée du site (notamment le labour), modification de la composition du sous-bois suite à l'augmentation de la densité (IUCN France, 2015; Augusto *et al.*, 2019)

Dans un contexte de changement climatique, les différents risques présents dans ces peuplements aujourd'hui risquent d'être accentués. La production forestière ainsi que les stocks de carbone dans la biomasse devraient diminuer. La diminution des précipitations et l'augmentation des températures pourraient diminuer la croissance des peuplements sous l'effet du stress hydrique. Suite aux simulations réalisées à l'aide du modèle GO+, dans le cadre du projet Evafora, les itinéraires biomasses (2 500 tiges/ha) devraient même être parmi les plus exposés au changement climatique à cause de leur indice foliaire trop élevé (Martel *et al.*, 2019).

Conclusion

Le programme CLIMAQ avait pour but d'évaluer de nouveaux itinéraires tels que les scénarios semi-dédiés et dédiés à la production de biomasse énergie. L'objectif de ce stage est d'évaluer, 10 ans après, l'intérêt de ces peuplements : rentabilité de la production de biomasse, impact du motif de plantation sur la production et avenir du peuplement principal pour les semi-dédiés.

Plus de 10 ans après la création de ce programme, on peut affirmer que l'augmentation de la densité dans ces peuplements a influencé les paramètres dendrométriques, leur homogénéité et la forme des tiges dans le peuplement. Cela a aussi conduit à une production totale supérieure, jusqu'au seuil de 10 000 tiges/ha.

Dans les semi-dédiés, l'ajout de ligne biomasse entraine un retard de croissance du peuplement principal. Ce retard augmente avec la densité dans la ligne biomasse. En raison du prix d'achat actuel du bois énergie et du retard du peuplement principal, ces itinéraires semi-dédiés ne sont pas aussi rentables que l'itinéraire bois d'œuvre standard.

Les itinéraires dédiés pour le bois énergie ne sont pas rentables. Ils le deviendraient, sur des rotations de 20 ans, pour un débouché bois d'industrie/bois d'œuvre, mais seraient toujours moins intéressants que l'itinéraire bois d'œuvre standard. Cependant, ils peuvent constituer une alternative en cas de retard de coupe ou de peuplement mal venus.

Le désengagement des industriels pour les itinéraires semi-dédiés montre que ces itinéraires ne sont pas non plus intéressants pour eux dans les conditions actuelles.

D'autres limites ont pu être mises en avant : des difficultés d'exploitation de la biomasse, des taux d'humidité du bois élevés qui ne répondent pas au cahier des charges actuel des industriels et à leurs outils, l'augmentation du risque dans ces peuplements suite à l'augmentation de la densité et la perte de réversibilité, ou encore des impacts négatifs sur la pérennité de l'écosystème forestier (exportation de la biomasse, épuisement de sols déjà fragiles, coupe rase jeune).

La méthode mise en place dans cette étude permettra l'analyse d'autres peuplements expérimentaux du même type. La campagne de mesure qui sera réalisée dès l'automne 2020 sur le site de Retjons permettra de compléter et consolider les résultats obtenus par ce premier rapport.

L'expérimentation forestière demande du temps. Ces premiers résultats répondent aux réflexions entamées 10 ans plus tôt. Aujourd'hui, l'évolution de la filière conduit à proposer de nouveaux produits avec le développement de la chimie verte et la substitution de produit plastique à partir de biomasse ligno-cellulosique. Cela pourrait constituer un nouveau débouché pour ces itinéraires, à condition toutefois que le prix d'achat de la matière première puisse assurer leur compétitivité.

BIBLIOGRAPHIE

Association forêt-cellulose (AFOCEL) (2007) 'Récolte des branches et des souches en vue d'une valorisation énergétique', *FIF - Fiche Informations-Forêt*, 3(756), p. 6.

Alia, R. and Martin, S. (2002) *EUFORGEN Technical Guidelines for genetic conservation and use for Maritime pine (Pinus pinaster)*. International Plant Genetic Resources Institute. Rome, Italy.

Augusto, L. *et al.* (2019) 'Séquestration de carbone organique dans les sols forestiers : impacts de la gestion sylvicole', *Forêt Entreprise*, (45), pp. 62–67.

Baudry, M. *et al.* (2019) *Chiffres clés de l'énergie : Édition 2019*. Le service de la donnée et des études statistiques (SDES), p. 80.

Berthelot, A. *et al.* (2014) 'Potentialités de production de biomasse de quelques essences résineuses en conditions forestières : Douglas, Épicéa commun, Épicéa de Sitka, Cyprès de Leyland, Séquoia toujours vert, Cryptomère du Japon, Pin maritime', *Revue Forestière Française*, LXVI(5), pp. 695–713.

Brahic, É. and Deuffic, P. (2017) 'Comportement des propriétaires forestiers landais vis-à-vis du bois énergie: Une analyse micro-économique', *Économie rurale*, (359), pp. 7–25. doi: 10.4000/economierurale.5176.

Charru, M. *et al.* (2012) 'Significant differences and curvilinearity in the self-thinning relationships of 11 temperate tree species assessed from forest inventory data', *Annals of Forest Science*, 69(2), pp. 195–205. doi: 10.1007/s13595-011-0149-0.

Colin, A. *et al.* (2010) *Étude rétrospective et mise à jour de la ressource en pin maritime du massif des Landes de Gascogne après la tempête Klaus du 24 janvier 2009*. Rapport final de la convention IFN/MAAP n° E18/2010 du 21 Juin 2010 (INF n°2010 - CER - 2 - 077). IFN-INRA, p. 39.

Colin, F. and Riou-Nivert, P. (2009) 'Relations entre résistance au vent, descripteurs du peuplement et sylviculture', *Innovations Agronomiques*, 6, pp. 39–49.

Centre régional de la propriété forestière (CRPF) Aquitaine (2005) *Schéma Régional de Gestion Sylvicole des forêts privées d'Aquitaine*. CRPF d'Aquitaine, p. 134.

Centre régional de la propriété forestière (CRPF) Aquitaine *et al.* (2014) *CLIMAQ : Adaptation des forêts d'Aquitaine au changement climatique : rapport final*. CRPF-FCBA-CAFSA-INRA-ETF, p. 66.

Domec, J.-C. *et al.* (2017) 'Productivity, Biomass Partitioning, and Energy Yield of Low-Input Short-Rotation American Sycamore (Platanus occidentalis L.) Grown on Marginal Land: Effects of Planting Density and Simulated Drought', *BioEnergy Research*, 10(3), pp. 903–914. doi: 10.1007/s12155-017-9852-5.

Direction régionale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt (DRAAF) Nouvelle-Aquitaine (2019) *Programme Régional de la Forêt et du Bois 2018/2027 : Nouvelle-Aquitaine*. DRAAF, p. 156.

Défense de la santé des forêts (DSF) (2018) *L'Hylobe ou grand charançon du pin*. Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, p. 4.

Emeyriat, R. (2019) *Etat des lieux des moyens de récolte et de production de bois énergie en Nouvelle-Aquitaine*. Forêt Logistique Conseil, p. 85.

France bois forêt (FBF) and Syndicat des énergies renouvelables (SER) (2019) *Questions Réponses : Bois énergie*. FBF-SER.

Institut technologique forêt, cellulose, bois-construction, ameublement (FCBA) (2020) *Memento FCBA 2020*. Rapport annuel. FCBA, p. 48.

Franceschini, T. and Schneider, R. (2014) 'Influence of shade tolerance and development stage on the allometry of ten temperate tree species', *Oecologia*, 176(3), pp. 739–749. doi: 10.1007/s00442-014-3050-3.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (1992) *Changement climatique: les évaluations du GIEC de 1990 et 1992 : premier rapport d'évaluation du GIEC : aperçu général et résumés destinés aux décideurs et supplément 1992 du GIEC*. Canada.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (2015) *Changements climatiques 2014: Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]*. GIEC. Genève, Suisse.

Gip-Ecofor (2009) *Présentation de l'expertise, Expertise sur l'avenir du massif forestier des Landes de Gascogne*. Available at: http://landes.gip-ecofor.org/index.php (Accessed: 17 August 2020).

Gosselin, M. *et al.* (2011) 'Actualisation en forêt : pour quelles raisons et à quel taux ?', *Revue Forestière Française*, (4). doi: 10.4267/2042/45828.

Hébert, F. *et al.* (2016) 'Effect of Tree Spacing on Tree Level Volume Growth, Morphology, and Wood Properties in a 25-Year-Old Pinus banksiana Plantation in the Boreal Forest of Quebec', *Forests*, 7(12), p. 276. doi: 10.3390/f7110276.

Husson, H. (2016) 'Reconnaitre la qualité des bois pour la produire : deux initiaties des producteurs : rappel des usages du bois'. *FOGEFOR 64 (Formations à la Gestion Forestière)*, 29 April.

Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) (2013) *Fiche descriptive de la sylvoécorégions F21 des Landes de Gascogne*. Fiche technique. IGN, p. 9.

Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) (2019) *Le mémento : Inventaire forestier : Edition 2019*. Rapport annuel. IGN, p. 36.

Illy, G. and Lemoine, B. (1970) 'Densité de peuplement, concurrence et coopération chez le Pin Maritime I : Premiers résultats d'une plantation à espacement variable', *Annales des sciences forestière, INRA/EDP Science*, 27(2), pp. 127–155.

Union internationale pour la conservation de la nature (IUCN) France (2015) *Bois-énergie et biodiversité forestière*. Paris, France.

Lee, Y.-J. and Lenhart, J. D. (1998) 'Influence of Planting Density on Diameter and Height in East Texas Pine Plantations', *Southern Journal of Applied Forestry*, 22(4), pp. 241–244. doi: 10.1093/sjaf/22.4.241.

Lemoine, B. and Sartolou, A. (1980) 'Densité de peuplement, concurrence et coopération chez le pin maritime II : Résultats à 5 et 10 ans d'une plantation à espacement variable', *Annales des sciences forestières, INRA/EDP Sciences*, 37(3), pp. 217–237.

Lenoir, J.-C. *et al.* (2008) *Grenelle de l'environnement - Comité opérationnel n°10 Plan de développement des énergies renouvelables à haute qualité environnementale : 2008 - 2012 - 2020*. Ministère de l'écologie, de l'environnement et de l'aménagement durables, p. 59.

Lesgourgues, Y. *et al.* (2009) *Tempête du 24 janvier 2009 : Eléments de réfléxion pour aborder la reconstitution forestière du Massif des Landes de Gascogne*. Rapport technique. CRPF d'Aquitaine, p. 134.

Lousteau, D. (2001) *Projet CARBOFOR : Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles : Résumé final*. Programme Gestion et Impact du Changement Climatique (GICC), p. 5.

Martel, S. *et al.* (2019) 'Quel bilan carbone des pinèdes et des douglasaies sous climat changeant ?', *Forêt Entreprise*, (245), pp. 30–38.

Melun, F. (2018) 'L'eucalyptus en France : production des plantations sur 3 rotations', *FCBA INFO*, (10), pp. 1–4.

Meredieu, C. (2002) *PP3, Capsis : Computer-aided projection of strategies in silviculture*. Available at: http://capsis.cirad.fr/capsis/home (Accessed: 17 August 2020).

Meredieu, C. *et al.* (2009) 'Utilisation du logiciel Capsis pour la gestion forestière', *Forêt Entreprise*, (186), pp. 32–36.

Meredieu, C. *et al.* (2019) in *Définir une densité de plantation : comment et pour quels objectifs ? Colloque sur la plantation forestière : avancées récentes de la R&D*, Paris, p. 23.

Ministère chargé des finances (2020) *Taxe foncière sur les propriétés non bâties : impôts 2020*. Direction de l'information légale et administrative (Premier Ministre), p. 12.

Naji, H. *et al.* (2016) 'Effect of intensive planting density on tree growth, wood density and fiber properties of maple (Acer velutinum Boiss.)', *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 9(2), pp. 325–329. doi: 10.3832/ifor1333-008.

Ollivier, P. (2010) 'Les différents types de bois énergie : caractéristiques et approvisionnement', *Forêt méditerranéenne*, XXXI(2), p. 8.

Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC) (2015) *L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change: rapport au Premier ministre et au Parlement*. Paris: La Documentation fraçaise.

Rakotoarison, H. *et al.* (2015) 'Plantations résineuses en conditions forestières : analyse économique des itinéraires dédiés et semi-dédiés pour augmenter la production de bois', *Revue Forestière Française*, LXVII(6), pp. 515–538. doi: 10.4267/2042/60721.

Rigolot, E. and Fernandes, P. (2005) ‘Ecologie du pin maritime en relation avec le feu et gestion des peuplements pour leur protection contre les incendies’, *Forêt méditerranéenne*, XXVI(1), pp. 97–110.

Salminen, H. and Varmola, M. (1993) ‘Influence of initial spacing and planting design on the development of young Scots pine (Pinus sylvestris L.) stands.’, *Silva Fennica*, 27(1), pp. 21–28. doi: 10.14214/sf.a15656.

Shaiek, O. *et al.* (2011) ‘Generalized biomass equations for the main aboveground biomass components of maritime pine across contrasting environments’, *Annals of Forest Science*, 68(3), pp. 443–452. doi: 10.1007/s13595-011-0044-8.

Trichet, P. *et al.* (2019) ‘Gestion combinée du sous bois et de la fertilisation pour améliorer la production des peuplements de pin maritime’, *Les cahiers du Groupe Pin Maritime du Futur*, (6), p. 8.

Vila, B., Vennetier, M. and Nicault, A. (2001) ‘Influence de la densité des peuplements sur la croissance en hauteur et radiale de Pinus sylvestris L. en région méditerranéenne française’, *Forêt méditerranéenne*, XXII(1), pp. 65–74.

Wang, C.-S. *et al.* (2018) ‘Branch Development of Five-Year-Old Betula alnoides Plantations in Response to Planting Density’, *Forests*, 9(1), p. 42. doi: 10.3390/f9010042.

West, P. W. and Smith, R. G. B. (2019) ‘Inter-tree competitive processes during early growth of an experimental plantation of Eucalyptus pilularis in sub-tropical Australia’, *Forest Ecology and Management*, 451, p. 117450. doi: 10.1016/j.foreco.2019.117450.

Yordanova, S. and Migette, J.-C. (2019) *Enquête sur les prix des combustibles bois pour le chauffage industriel et collectif en 2019-2020*. ADEME (Agence de la transition écologique), p. 45.

Zhao, D. *et al.* (2012) ‘Effects of cultural intensity and planting density on stand-level aboveground biomass production and allocation for 12-year-old loblolly pine plantations in the Upper Coastal Plain and Piedmont of the southeastern United States’, *Canadian Journal of Forest Research*, 42(1), pp. 111–122. doi: 10.1139/x11-166.

ANNEXES

LISTE DES ANNEXES :

Annexe i : Méthodologie d'enquête et présentation des contactés 1

Annexe ii : Présentation des schémas de plantation des sites Hourtin, Luglon et Cestas 2

Annexe iii : Densité de plantation théorique et initiale, taux de variation de la densité initiale par rapport à la densité théorique prévue, surface des placettes de mesure, sur Hourtin..……3

Annexe iv : Protocole biomasse appliqué sur Hourtin, source : Gis PMF 4

Annexe v : Taux de mortalité, estimés pour les différentes années de mesure effectuées par INRAE, sur Luglon et Cestas 5

Annexe vi : Table de déclenchement des éclaircies pour le Pin maritime dans le Massif des Landes de Gascogne, développé par Maugé en 1987 5

Annexe vii : Présentation détaillée des différents indicateurs économiques 6

Annexe viii : Courbes de régression appliquées pour estimer les hauteurs manquantes, en fonction des modalités et des types de peuplement (principal/biomasse), sur Hourtin 8

Annexe ix : Vérification graphique des hauteurs et coefficients de forme, estimés à partir des courbes de régression, en fonction des circonférences, sur Hourtin 9

Annexe x: Résultats dendrométriques moyens des tiges à l'échelle du peuplement pour la circonférence, la hauteur, le volume unitaire, production totale du peuplement en volume et en surface terrière, sur Hourtin 10

Annexe xi : Résultats dendrométriques moyens des tiges à l'échelle du peuplement, sur Luglon et Cestas 12

Annexe xii : Taux de mortalité à 9 ans dans les différentes modalités, à l'échelle du peuplement total (biomasse et principal), sur Hourtin 13

Annexe xiii : Synthèses des tests statistiques du coefficient de corrélation de Sperman, sur Hourtin 14

Annexe xiv : Répartition des individus entre les différentes classes de diamètres en fonction de la densité, sur Hourtin, Luglon et Cestas 16

Annexe xv : Boxplots des résultats dendrométriques de circonférence, volume unitaire, hauteur des tiges du peuplement principal des schémas en semi-dédiés, sur Hourtin 17

Annexe xvi: Boxplots des résultats dendrométriques des 300 meilleurs tiges du peuplement principal des schémas semi-dédiés, par rapport aux témoins, sur Hourtin 18

Annexe xvii : Résultats dendrométriques moyens des 300 meilleurs tiges du peuplement principal des schémas semi-dédiés, sur Hourtin 19

Annexe xviii : Gain en accroissement sur le site de référence, synthèses des résultats d'accroissements pour les deux scénarios et retard de croissance pour les deux scénario…..20

Annexe xix : Présentation des schémas semi-dédiés et des répétitions sélectionnés pour les tests statistiques, sur Hourtin..... 21

Annexe xx : Equations des courbes régressions pour estimer la masse brute et anhydre de chaque tiges et vérification graphique des masses estimées, sur Hourtin…….22

Annexe xxi : Taux d'humidité, répartition de la masse au sein des tiges et biomasse espérée dans le peuplement biomasse, selon les modalités à 9 ans, sur Hourtin 22

Annexe xxii : Equation de régression polynomiale de degré 5 utilisées pour estimer le prix de vente des volumes éclaircies, en fonction de leur Vu, sur Hourtin..... 23

Annexe xxiii : Résultat des simulations Capsis/PP3, pour les itinéraires SD et D (récolte finale à 15 ou 20 ans) du site Hourtin 24

Annexe xxiv : Prix minimum de l'énergie (€/MWh) pour compenser le surcout de plantation au vu de la production de biomasse disponible à 9 ans sur Hourtin, pour les différents schémas semi-dédiés et répétition..... 25

Annexe xxv : Classement des résultats économiques (BASIF, ACE, B/C, TIR) pour les modalités SD à l'échelle d'une révolution. 25

Annexe xxvi : Résultat économiques (BASIF, ACE, B/C, TIR) pour les modalités D pour l'énergie à l'échelle d'une révolution, pour une coupe à 15 ou 20 ans 28

Annexe xxvii : Classement des résultats économiques (BASIF, ACE, B/C, TIR), des schémas dédiés pour un débouché bois d'industrie/bois d'œuvre, pour une coupe final à 15 ou 20 ans, à l'échelle du scénario sylvicole..... 30

Annexe i : Méthodologie d'enquête et présentation des contactés

Les entretiens semi-directifs (téléphone, visio, en présentiel) avaient pour but de comprendre le point de vue actuel des différents acteurs, au vu de leur vécu, de leur connaissance personnelle, et des points qui ressortent aujourd'hui. Le choix des enquêtés s'est tourné vers les acteurs directement en lien avec ces peuplements. L'exhaustivité des acteurs n'était pas recherchée, et le choix a été de se focaliser de manière plus importante sur les propriétaires/conseillers et sur les consommateurs. Les enquêtes avaient pour objectifs de ressortir les limites actuelles pour ces peuplements et la perception des acteurs quant à la place de ces itinéraires dans la filière aujourd'hui. La liste des différents enquêtés est présentée ci-dessous :

Groupe 1 : Propriétaires forestiers, gestionnaires forestiers et conseillers forestiers

Nom	**Descriptif**	**Date**
Patrick Lescoutra	Propriétaire de semi-dédié - Listrac-Médoc	03/06/20
François Sauniac	Propriétaire de semi-dédié– Belin Béliet (expérimentation)	18/06/20
Bernard Roumegoux	Propriétaire de semi-dédié – Pissos (expérimentation)	
Joseph Mottais	Propriétaire de semi-dédié et dédié - Casteljaloux	22/06/20
Jean Peragallo	Propriétaire de dédié BIBE - Saumos	25/06/20
Christian Lalanne	Propriétaire de dédié BIBE – Carcan	03/06/20
Jean-François Chazot	Propriétaire de dédié BIBE - Lacanau	03/06/20
M. Gounel	Propriétaire de dédié BIBE – Médoc	05/06/20
Frédéric Lonne-perret	Salarié du Groupement Forestier Mourane – Ygos-St-Saturnin	03/06/20
Julien Goullier	Gestionnaire Forestier Professionnel – Castets - Fondateur et gérant de SylGéCo (Sylviculture Gestion Conseil)	18/06/20
Sébastien Diaz	Directeur adjoint – Grand Sud Ouest - Société forestière CDC	19/06/20
Benjamin Garat	Technicien forestier – Sud-Ouest Lot-et-Garonne - CRPF	19/06/20
Maxime Madore	Conseiller forestier – Médoc - Chambre d'agriculture	15/05/20
Sébastien Barré	Conseiller forestier – Sud-Gironde - Chambre d'agriculture	19/05/20
Sébastien Renoux	Technicien forestier - Bassin d'Arcachon, Médoc - CRPF	20/05/20
Sylvain Bazas	Technicien forestier – Grande-Lande, Pays de Born - CRPF	20/05/20
Cédric Auvin	Conseiller forestier – Cœur Landes - Chambre d'agriculture	25/05/20
Pierre Teyssier	Conseiller forestier – Maransin - Chambre d'agriculture	25/05/20
Thierry Carbonnière	Technicien forestier – Petites Landes - CRPF	27/05/20
Françis Maugard	Responsable milieux littoraux et risques naturels - ONF	05/06/20
Eric Dumontet	Secrétaire général adjoint - Syndicat des Sylviculteurs du Sud-Ouest	30/06/20 10/07/20

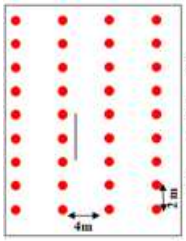
Groupe 2 : Exploitants et consommateurs :

Nom	Descriptif	Date
Sébastien Gourdet	Chargé de mission – Nouvelle-Aquitaine - association des Entreprises de Travaux Forestiers (ETF)	16/06/20
Jean-Bernard Carreau	Expert biomasse – Chef de Cellule Soutien économique et Développement Forestier - DRAAF	05/06/20
Loïc Cotten	Directeur du développement – Alliance Forêt Bois	17/06/20
Frédéric Cruchon	Dirigeant – Bois Energie France - Dalkia	18/06/20
Arnaud Villette	Directeur technique – Smurfit Kappa Comptoir du Pin	30/06/20
Jérôme Guyot	Responsable commercial – ENGIE Cofely	01/07/20
Gabriel Duluc	Salarié - Labouheyre - Cogeland, filiale énergie d'Archimbaud	23/06/20
Guillaume Fargue	Approvisionnement souche – Gascogne Bois	16/06/20

Autres sujets : Simon Martel Ingénieur Forestier Recherche & Innovation IDF-CNPF, spécialisé forêt et carbone (12/06/2020), Gaëlle Abraham Technicienne CRPF spécialisé Pin Teada (15/05/2020)

Annexe ii : Présentation des schémas de plantation des sites Hourtin, Luglon et Cestas

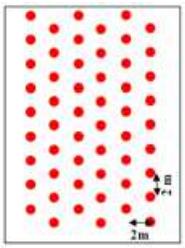
Site Hourtin :



Modalité CD1/ T-4x2-1250

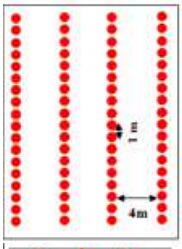
Plantation à 4m x 2m
1250 tiges/ha

TEMOIN



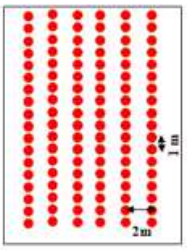
Modalité CD2/ D-2x2-2500

Plantation à 2m x 2m
2500 tiges/ha



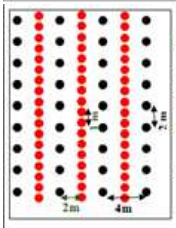
Modalité CD3/ D-4x1-2500

Plantation à 4m x 1m
2500 tiges/ha



Modalité CD4/ D-2x1-5000

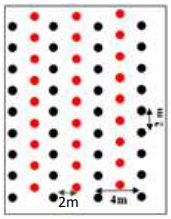
Plantation à 2m x 1m
5000 tiges/ha



Modalité SD1 (*simple ligne*)/ SD-S-2500

Peuplement principal à 4m x 2m (1250 tiges/ha)
Ligne biomasse dans le milieu de l'interligne, 1m sur la ligne (2500 tiges/ha)

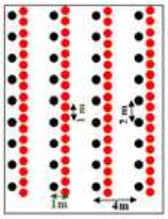
3750 tiges/ha



Modalité SD2 (*simple ligne*)/ SD-S-1250

Peuplement principal à 4m x 2m (1250 tiges/ha)
Ligne biomasse dans le milieu de l'interligne, 2m sur la ligne (1250 tiges/ha)

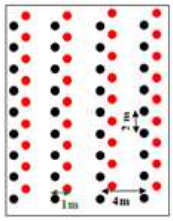
2500 tiges/ha



Modalité SD3 (*double ligne*)/ SD-D-2500

Peuplement principal à 4m x 2m (1250 tiges/ha)
Ligne biomasse à 1m de la ligne principale, 1m sur la ligne (2500 tiges/ha)

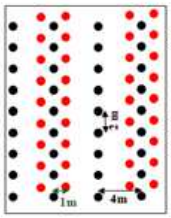
3750 tiges/ha



Modalité SD4 (*double ligne*)/ SD-D-1250

Peuplement principal à 4m x 2m (1250 tiges/ha)
Ligne biomasse à 1m de la ligne principale, 2m sur la ligne (1250 tiges/ha)

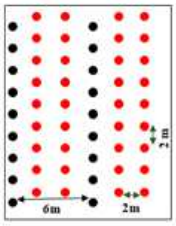
2500 tiges/ha



Modalité SD5 (*triple ligne*)/ SD-T-1250

Peuplement principal à 4m x 2m (1250 tiges/ha)
2 lignes biomasses à 1m de part et d'autres de la ligne principale, 1 ligne principale sur 2, 2m sur la ligne (1250 tiges/ha)

2500 tiges/ha

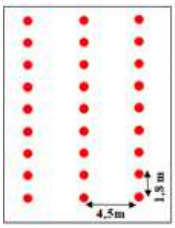


Modalité SD6 (*simple ligne*)/ SD-S-1666

Peuplement principal à 6m x 2m (825 tiges/ha)
2 lignes biomasses dans l'interligne, 2m sur la ligne (1666 tiges/ha)

2500 tiges/ha

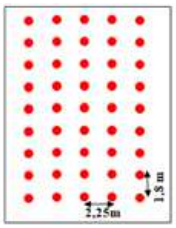
Site Luglon et Cestas :



Modalité CD1/ T-4,5x1,8-1250

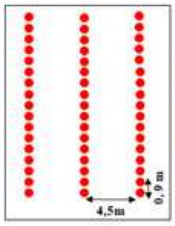
Plantation à 4,5m x 1,8m
1250 tiges/ha

TEMOIN



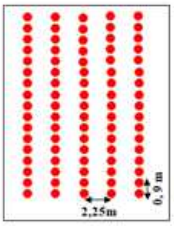
Modalité CD2/ D-2,25x1,8-2500

Plantation à 2,25m x 1,8m
2500 tiges/ha



Modalité CD3/ D-4,5x0,9-2500

Plantation à 4,5m x 0,9m
2500 tiges/ha



Modalité CD4/ D-2,25x0, 9-5000

Plantation à 2,25m x 0,9m
5000 tiges/ha

Annexe iii: Densités de plantation théoriques et initiales, taux de variation de la densité initiale par rapport à la densité théorique prévue, et surface des placettes de mesure, des différentes modalités, sur Hourtin

Hourtin					
Modalité		Densité (tiges/ha)		Variation	Surface placette (ha)
		Théorique	Initiale		
SD-S-2500	SD1_1	3750	3833	2%	0,048
	SD1_2	3750	3333	11%	0,048
SD-S-1250	SD2_2	2500	2521	1%	0,048
	SD2_2	2500	2563	3%	0,048
SD-D-2500	SD3_1	3750	3563	5%	0,048
	SD3_2	3750	3021	19%	0,048
SD-D-1250	SD4_1	2500	2583	3%	0,048
	SD4_2	2500	2521	1%	0,048
SD-T-1250	SD5_1	2500	2472	1%	0,072
	SD5_2	2500	2385	5%	0,096
SD-S-1666	SD6_1	2500	2514	1%	0,072
	SD6_2	2500	2389	4%	0,036
T-4x2-1250	CD1_1	1250	1229	2%	0,048
	CD1_2	1250	1333	7%	0,048
D-2x2-2500	CD2_1	2500	2542	2%	0,048
	CD2_2	2500	2625	5%	0,048
D-4x1-2500	CD3_1	2500	2375	5%	0,048
	CD3_2	2500	2271	9%	0,048
D-2x1-5000	CD4_1	5000	4104	18%	0,048
	CD4_2	5000	4813	4%	0,048
D-2xSemis	Semis_2_1		12125	/	0,024
	Semis_2_2		10208	/	0,024
D-4xSemis	Semis_4_1		2792	/	0,024
	Semis_4_2		4208	/	0,024

Annexe iv : Protocole biomasse appliqué sur Hourtin, source : GIS PMF

Mesures au printemps 2019 : Mesure en plein de tous les arbres des placettes définis après débroussaillage fait par AFB. Mesure des circonférences à 1m30 et mesure de la hauteur pour une ligne (biomasse et peuplement principal) dans chaque modalité.

Sélection des dimensions : Représentation du peuplement en fonction des différentes classes de circonférences. Repérage de classes communes entre les différentes modalités.

➔ Afin d'avoir une plus grande représentation du peuplement, et au vu du temps disponible, il a été défini de sélectionner 2 arbres représentatifs du peuplement biomasse, dans les modalités SD1, SD2, SD3, SD4, dans les classes de circonférences suivantes (à choisir au centre de la classe si possible et sans défaut majeur) :

Modalité	Distance à la ligne du peuplement principal	Nb de tiges à l'ha du peuplement biomasse	15-25	25-35	35-45	45 et +	Total Arbres
SD1	2	2500	2	2	2	2	8
SD2	2	1250	2	2	2	2	8
SD3	1	2500	2	2	2		6
SD4	1	1250	2	2	2	2	8
							30

Figure 1: Répartition des arbres échantillons à prélever

Marquage Janvier 2020 : Repérage par un numéro de 1 à 30 des arbres échantillons pour l'évaluation de la biomasse (modalités SD1, SD2, SD3, SD4 sur la répétition 1, cf tableau ci-dessus) + marquage des lignes à couper et à garder (rouge= à couper (biomasse), blanc= à conserver (peuplement principal)

Échantillonnage Janvier-Février 2020:

a) Sur le terrain :

➔ **Abattage des arbres sélectionnés** (pas de fourche) dans la répétition 1 des modalités SD1à SD4. Ne pas faire les campagnes de biomasse un jour de pluie.

➔ **Découpe et pesé des branches par arbre échantillon** :

- Retirer toutes les branches mortes et les peser
- Retirer toutes les branches vivantes et les peser
- Prélever un échantillon de branche vivante moyenne et un échantillon de branche morte à ramener au labo

➔ **Mesures au sol** (repérer avec de la peinture pour faciliter le tronçonnage ensuite) :

- Hauteur totale
- Hauteur découpe bois marchand (7 cm diamètre, 21 cm de circonférence)
- Hauteur première branche verte
- Circonférences : souche, 1m30, puis tous les 1m ou 1m50 en fonction de la hauteur de découpe totale (2 à 3 billons max entre 1m30 et hauteur de découpe), circonférence sous la première branche vivante

➔ **Découpage du tronc :**

- billon1 : 0 – 130cm
- x bilons entre 130 cm et hauteur de découpe 7 cm (billons de 1m à 1.5 m, max 3 billons)
- billon n : découpe 7 cm- sommet de l'arbre

Le découpage s'effectue à tous les endroits où des mesures de circonférences auront été effectuées. Découpage de rondelles à l'extrémité de chaque billon découpé (souche, 1 m 30, tous les 1 m ou 1.5m, diamètre 7 cm) à ramener au labo.

➔ **Pesées du bois en frais :**

- Du bois non marchand (<7 cm de diamètre)
- Du bois marchand (par billon), ne pas oublier de peser les rondelles !

b) En laboratoire

➔ **Pesées des échantillons frais**

Remarque : si les pesées des échantillons frais ne peuvent pas se faire dans l'immédiat, **entreposage en chambre frigorifique** pendant le temps le plus court possible en attendant les pesées en frais.

➔ **Etuvage à 103°C** : jusqu'à l'absence de modification du poids sec.

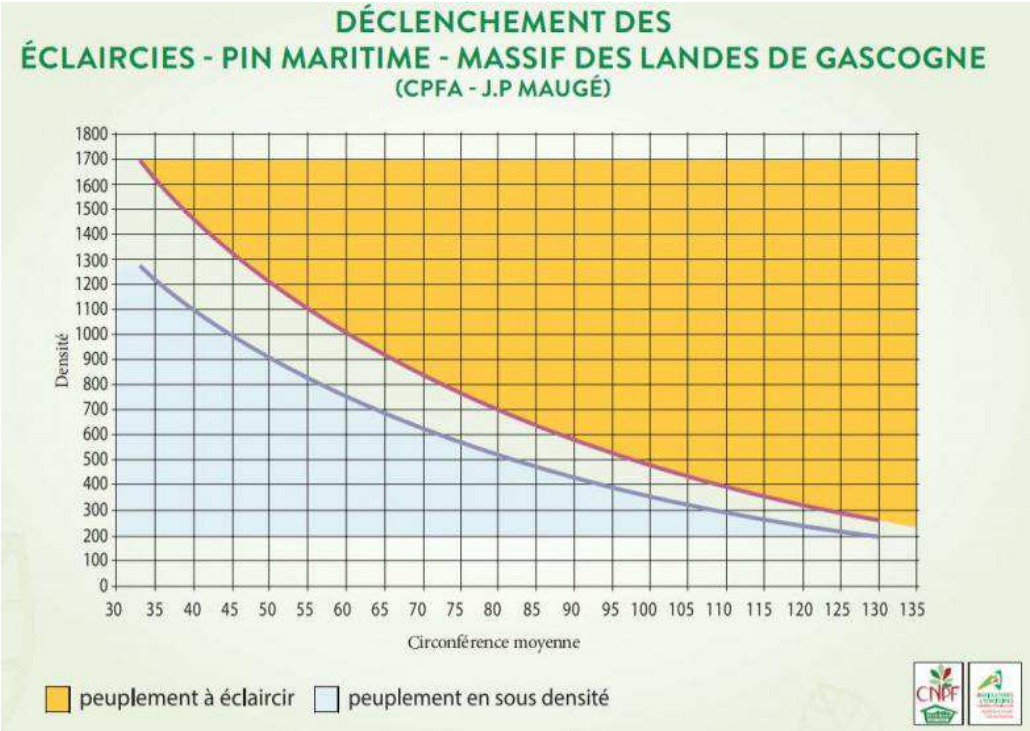
➔ **Pesées des échantillons en sec**

Annexe v : Taux de mortalité (%), estimés pour les différentes années de mesure effectuées par INRAE, pour les différentes modalités, sur Luglon et Cestas

Luglon								
Modalite		Plantation	3 ans		5 ans		7 ans	
		Densité	Densité	Mortalité	Densité	Mortalité	Densité	Mortalité
D-4,5 X 1,8-1250	CD1_1	1250	1226	2%	1226	2%	1226	2%
	CD1_2	1250	1208	3%	1196	4%	1196	4%
D-2,25 X 1,8-2500	CD2_1	2500	2416	3%	2404	4%	2386	5%
	CD2_2	2500	2398	4%	2380	5%	2362	6%
D-4,5 X 0,9-2500	CD3_1	2500	2404	4%	2398	4%	2380	5%
	CD3_2	2500	2296	8%	2296	8%	2284	9%
D-2,25 X 0,9-5000	CD4_1	5000	4755	5%	4749	5%	4724	6%
	CD4_2	5000	4853	3%	4816	4%	4786	4%

Cestas								
Modalite		Plantation	3 ans		5 ans		7 ans	
		Densité	Densité	Mortalité	Densité	Mortalité	Densité	Mortalité
D-4,5 X 1,8-1250	CD1_1	1250	1244	0%	1232	1%	1226	2%
	CD1_2	1250	1250	0%	1184	5%	1172	6%
D-2,25 X 1,8-2500	CD2_1	2500	2470	1%	2380	5%	2356	6%
	CD2_2	2500	2500	0%	2464	1%	2452	2%
D-4,5 X 0,9-2500	CD3_1	2500	2452	2%	2290	8%	2248	10%
	CD3_2	2500	2452	2%	2428	3%	2422	3%
D-2,25 X 0,9-5000	CD4_1	5000	5000	0%	4896	2%	4877	2%
	CD4_2	5000	4994	0%	4914	2%	4896	2%

Annexe vi : Table de déclenchement des éclaircies pour le Pin maritime dans le Massif des Landes de Gascogne, développé par Maugé en 1987, à disposition sur le site du CRPF Nouvelle-Aquitaine, https://nouvelle-aquitaine.cnpf.fr/n/pins/n:2424#p6228



Annexe vii : Présentation détaillée des différents indicateurs économiques utilisés pour l'analyse économique du site Hourtin

Différents paramètres sont nécessaires pour obtenir les indicateurs économiques :

- k : l'année où la recette ou la dépense est réalisée

- n : la durée de révolution

- i : le taux d'actualisation qui permet de donner une valeur au temps

- Vn : la valeur nette du peuplement à un âge donné[12] correspond à l'équivalent à l'âge n du peuplement, du profit réalisé, où chaque dépense et recette des k années précédentes sont actualisées à l'année n

$$\boldsymbol{Vn = (1+i)^{n-k} * (\sum_{k=0}^{n} Recettes - \sum_{k=0}^{n} Coûts)}$$

- BASF : le bénéfice actualisé simple, prenant en compte la valeur du fond de terrain. Il correspond à l'équivalent à l'âge 0 du peuplement du profit réalisé pour un projet d'une durée de révolution n, où chaque dépense et recette sont actualisées.

$$\boldsymbol{BASF = \frac{Vn}{(1+i)^n}}$$

A partir des différentes recettes et dépenses survenues lors des itinéraires sylvicoles et des formules correspondantes, les résultats pour ces différents indicateurs économiques sont obtenus :

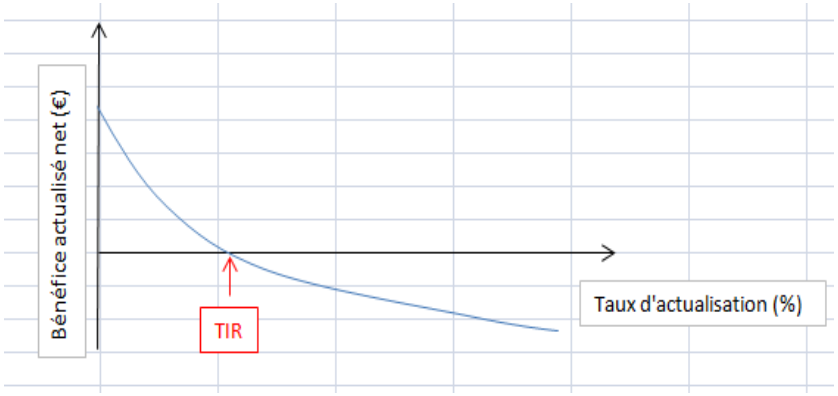
L'annuité constance équivalente (ACE) en €/ha/an : transformation en annuités constantes fictives de toutes les recettes et dépenses du scénario sylvicole, actualisées à l'âge 0 du peuplement. Cette annuité correspond à la rente perçue annuellement par le propriétaire, au vu des recettes et des dépenses envisagées dans le scénario sylvicole. Cet indicateur a la capacité de comparer des projets de durée différente. Le résultat reste cependant théorique car le retour sur investissement en forêt ne se fait pas de manière annuelle et constante. Cet indicateur est utilisé depuis plusieurs années dans le cadre de réunions du CETEF des Landes de Gascogne.

$$\mathbf{ACE} = \boldsymbol{\frac{BASF * i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}}$$

*Le critère de Faustmann (*bénéfice net actualisé en séquence infinie (BASIF)) : estimation du BASF sur une succession infinie de révolutions. Cela permet ainsi de comparer des scénarios de révolutions différentes.

$$\mathbf{BASIF} = \boldsymbol{BASF} * \frac{(\mathbf{1}+\boldsymbol{i})^{\boldsymbol{n}}}{(\mathbf{1}+\boldsymbol{i})^{\boldsymbol{n}}-\mathbf{1}}$$

Le taux interne de rentabilité (TIR) en pourcentage : taux d'actualisation pour lequel le bénéfice actualisé simple devient nul. Cela correspond au taux réel de placement, prenant en compte toutes les recettes et dépenses sur la durée du scénario. Cependant, il a tendance à favoriser les révolutions les plus courtes. C'est un indicateur utilisé par un certain nombre d'acteurs sur le massif des Landes de Gascogne.



Estimation du TIR en fonction du taux d'actualisation (%) et du bénéfice net actualisé (€)

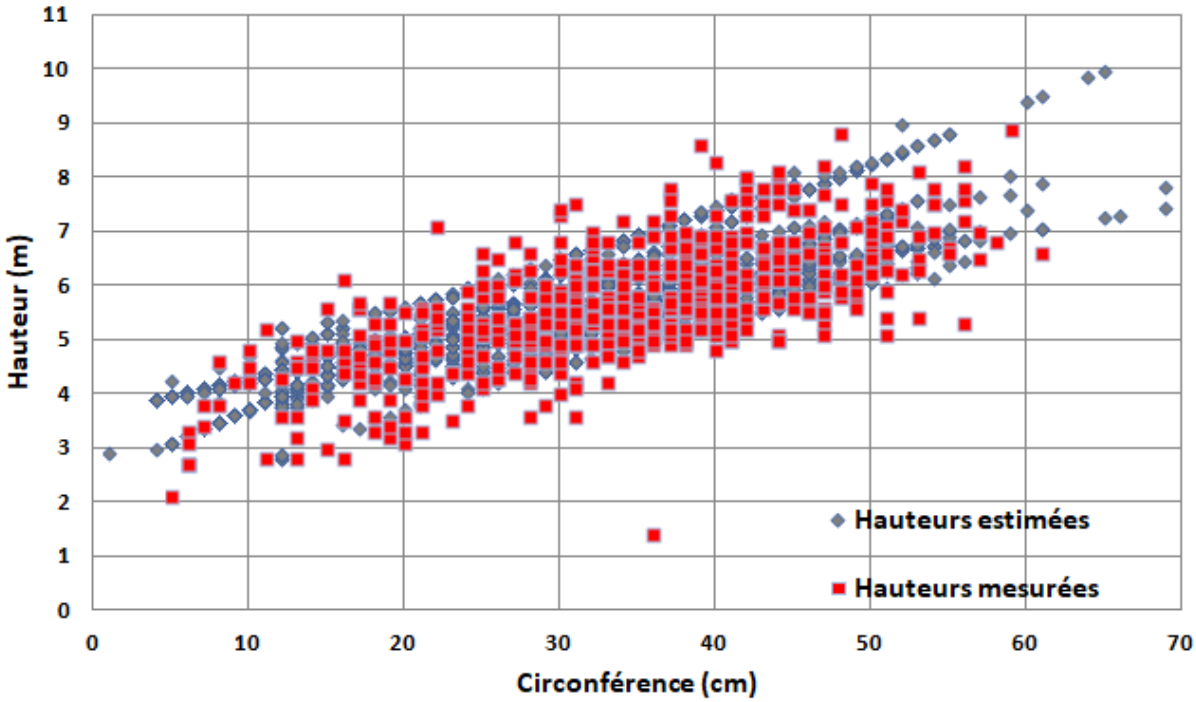
Le ratio bénéfice sur coût (B/C) en € : somme des bénéfices sur la somme des coûts actualisés à l'âge 0 du peuplement. Ce ratio a été utilisé au vu de sa facilité de compréhension.

$$B/C = \sum \frac{R_n}{(1+i)^n} \Big/ \sum \frac{C_n}{(1+i)^n}$$

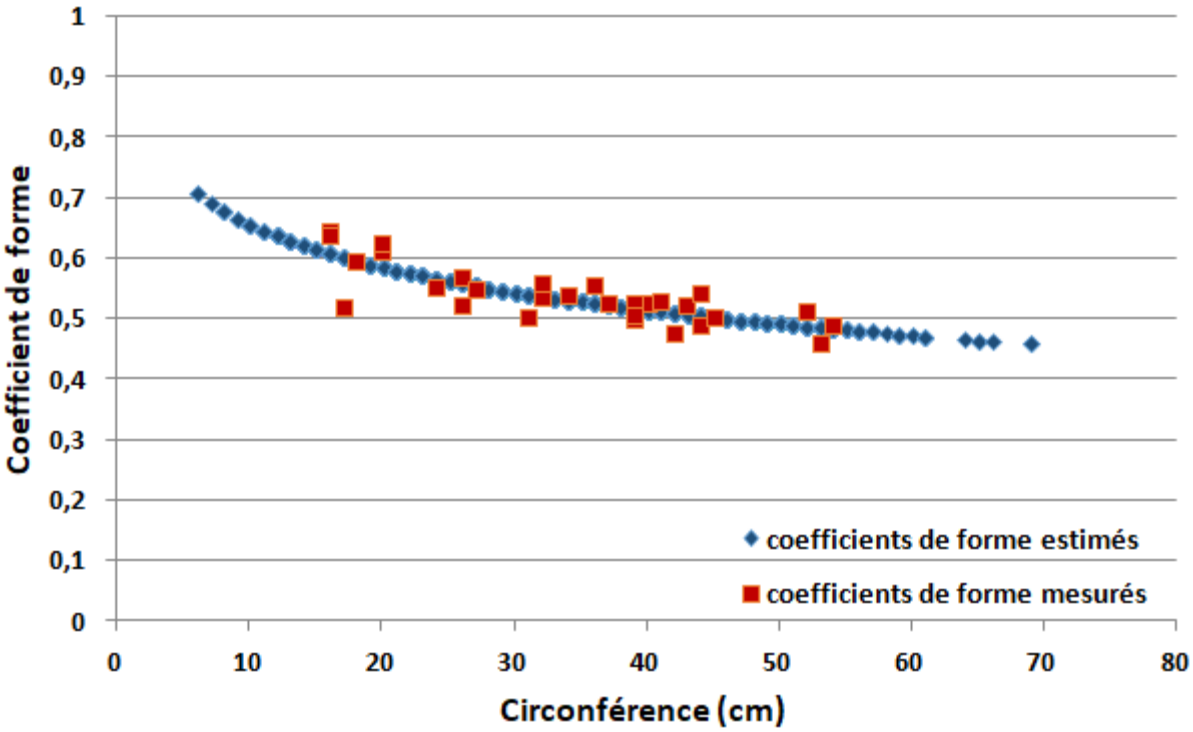
Annexe viii : Courbes de régression appliquées pour estimer les hauteurs manquantes, en fonction des modalités et des types de peuplement (principal/biomasse), pour les schémas dédiés et semi-dédiés, sur Hourtin

Hourtin							
Modalité		Biomasse			Principal		
		équation	R^2	n	équation	R^2	n
SD-S-2500	SD1_1	$y = 22{,}59x^{0{,}26}$	0.46	29	$y = 12{,}69x^{0{,}40}$	0.75	14
	SD1_2	$y = 18{,}86x^{0{,}33}$	0.14	21	$y = 30{,}79x^{0{,}18}$	0.16	11
SD-S-1250	SD2_2	$y = 15{,}37x^{0{,}36}$	0.45	14	$y = 12{,}59x^{0{,}42}$	0.63	14
	SD2_2	$y = 33{,}09x^{0{,}13}$	0.11	14	$y = 12{,}05x^{0{,}41}$	0.51	13
SD-D-2500	SD3_1	$y = 21{,}70x^{0{,}31}$	0.35	25	$y = 20{,}48x^{0{,}3\&}$	0.37	10
	SD3_2	$y = 25{,}91x^{0{,}22}$	0.38	20	$y = 24{,}44x^{0{,}24}$	0.21	10
SD-D-1250	SD4_1	$y = 18{,}12x^{0{,}32}$	0.47	10	$y = 14{,}28x^{0{,}37}$	0.55	13
	SD4_2	$y = 11{,}48x^{0{,}43}$	0.74	11	$y = 13{,}89x^{0{,}39}$	0.18	13
SD-T-1250	SD5_1	$y = 13{,}96x^{0{,}39}$	0.74	12	$y = 13{,}64x^{0{,}40}$	0.39	29
	SD5_2	$y = 4{,}86x^{0{,}68}$	0.51	10	$y = 4{,}87x^{0{,}67}$	0.82	23
SD-S-1666	SD6_1	$y = 11{,}05x^{0{,}44}$	0.42	15	$y = 6{,}42x^{0{,}57}$	0.61	13
	SD6_2	$y = 27{,}09x^{0{,}19}$	0.32	12	$y = 9{,}38x^{0{,}47}$	0.87	13
T-4x2-1250	CD1_1	$y = 13{,}30x^{0{,}43}$	0.60	28			
	CD1_2	$y = 6{,}08x^{0{,}63}$	0.76	27			
D-2x2-2500	CD2_1	$y = 18{,}61x^{0{,}32}$	0.13	22			
	CD2_2	$y = 9{,}94x^{0{,}50}$	0.55	19			
D-4x1-2500	CD3_1	$y = 17{,}82x^{0{,}31}$	0.43	18			
	CD3_2	$y = 10{,}29x^{0{,}47}$	0.66	25			
D-2x1-5000	CD4_1	$y = 9{,}08x^{0{,}55}$	0.73	17			
	CD4_2	$y = 15{,}02x^{0{,}43}$	0.82	23			
D-2xSemis	Semis_2_1	$y = 21{,}34x^{0{,}29}$	0.23	38			
	Semis_2_2	$y = 13{,}05x^{0{,}45}$	0.83	18			
D-4xSemis	Semis_4_1	$y = 13{,}41x^{0{,}41}$	0.80	10			
	Semis_4_2	$y = 16{,}31x^{0{,}36}$	0.72	13			

Annexe ix : Vérification graphique des hauteurs et coefficients de forme, estimés à partir des courbes de régression, en fonction des circonférences, sur Hourtin



Hauteurs estimées et mesurées (m) en fonction de la circonférence (cm) sur Hourtin à 9 ans



Coefficients de forme estimés et mesurés en fonction de la circonférence (cm) sur Hourtin à 9 ans

Annexe x: Résultats dendrométriques moyens des tiges à l'échelle du peuplement pour la circonférence (C 1m30), la hauteur (H), le volume unitaire (Vu), production totale du peuplement en volume (V) et en surface terrière (G), selon les modalités et les types de peuplements (biomasse, principal et total), sur Hourtin à 9 ans

Résultats pour les cultures semi-dédiées sur Hourtin à 9 ans :

Hourtin : Données pour les cultures semi-dédiées : Peuplement total									
Modalité		Densité (tiges/ha)		Résultats dendrométriques moyen en 2019					
		Théorique	En 2019	C 1m30 (cm)	H (m)	G (m^2)	V (m3/ha)	Vu (dm3)	Facteur d'élancement
SD-S-2500	SD1_1	3750	3708	31	5,2	30	88	24	54
	SD1_2	3750	2875	32	5,9	25	79	28	58
SD-S-1250	SD2_2	2500	2333	33	5,5	21	64	27	53
	SD2_2	2500	2250	34	5,2	22	63	28	48
SD-D-2500	SD3_1	3750	3229	32	6,1	27	93	29	61
	SD3_2	3750	2542	32	5,6	22	67	26	54
SD-D-1250	SD4_1	2500	2292	37	5,6	26	78	34	48
	SD4_2	2500	1854	37	5,5	22	63	34	47
SD-T-1250	SD5_1	2500	1847	35	5,6	20	62	34	50
	SD5_2	2500	1740	35	5,3	18	56	32	48
SD-S-1666	SD6_1	2500	2403	35	5,0	25	67	28	45
	SD6_2	2500	1889	34	5,0	19	52	27	45

Hourtin : Données pour les cultures semi-dédiées : Peuplement biomasse									
Modalité		Densité (tiges/ha)		Résultats dendrométriques moyen en 2019					
		Théorique	En 2019	C 1m30 (cm)	H (m)	G (m^2)	V (m3/ha)	Vu (dm3)	Facteur d'élancement
SD-S-2500	SD1_1	2500	2438	31	5,4	20	60	25	55
	SD1_2	2500	1875	32	6,0	16	51	27	59
SD-S-1250	SD2_2	1250	1208	31	5,3	10	28	23	51
	SD2_2	1250	1167	34	5,2	11	32	27	48
SD-D-2500	SD3_1	2500	2146	32	6,3	18	62	29	62
	SD3_2	2500	1563	32	5,6	13	39	25	54
SD-D-1250	SD4_1	1250	1229	37	5,7	14	42	34	48
	SD4_2	1250	729	39	5,6	9	27	37	47
SD-T-1250	SD5_1	1250	861	33	5,4	9	26	30	48
	SD5_2	1250	875	36	5,4	10	29	33	50
SD-S-1666	SD6_1	1667	1569	35	5,1	16	44	28	46
	SD6_2	1667	1194	34	5,1	12	33	28	46

Hourtin : Données pour les cultures semi-dédiées : Peuplement principal									
Modalité		Densité (tiges/ha)		Résultats dendrométriques moyen en 2019					
		Théorique	En 2019	C 1m30 (cm)	H (m)	G (m^2)	V (m3/ha)	Vu (dm3)	Facteur d'élancement
SD-S-2500	SD1_1	1250	1271	29	4,9	10	27	22	50
	SD1_2	1250	1000	33	5,7	9	28	28	57
SD-S-1250	SD2_2	1250	1125	35	5,6	12	36	32	54
	SD2_2	1250	1083	35	5,1	11	31	29	47
SD-D-2500	SD3_1	1250	1083	32	5,9	10	31	29	59
	SD3_2	1250	979	34	5,6	9	28	29	55
SD-D-1250	SD4_1	1250	1063	37	5,4	12	35	33	47
	SD4_2	1250	1125	36	5,4	12	36	32	46
SD-T-1250	SD5_1	1250	986	37	5,7	12	36	37	52
	SD5_2	1250	865	34	5,1	9	25	29	46
SD-S-1666	SD6_1	833	833	35	4,8	9	23	27	44
	SD6_2	833	694	34	4,9	7	19	27	45

<u>Résultats pour les cultures dédiées sur Hourtin à 9 ans :</u>

Hourtin : Données pour les cultures dédiées par plantation et par semis									
Modalité		Densité (tiges/ha)		Résultats dendrométriques moyen en 2019					
		Théorique	En 2019	C 1m30 (cm)	H (m)	G (m^2)	V (m3/ha)	Vu (dm3)	Facteur d'élancement
T-4x2-1250	CD1_1	1250	1083	42	6,6	16	56	51	49
	CD1_2	1250	1125	42	6,5	17	58	51	48
D-2x2-2500	CD2_1	2500	1917	42	6,2	29	93	49	47
	CD2_2	2500	1875	36	6,0	21	70	38	53
D-4x1-2500	CD3_1	2500	1646	34	5,4	16	45	28	51
	CD3_2	2500	1583	40	5,9	22	67	42	46
D-2x1-5000	CD4_1	5000	2979	36	6,5	33	125	42	58
	CD4_2	5000	4146	32	6,6	37	137	33	65
D-2xSemis	Semis_2_1		12125	15	4,4	29	87	7	99
	Semis_2_2		10208	17	4,6	31	102	10	85
D-4xSemis	Semis_4_1		2542	29	5,2	20	60	24	57
	Semis_4_2		4042	23	4,8	21	64	16	69

Annexe xi : Résultats dendrométriques moyens des tiges à l'échelle du peuplement pour la circonférence et la hauteur, en fonction des modalités et des âges de mesure, sur Luglon et Cestas

Résultats pour les cultures dédiées sur Luglon :

Luglon						
Modalité		Hauteur (m)			Circonférence (cm)	
		3 ans	5 ans	7 ans	5 ans	7 ans
D-4,5 X 1,8-1250	CD1_1	1,4	3,4	5,8	22	31
	CD1_2	1,3	2,9	5,4	17	27
D-2,25 X 1,8-2500	CD2_1	1,3	3,1	5,3	18	25
	CD2_2	1,2	2,7	5,0	16	24
D-4,5 X 0,9-2500	CD3_1	1,3	3,1	5,4	18	24
	CD3_2	1,2	2,9	5,3	17	24
D-2,25 X 0,9-5000	CD4_1	1,2	2,9	5,1	17	21
	CD4_2	1,3	2,9	5,1	15	21

Résultats pour les cultures dédiées sur Cestas :

Cestas					
Modalité		Hauteur (m)		Circonférence (cm)	
		5 ans	7 ans	5 ans	7 ans
D-4,5 X 1,8-1250	CD1_1	3,5	5,4	15	29
	CD1_2	3,5	5,5	15	28
D-2,25 X 1,8-2500	CD2_1	3,3	5,1	14	25
	CD2_2	3,3	5,1	14	25
D-4,5 X 0,9-2500	CD3_1	3,5	5,3	14	26
	CD3_2	3,5	5,3	14	25
D-2,25 X 0,9-5000	CD4_1	3,2	4,8	12	20
	CD4_2	3,5	5,4	14	23

Annexe xii : Taux de mortalité à 9 ans dans les différentes modalités, à l'échelle du peuplement total (biomasse et principal), sur Hourtin

Hourtin				
Modalité		Densité (tiges/ha)		Mortalité
		Initiale	En 2019	
SD-S-2500	SD1_1	3833	3708	3%
	SD1_2	3333	2875	14%
SD-S-1250	SD2_2	2521	2333	7%
	SD2_2	2563	2250	12%
SD-D-2500	SD3_1	3563	3229	9%
	SD3_2	3021	2542	16%
SD-D-1250	SD4_1	2583	2292	11%
	SD4_2	2521	1854	26%
SD-T-1250	SD5_1	2472	1847	25%
	SD5_2	2385	1740	27%
SD-S-1666	SD6_1	2514	2403	4%
	SD6_2	2389	1889	21%
T-4x2-1250	CD1_1	1229	1083	12%
	CD1_2	1333	1125	16%
D-2x2-2500	CD2_1	2542	1917	25%
	CD2_2	2625	1875	29%
D-4x1-2500	CD3_1	2375	1646	31%
	CD3_2	2271	1583	30%
D-2x1-5000	CD4_1	4104	2979	27%
	CD4_2	4813	4146	14%
D-2xSemis	Semis_2_1	12125	12125	0%
	Semis_2_2	10208	10208	0%
D-4xSemis	Semis_4_1	2792	2542	9%
	Semis_4_2	4208	4042	4%

Annexe xiii : Synthèses des tests statistiques du coefficient de corrélation de Sperman réalisées pour évaluer la relation densité et circonférence, hauteur, volume unitaire, facteur d'élancement, et surface terrière, sur Hourtin, Luglon et Cestas, pour les différents âges de mesure

Résultats pour la circonférence :

Résultat circonférence / densité	Hourtin	Luglon		Cestas	
	9 ans	5 ans	7 ans	5 ans	7 ans
Moyenne	rho= -0.79	Non signif.	rho = -0.74	rho = -0.93	rho = -0.93
Médiane	rho= -0.83	Non signif.	rho = -0.74	rho = -0.97	rho = -0.93
Minimum	rho= -0.62	Non signif.	Non signif.	Non signif.	rho = -0.95
Maximum	Non signif.	Non signif.	Non signif.	Non signif.	rho = -0.86
Coefficient de variation	rho= 0.51	Non signif.	Rho = 0.74	Non signif.	Non signif.

Résultat accroissement en circonférence / densité	Luglon		Cestas	
	0 à 5 ans	5 à 7 ans	0 à 5 ans	5 à 7 ans
Moyenne	Non signif.	rho = -0.93	rho = -0.95	rho = -0.88
Médiane	Non signif.	rho = -0.93	rho = -0.97	rho = -0.81
Minimum	Non signif.	Non signif.	Non signif.	rho = -0.90
Maximum	Non signif.	Non signif.	Non signif.	Non signif.
Coefficient de variation	Non signif.	rho = 0.95	Non signif	Rho = 0.73

Résultats pour la hauteur :

Résultat hauteur / densité	Hourtin	Luglon			Cestas	
	9 ans	3 ans	5 ans	7 ans	5 ans	7 ans
Moyenne	Non signif.	Non signif.	Non signif.	Non signif.	rho = -0.79	Non signif.
Médiane	Non signif.	Non signif.	Non signif.	Non signif.	Non signif.	Non signif.
Minimum	Non signif.	Non signif.	rho = -0.74	Non signif.	Non signif.	Non signif.
Maximum	Non signif.	rho = -0.74	Non signif.	Non signif.	Non signif.	Non signif.
Coefficient de variation	Non signif.	Non signif.	Non signif.	Non signif.	Non signif.	Non signif.

Résultat accroissement en hauteur / densité	Luglon			Cestas	
	0 à 3 ans	3 à 5 ans	5 à 7 ans	0 à 5 ans	5 à 7 ans
Moyenne	Non signif.	Non signif.	rho = -0.95	Non signif.	Non signif.
Médiane	Non signif.	Non signif.	rho = -0.97	rho = - 0.73	Non signif.
Minimum	Non signif.	Non signif.	Non signif.	Non signif.	Non signif.
Maximum	rho = 0.74	Non signif.	Non signif.	Non signif.	Non signif.
Coefficient de variation	Non signif.	Non signif.	Rho = 0.93	Non signif.	Non signif.

Résultats pour la surface terrière :

Résultat surface terrière / densité	Hourtin	Luglon		Cestas	
	9 ans	5 ans	7 ans	5 ans	7 ans
Total	rho= 0.79	rho = 0.93	rho = 0.97	rho = 0.93	rho = 0.93

Résultat accroissement en surface terrière / densité	Luglon		Cestas	
	0 à 5 ans	5 à 7 ans	0 à 5 ans	5 à 7 ans
Total	rho = 0.93	rho = 0.90	rho = 0.93	rho = 0.91

Résultats pour l'élancement :

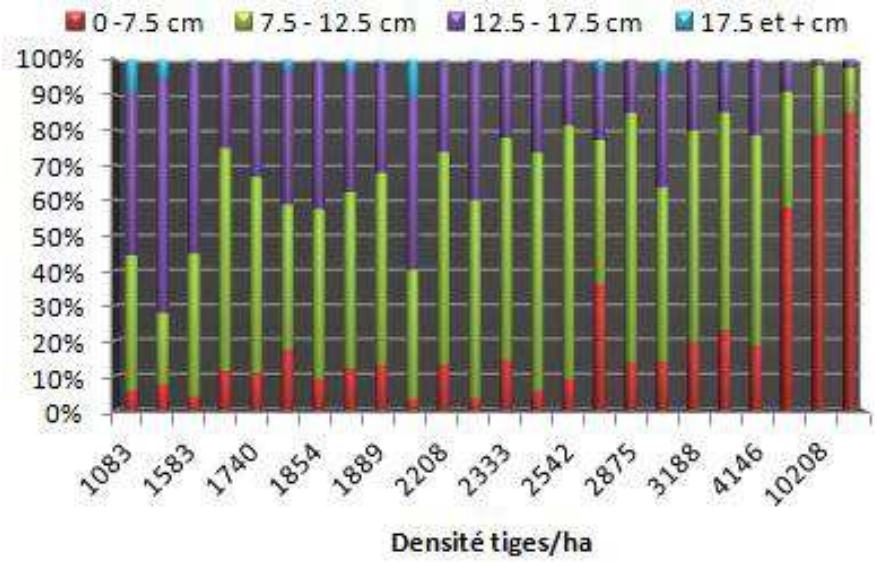
Résultat élancement / densité	Hourtin	Luglon		Cestas	
	9 ans	5 ans	7 ans	5 ans	7 ans
Moyenne	rho= 0.74	Non signif.	rho= 0.86	rho= 0.83	rho= 0.83
Médiane	rho= 0.75	Non signif.	rho= 0.86	Non signif.	rho= 0.83
Minimum	rho= 0.49	Non signif.	Non signif.	Non signif.	Non signif.
Maximum	rho= 0.69	rho= 0.91	rho= 0.83	rho= 0.81	rho= 0.91
Coefficient de variation	Non signif.	Non signif.	Non signif	Non signif.	Non signif.

Résultats pour le volume unitaire :

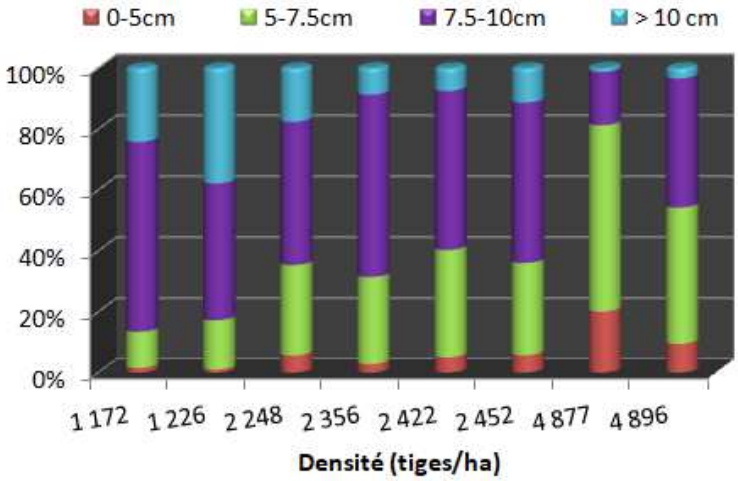
Résultat volume unitaire / densité	Hourtin
	9 ans
Moyenne	rho= -0.73
Médiane	rho= -0.74
Minimum	rho= -0.59
Maximum	Non signif.
Coefficient de variation	rho= 0.52

Annexe xiv : Répartition des individus entre les différentes classes de diamètres en fonction de la densité, Hourtin à 9 ans, Cestas et Luglon à 7 ans

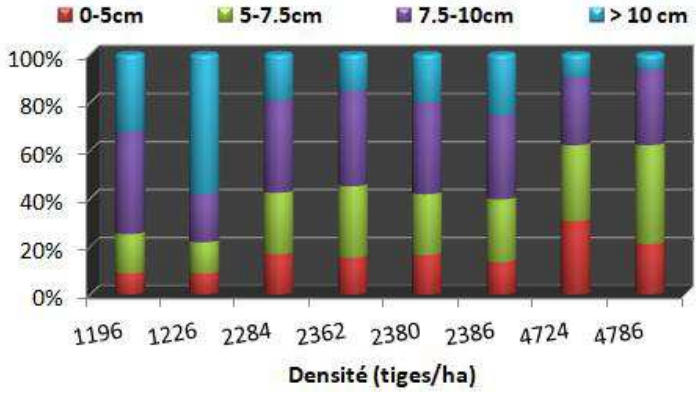
Hourtin 9 ans



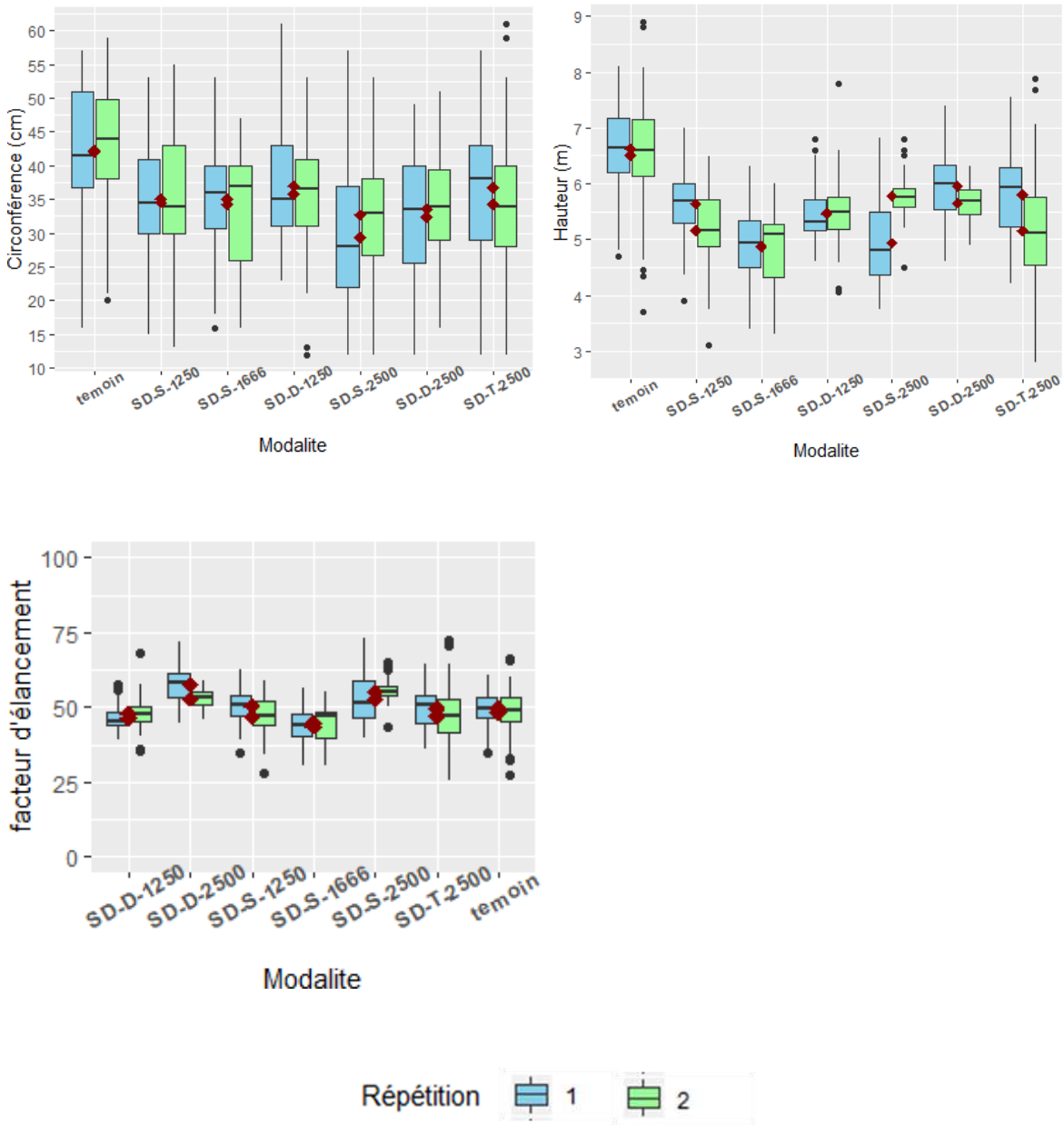
Cestas 7 ans



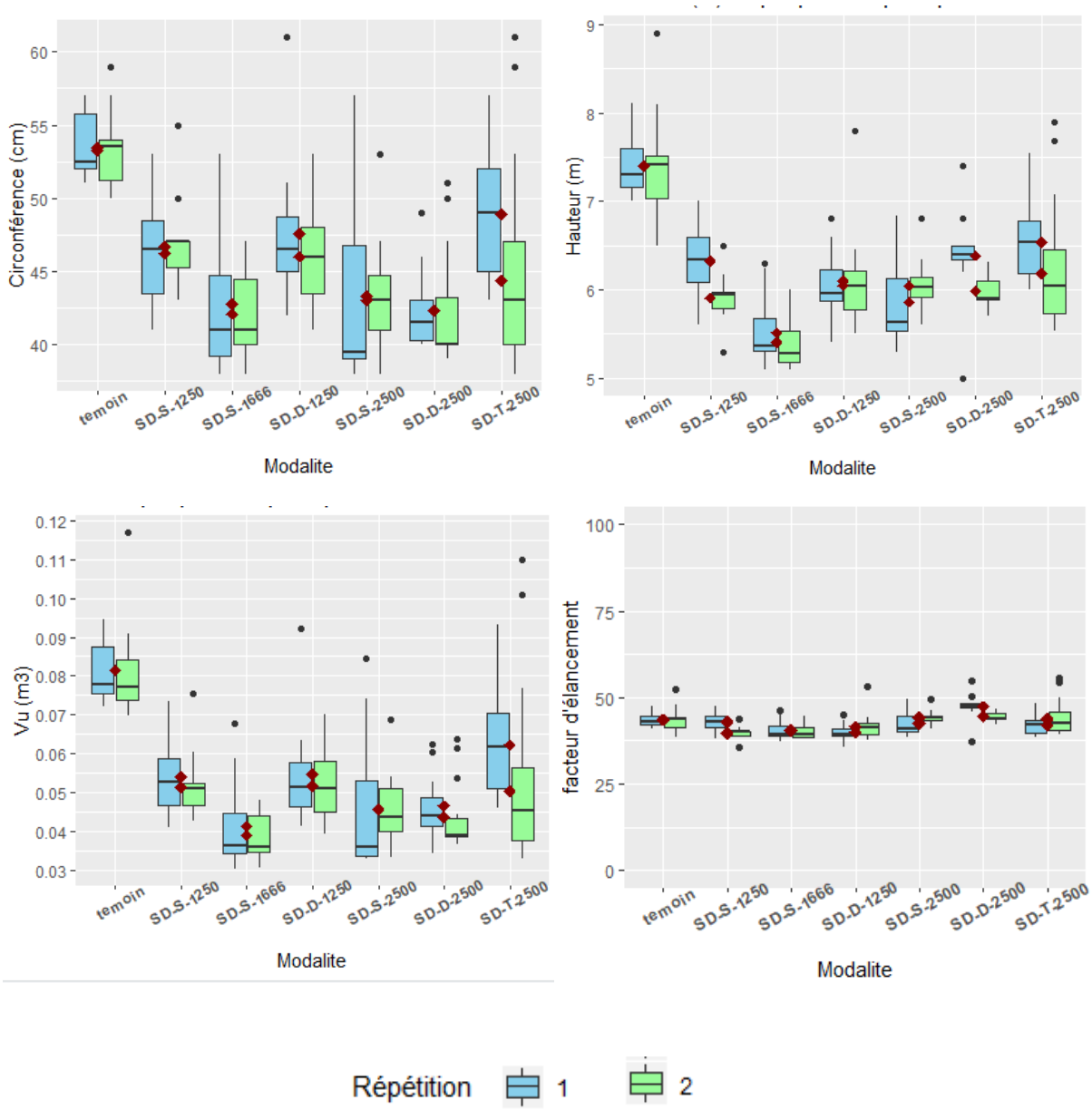
Luglon 7 ans :



Annexe xv : Boxplots des résultats dendrométriques de circonférence, volume unitaire, hauteur des tiges du peuplement principal des schémas en semi-dédiés, par rapport aux témoins, sur Hourtin à 9 ans



Annexe xvi: Boxplots des résultats dendrométriques de circonférence, hauteur, volume unitaire, élancement des 300 meilleures tiges du peuplement principal des schémas semi-dédiés, par rapport aux témoins, sur Hourtin à 9 ans



Annexe xvii : Résultats dendrométriques moyens en circonférence (C 1m30), hauteur (H), volume unitaire (Vu), surface terrière (G) et en élancement, des 300 meilleures tiges du peuplement principal des schémas semi-dédiés, sur Hourtin à 9 ans

Modalité		C 1m30 (cm)	H (m)	Vu (dm3)	G (m^2)	Facteur d'élancement
Témoin	CD1_1	53	7,4	82	7	44
	CD1_2	53	7,4	81	7	44
SD-S-2500	SD1_1	43	5,9	46	5	43
	SD1_2	43	6,0	46	4	44
SD-S-1250	SD2_2	46	6,3	54	5	43
	SD2_2	47	5,9	51	5	40
SD-D-2500	SD3_1	42	6,4	47	4	47
	SD3_2	42	6,0	44	4	44
SD-D-1250	SD4_1	48	6,0	55	5	40
	SD4_2	46	6,1	52	5	42
SD-T-1250	SD5_1	49	6,5	62	6	42
	SD5_2	44	6,2	50	5	44
SD-S-1666	SD6_1	43	5,5	41	4	41
	SD6_2	42	5,4	39	4	40

Annexe xviii : Gains en accroissement estimés sur le site de référence utilisé pour simuler la réaction de croissance du peuplement principal des schémas semi-dédiés après coupe du bois énergie (scénario 2), synthèses des résultats d'accroissements utilisés pour les deux scénarios et du retard de croissance estimés pour les deux scénarios, pour la hauteur et la circonférence, par rapport au moins bon témoin, sur Hourtin.

Résultats dendrométriques moyens du site Sabres et de l'accroissement par an en circonférence et en hauteur, à 8 ans, avant coupe BE, et à 11 ans, 3 années après la coupe de bois énergie :

Sabres	Résultat moyen à		Accroissement annuel		
	8 ans	11 ans	avant coupe BE	après coupe BE	gain estimé
C 1m 30 (cm)	24	37	3,0	4,3	44%
Hauteur (m)	5,3	7,8	0,7	0,8	26%

Résultats d'accroissement par an estimés pour les scénarios 1 et 2, pour la circonférence et la hauteur des différentes modalités, du peuplement principal des cultures semi-dédiés :

Modalité		Circonférence (cm)		Hauteur (m)	
		Accroissement annuel		Accroissement annuel	
		Scénario 1	Scénario 2	Scénario 1	Scénario 2
SD-S-2500	SD1_1	3,3	4,7	0,5	0,7
	SD1_2	3,6	5,3	0,6	0,8
SD-S-1250	SD2_1	3,9	5,6	0,6	0,8
	SD2_2	3,8	5,5	0,6	0,7
SD-D-2500	SD3_1	3,6	5,2	0,7	0,8
	SD3_2	3,7	5,4	0,6	0,8
SD-D-1250	SD4_1	4,1	5,9	0,6	0,8
	SD4_2	4,0	5,8	0,6	0,8
SD-T-1250	SD5_1	4,1	5,9	0,6	0,8
	SD5_2	3,8	5,5	0,6	0,7
SD-S-1666	SD6_1	3,9	5,6	0,5	0,7
	SD6_2	3,8	5,5	0,5	0,7

Retard de croissance estimé pour atteindre le résultat du témoin, en fonction des deux scénarios, et des modalités, pour la hauteur et la circonférence :

Modalité		Scénario 1		Scénario 2	
		C 1m30 (cm)	H (m)	C 1m30 (cm)	H (m)
Référence	CD1_2	42	6,5	42	6,5
SD-T-1250	SD5_1	2 ans	2 ans	1 an	1 an
SD-D-1250	SD4_1	2 ans	2 ans	1 an	2 ans
	SD4_2	2 ans	2 ans	2 ans	2 ans
SD-S-1250	SD2_1	2 ans	2 ans	2 ans	2 ans
	SD2_2	2 ans	3 ans	2 ans	2 ans
SD-S-1666	SD6_1	2 ans	4 ans	2 ans	3 ans
SD-S-2500	SD1_2	3 ans	2 ans	2 ans	1 an
SD-D-2500	SD3_1	3 ans	1 an	2 ans	1 an
	SD3_2	3 ans	2 ans	2 ans	2 ans
SD-T-1250	SD5_2	3 ans	3 ans	2 ans	2 ans
SD-S-1666	SD6_2	3 ans	3 ans	2 ans	3 ans
SD-S-2500	SD1_1	4 ans	3 ans	3 ans	3 ans

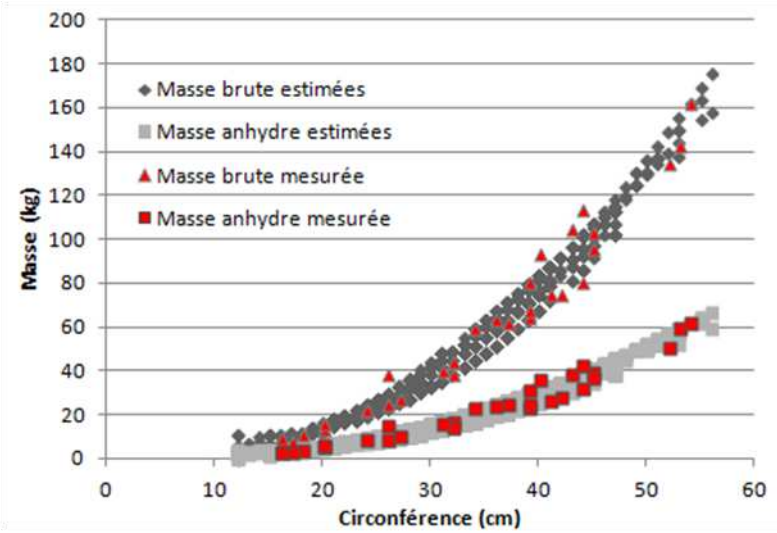
Annexe xix : Présentation des schémas semi-dédiés et des répétitions sélectionnées pour les tests statistiques, au vu des densités à 9 ans dans le peuplement principal et dans le peuplement biomasse, sur Hourtin

En rouge : les peuplements non sélectionnés pour les analyses

Modalité	Répét.	Partie biomasse		Partie principale		Ecart entre la ligne principale et la ligne biomasse
		Ecart sur la ligne	Densité Tiges/ha	Ecart sur la ligne	Densité Tiges/ha	
SD-S-2500	1	1m	2438	2m	1271	2m
	2		1875		1000	
SD-D-2500	1	1m	2104	2m	1083	1m
	2		1563		979	
SD-S-1250	1	2m	1208	2m	1125	2m
	2		1125		1083	
SD-D-1250	1	2m	1229	2m	1063	1m
	2		729		1125	
SD-S-1666	1	2m	1569	2m	833	2m
	2		***1194***		***694***	

Annexe xx : Equations des courbes régressions appliquées pour estimer la masse brute et anhydre de chaque tige et vérification graphique des masses estimées en fonction de la circonférence à 1m30, sur Hourtin à 9 ans

	Brute	Anhydre
SD1	$y = 0{,}08x^2 - 2{,}23x + 26{,}15$ / $R^2=0{,}99$	$y = 0{,}03x^2 - 0{,}83x + 9{,}97$ / $R^2 = 0{,}99$
SD4	$y = 0{,}03x^2 + 1{,}73x - 35{,}78$ / 0,97	$y = 0{,}03x^2 - 0{,}21x - 0{,}97$ / $R^2 = 0{,}97$
SD2/SD6	$y = 0{,}07x^2 - 1{,}05x + 8{,}93$ / $R^2=0{,}98$	$y = 0{,}03x^2 - 0{,}48x + 4{,}96$ / $R^2 = 0{,}98$
SD3	$y = 0{,}06x^2 - 0{,}42x - 0{,}30$ / $R^2=0{,}97$	$y = 0{,}02x^2 - 0{,}12x - 0{,}70$ / $R^2 = 1$
SD5 (tout)	$y = 0{,}0116x^{2{,}3856}$ / $R^2=0{,}98$	$y = 0{,}03x^2 - 0{,}53x + 4{,}84$ / $R^2=0{,}96$



Annexe xxi : Taux d'humidité, répartition de la masse au sein des tiges et biomasse espérée dans le peuplement biomasse, selon les modalités à 9 ans, site Hourtin

Taux d'humidité (minimum, moyen et maximum, par compartiments et modalités) mesuré lors du protocole biomasse :

Taux d'humidité	Branche verte			Branche morte			Tronc			Total		
	min	moy	max	min	moy	max	min	moy	max	min	moy	max
SD-S-2500	52%	60%	62%	22%	27%	29%	61%	63%	65%	58%	62%	63%
SD-S-1250	58%	59%	62%	23%	28%	38%	61%	64%	67%	60%	61%	64%
SD-D-2500	58%	59%	60%	22%	26%	33%	62%	64%	66%	60%	61%	62%
SD-D-1250	58%	60%	63%	23%	27%	39%	63%	64%	67%	58%	62%	64%
Moyenne	**52%**	**59%**	**63%**	**22%**	**27%**	**39%**	**61%**	**64%**	**67%**	**58%**	**61%**	**64%**

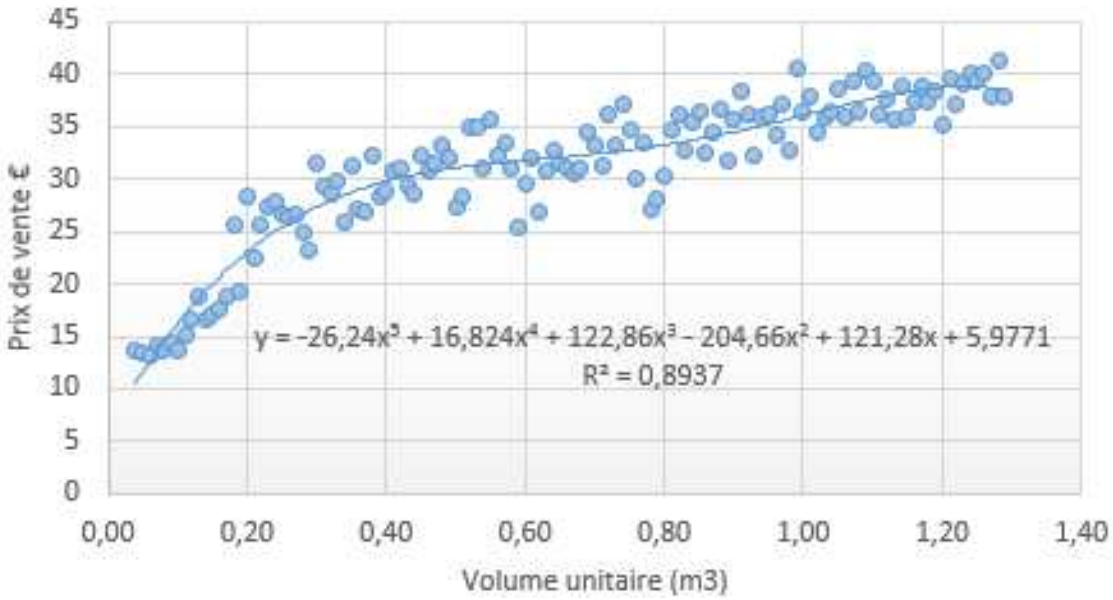
Répartition de la masse de bois entre les compartiments branches verte, branches mortes et tronc, des tiges mesurées lors du protocole biomasse :

Réparition de la masse entre les compartiments	Masses brutes			Masses anhydres		
	Branche verte	Branche morte	Tronc	Branche verte	Branche morte	Tronc
SD-S-2500	31%	2%	66%	33%	5%	63%
SD-S-1250	34%	4%	62%	36%	7%	57%
SD-D-2500	28%	3%	68%	30%	6%	64%
SD-D-1250	35%	4%	61%	36%	8%	56%
Moyenne	**32%**	**3%**	**64%**	**34%**	**6%**	**60%**

Masses estimées par modalités à partir des courbes de régression estimées à partir des 30 arbres abattus lors de l'inventaire biomasse :

Modalité		Densité	Masse unitaire (kg)			Masse totale (tonnes/ha)			Rendement
		tiges/ha	Brute	40% d'humidité	Anhydre	Brute	40% d'humidité	Anhydre	t MS/ha/an
SD-S-2500	SD1_1	2438	42,7	33,4	16,4	104	81	40	4,4
	SD1_2	1875	42,1	33,0	16,1	79	62	30	3,4
SD-S-1250	SD2_1	1208	48,5	38,0	18,6	59	46	22	2,5
	SD2_2	1167	60,4	47,2	23,1	70	55	27	3,0
SD-D-2500	SD3_1	2147	47,7	37,8	18,7	102	81	40	4,5
	SD3_2	1563	46,6	36,9	18,2	73	58	29	3,2
SD-D-1250	SD4_1	1229	72,6	56,6	27,6	89	70	34	3,8
	SD4_2	729	82,8	65,0	31,9	60	47	23	2,6
SD-T-1250	SD5_1	861	59,9	47,0	23,0	52	40	20	2,2
	SD5_2	875	66,0	51,8	25,4	58	45	22	2,5
SD-S-1666	SD6_1	1569	65,0	50,8	24,8	102	80	39	4,3
	SD6_2	1194	64,4	50,4	24,7	77	60	29	3,3

Annexe xxii : Equation de régression polynomiale de degré 5 utilisée pour estimer le prix de vente des volumes éclaircies, en fonction de leur Vu, pour l'étude économique sur le site Hourtin



Annexe xxiii : Résultat des simulations Capsis/PP3, pour les itinéraires SD et D (récolte finale à 15 ou 20 ans) du site Hourtin : volume total (V), Vu, âge de l'intervention de coupe, nombre de tiges récoltées, tonnes (12%), tonnes sèches/ha/an

SD1_1	Age	V (m3)	Vu (m3)	N tiges éclaircies
1e éclaircie	15	9	0,02	393
2e éclaircie	20	27	0,09	292
3e éclaircie	26	33	0,22	150
4e éclaircie	31	51	0,39	129
Coupe rase	40	364	1,21	301

SD1_2	Age	V (m3)	Vu (m3)	N tiges éclaircies
1e éclaircie	17	15	0,06	255
2e éclaircie	20	25	0,13	192
3e éclaircie	24	37	0,26	141
4e éclaircie	28	48	0,45	108
Coupe rase	36	370	1,21	305

SD2_1	Age	V (m3)	Vu (m3)	N tiges éclaircies
1e éclaircie	14	13	0,04	328
2e éclaircie	18	29	0,13	225
3e éclaircie	23	41	0,25	167
4e éclaircie	27	54	0,50	108
Coupe rase	33	368	1,22	300

SD2_2	Age	V (m3)	Vu (m3)	N tiges éclaircies
1e éclaircie	15	12	0,04	313
2e éclaircie	19	24	0,11	213
3e éclaircie	24	32	0,21	150
4e éclaircie	27	36	0,34	108
Coupe rase	37	372	1,24	301

SD3_1	Age	V (m3)	Vu (m3)	N tiges éclaircies
1e éclaircie	15	14	0,05	310
2e éclaircie	19	29	0,13	221
3e éclaircie	23	44	0,30	146
4e éclaircie	27	57	0,53	108
Coupe rase	32	364	1,21	300

SD3_2	Age	V (m3)	Vu (m3)	N tiges éclaircies
1e éclaircie	17	18	0,07	251
2e éclaircie	20	26	0,14	183
3e éclaircie	24	45	0,32	142
4e éclaircie	28	60	0,58	104
Coupe rase	35	366	1,22	300

SD4_1	Age	V (m3)	Vu (m3)	N tiges éclaircies
1e éclaircie	15	19	0,07	289
2e éclaircie	19	30	0,13	221
3e éclaircie	23	41	0,29	142
4e éclaircie	27	54	0,48	113
Coupe rase	34	374	1,24	301

SD4_2	Age	V (m3)	Vu (m3)	N tiges éclaircies
1e éclaircie	13	13	0,04	364
2e éclaircie	18	29	0,13	229
3e éclaircie	22	38	0,24	158
4e éclaircie	27	60	0,53	113
Coupe rase	35	372	1,24	301

SD5_1	Age	V (m3)	Vu (m3)	N tiges éclaircies
1e éclaircie	15	11	0,04	253
2e éclaircie	19	29	0,16	186
3e éclaircie	22	38	0,27	142
4e éclaircie	26	50	0,48	105
Coupe rase	32	369	1,23	301

SD5_2	Age	V (m3)	Vu (m3)	N tiges éclaircies
1e éclaircie	19	18	0,08	219
2e éclaircie	22	27	0,16	164
3e éclaircie	26	41	0,32	125
4e éclaircie	30	34	0,60	56
Coupe rase	35	368	1,22	301

SD6_1	Age	V (m3)	Vu (m3)	N tiges éclaircies
1e éclaircie	19	23	0,10	233
2e éclaircie	24	40	0,22	184
3e éclaircie	29	52	0,45	117
Coupe rase	38	367	1,22	301

SD6_2	Age	V (m3)	Vu (m3)	N tiges éclaircies
1e éclaircie	22	17	0,10	179
2e éclaircie	25	33	0,25	133
3e éclaircie	29	44	0,53	83
Coupe rase	38	370	1,23	300

Témoin_1	Age	V (m3)	Vu (m3)	N tiges éclaircies
1e éclaircie	13	18	0,06	314
2e éclaircie	16	32	0,15	216
3e éclaircie	19	39	0,27	146
4e éclaircie	23	70	0,65	108
Coupe rase	28	366	1,22	300

Témoin_2	Age	V (m3)	Vu (m3)	N tiges éclaircies
1e éclaircie	12	15	0,05	324
2e éclaircie	15	31	0,13	228
3e éclaircie	19	40	0,24	162
4e éclaircie	23	55	0,51	108
Coupe rase	29	361	1,20	300

15 ans	CD1_1	CD1_2	CD2_1	CD2_2	CD3_1	CD3_2	CD4_1	CD4_2
V (m3)	190	176	237	233	143	202	334	388
Vu (m3)	0,13	0,12	0,14	0,14	0,10	0,15	0,12	0,10
C 1m30 (cm)	21	21	19	18	17	19	16	15
Tonnes (12%)	107	110	152	130	107	133	170	195
T/ha/an	7	7	10	9	7	9	11	13

20 ans	CD1_1	CD1_2	CD2_1	CD2_2	CD3_1	CD3_2	CD4_1	CD4_2
V (m3)	355	334	410	420	267	377	567	629
Vu (m3)	0,30	0,28	0,17	0,18	0,12	0,20	0,21	0,17
C 1m30 (cm)	25	25	22	21	20	23	18	17
Tonnes (12%)	168	171	220	200	168	202	241	281
T/ha/an	8	9	11	10	8	10	12	14

Annexe xxiv : Prix minimum de l'énergie (€/MWh) pour compenser le surcout de plantation au vu de la production de biomasse disponible à 9 ans sur Hourtin, pour les différents schémas semi-dédiés et répétition

Le surcoût de plantation est actualisé avec un taux de 3%.

Modalité		Densite biomasse initiale (tiges/ha)	Surcout plantation	actualisation	Masse Brute	Prix / tonne	Energie	Prix énergie
			€/ha	€/ha	t/ha	€/tonne	MWh/ha	€/MWh
SD-S-2500	SD1_1	2500	1000	1305	104	12,5	254	5,1
	SD1_2	2063	825	1076	79	13,6	193	5,6
SD-S-1250	SD2_2	1271	508	663	59	11,3	143	4,6
	SD2_2	1292	517	674	70	9,6	172	3,9
SD-D-2500	SD3_1	2292	917	1196	102	11,7	250	4,8
	SD3_2	1792	717	935	73	12,8	178	5,3
SD-D-1250	SD4_1	1292	517	674	89	7,6	218	3,1
	SD4_2	1208	483	631	60	10,5	147	4,3
SD-T-1250	SD5_1	1236	494	645	52	12,5	126	5,1
	SD5_2	1208	483	631	58	10,9	141	4,5
SD-S-1666	SD6_1	1653	661	863	102	8,5	249	3,5
	SD6_2	1556	622	812	77	10,6	188	4,3

Annexe xxv : Classement des résultats économiques (BASIF, ACE, B/C, TIR) pour les modalités SD à l'échelle d'une révolution, site Hourtin. Le gradient de couleur vert correspond à la densité à 9 ans. Plus l'intensité du vert est élevée et plus la densité totale à 9 ans est élevée (1083 à 3708 tiges/ha).

BASIF							
Avec débroussaillement à 2 ans				Sans débroussaillement à 2 ans			
min		Max		min		Max	
SD-S-2500_1	-209	SD-S-2500_1	127	SD-S-2500_1	195	SD-S-2500_1	531
SD-D-2500_1	367	SD-D-2500_1	739	SD-D-2500_1	820	SD-D-2500_1	1192
SD-S-1666_2	1093	SD-S-1666_2	1348	SD-S-1666_2	1508	SD-S-1666_2	1762
SD-S-1666_1	1276	SD-S-2500_2	1585	SD-S-1666_1	1690	SD-S-2500_2	2011
SD-S-2500_2	1316	SD-S-1666_1	1614	SD-S-2500_2	1742	SD-S-1666_1	2028
SD-S-1250_2	2061	SD-S-1250_2	2312	SD-S-1250_2	2507	SD-S-1250_2	2758
SD-T-1250_2	2158	SD-T-1250_2	2358	SD-T-1250_2	2590	SD-T-1250_2	2790
SD-D-2500_2	2389	SD-D-2500_2	2641	SD-D-2500_2	2821	SD-D-2500_2	3073
SD-D-1250_2	2588	SD-D-1250_2	2797	SD-D-1250_2	3021	SD-D-1250_2	3230
SD-D-1250_1	3022	SD-S-1250_1	3294	SD-D-1250_1	3461	SD-S-1250_1	3740
SD-S-1250_1	3085	SD-D-1250_1	3335	SD-S-1250_1	3531	SD-D-1250_1	3774
SD-T-1250_1	3450	SD-T-1250_1	3637	SD-T-1250_1	3904	SD-T-1250_1	4090
Témoin_2	6190			Témoin_2	6323		
Témoin_1	7461			Témoin_1	7597		

ACE (€/ha/an)							
Avec débroussaillement à 2 ans				Sans débroussaillement à 2 ans			
min		Max		min		Max	
SD-S-2500_1	-6	SD-S-2500_1	4	SD-S-2500_1	6	SD-S-2500_1	16
SD-D-2500_1	11	SD-D-2500_1	22	SD-D-2500_1	25	SD-D-2500_1	36
SD-S-1666_2	33	SD-S-1666_2	40	SD-S-1666_2	45	SD-S-1666_2	53
SD-S-1666_1	38	SD-S-1666_1	48	SD-S-1666_1	51	SD-S-2500_2	60
SD-S-2500_2	39	SD-S-2500_2	48	SD-S-2500_2	52	SD-S-1666_1	61
SD-S-1250_2	62	SD-S-1250_2	69	SD-S-1250_2	75	SD-S-1250_2	83
SD-T-1250_2	65	SD-T-1250_2	71	SD-T-1250_2	78	SD-T-1250_2	84
SD-D-2500_2	72	SD-D-2500_2	79	SD-D-2500_2	85	SD-D-2500_2	92
SD-D-1250_2	78	SD-D-1250_2	83	SD-D-1250_2	91	SD-D-1250_2	97
SD-D-1250_1	91	SD-S-1250_1	99	SD-D-1250_1	104	SD-S-1250_1	112
SD-S-1250_1	93	SD-D-1250_1	100	SD-S-1250_1	106	SD-D-1250_1	113
SD-T-1250_1	103	SD-T-1250_1	109	SD-T-1250_1	117	SD-T-1250_1	123
Témoin_2	186			Témoin_2	190		
Témoin_1	224			Témoin_1	228		

B/C (€)							
Avec débroussaillement à 2 ans				Sans débroussaillement à 2 ans			
min		Max		min		Max	
SD-S-2500_1	0,98	SD-S-2500_1	1,01	SD-S-2500_1	1,02	SD-S-2500_1	1,06
SD-D-2500_1	1,04	SD-D-2500_1	1,07	SD-D-2500_1	1,09	SD-D-2500_1	1,12
SD-S-1666_2	1,13	SD-S-1666_2	1,16	SD-S-1666_2	1,19	SD-S-1666_2	1,22
SD-S-2500_2	1,14	SD-S-2500_2	1,17	SD-S-2500_2	1,20	SD-S-2500_2	1,23
SD-S-1666_1	1,15	SD-S-1666_1	1,19	SD-S-1666_1	1,21	SD-S-1666_1	1,25
SD-S-1250_2	1,22	SD-S-1250_2	1,25	SD-S-1250_2	1,29	SD-S-1250_2	1,31
SD-T-1250_2	1,25	SD-T-1250_2	1,27	SD-T-1250_2	1,31	SD-T-1250_2	1,33
SD-D-2500_2	1,26	SD-D-2500_2	1,29	SD-D-2500_2	1,32	SD-D-2500_2	1,35
SD-D-1250_2	1,29	SD-D-1250_2	1,31	SD-D-1250_2	1,36	SD-D-1250_2	1,38
SD-D-1250_1	1,33	SD-D-1250_1	1,36	SD-D-1250_1	1,40	SD-D-1250_1	1,43
SD-S-1250_1	1,34	SD-S-1250_1	1,36	SD-S-1250_1	1,40	SD-S-1250_1	1,43
SD-T-1250_1	1,37	SD-T-1250_1	1,39	SD-T-1250_1	1,44	SD-T-1250_1	1,46
Témoin_2	1,75			Témoin_2	1,78		
Témoin_1	1,90			Témoin_1	1,93		

TIR							
Avec débroussaillement à 2 ans				Sans débroussaillement à 2 ans			
min		Max		min		Max	
SD-S-2500_1	3,0%	SD-S-2500_1	3,1%	SD-S-2500_1	3,1%	SD-S-2500_1	3,2%
SD-D-2500_1	3,2%	SD-D-2500_1	3,3%	SD-D-2500_1	3,3%	SD-D-2500_1	3,5%
SD-S-1666_2	3,4%	SD-S-1666_2	3,5%	SD-S-1666_2	3,6%	SD-S-1666_2	3,7%
SD-S-2500_2	3,5%	SD-S-2500_2	3,6%	SD-S-2500_2	3,7%	SD-S-2500_2	3,8%
SD-S-1666_1	3,5%	SD-S-1666_1	3,6%	SD-S-1666_1	3,7%	SD-S-1666_1	3,8%
SD-S-1250_2	3,8%	SD-S-1250_2	3,9%	SD-S-1250_2	4,0%	SD-S-1250_2	4,1%
SD-T-1250_2	3,8%	SD-T-1250_2	3,9%	SD-T-1250_2	4,0%	SD-T-1250_2	4,1%
SD-D-2500_2	3,9%	SD-D-2500_2	4,0%	SD-D-2500_2	4,1%	SD-D-2500_2	4,2%
SD-D-1250_2	4,0%	SD-D-1250_2	4,1%	SD-D-1250_2	4,2%	SD-D-1250_2	4,3%
SD-D-1250_1	4,2%	SD-S-1250_1	4,3%	SD-D-1250_1	4,4%	SD-S-1250_1	4,5%
SD-S-1250_1	4,2%	SD-D-1250_1	4,3%	SD-S-1250_1	4,4%	SD-D-1250_1	4,5%
SD-T-1250_1	4,3%	SD-T-1250_1	4,4%	SD-T-1250_1	4,5%	SD-T-1250_1	4,6%
Témoin_2	5,6%			Témoin_2	5,7%		
Témoin_1	6,1%			Témoin_1	6,2%		

Densité totale à 9 ans associée au grade vert et donc à la modalité pour les cultures semi-dédiées sur Hourtin :

Modalité	Densité totale (tiges/ha) à 9 ans
SD-S-2500_1	3708
SD-D-2500_1	3229
SD-S-2500_2	2875
SD-D-2500_2	2542
SD-S-1666_1	2403
SD-S-1250_1	2333
SD-D-1250_1	2292
SD-S-1250_2	2250
SD-S-1666_2	1889
SD-D-1250_2	1854
SD-T-1250_1	1847
SD-T-1250_2	1740
Témoin_2	1125
Témoin_1	1083

Annexe xxvi : Résultats économiques (BASIF, ACE, B/C, TIR) pour les modalités dédiés pour l'énergie à l'échelle d'une révolution, pour une coupe à 15 ou 20 ans, site Hourtin.

Résultats des cultures dédiées sur Hourtin à 15 ans :

BASIF - Coupe 15 ans							
Sans débroussaillement à 2 ans				Avec débroussaillement à 2 ans			
min		Max		min		Max	
D-2x1-5000_2	-9643	D-2x1-5000_2	-7802	D-2x1-5000_2	-10371	D-2x1-5000_2	-8530
D-2x1-5000_1	-9127	D-2x1-5000_1	-7530	D-2x1-5000_1	-9855	D-2x1-5000_1	-8257
D-2x2-2500_2	-7930	D-4x1-2500_1	-6854	D-2x2-2500_2	-8657	D-4x1-2500_1	-7582
D-4x1-2500_1	-7863	D-2x2-2500_2	-6695	D-4x1-2500_1	-8591	D-2x2-2500_2	-7423
D-2x2-2500_1	-7678	D-4x1-2500_2	-6302	D-4x1-2500_2	-8284	D-4x1-2500_2	-7030
D-4x1-2500_2	-7556	D-2x2-2500_1	-6241	D-2x2-2500_1	-8406	D-2x2-2500_1	-6969
T-4x2-1250_2	-6788	T-4x2-1250_2	-5755	T-4x2-1250_2	-7516	T-4x2-1250_2	-6482
T-4x2-1250_1	-6703	T-4x2-1250_1	-5693	T-4x2-1250_1	-7431	T-4x2-1250_1	-6421

ACE (€/ha/an) - Coupe 15 ans							
Sans débroussaillement à 2 ans				Avec débroussaillement à 2 ans			
min		Max		min		Max	
D-2x1-5000_2	-289	D-2x1-5000_2	-234	D-2x1-5000_2	-311	D-2x1-5000_2	-256
D-2x1-5000_1	-274	D-2x1-5000_1	-226	D-2x1-5000_1	-296	D-2x1-5000_1	-248
D-2x2-2500_2	-238	D-4x1-2500_1	-206	D-2x2-2500_2	-260	D-4x1-2500_1	-227
D-4x1-2500_1	-236	D-2x2-2500_2	-201	D-4x1-2500_1	-258	D-2x2-2500_2	-223
D-2x2-2500_1	-230	D-4x1-2500_2	-189	D-2x2-2500_1	-252	D-4x1-2500_2	-211
D-4x1-2500_2	-227	D-2x2-2500_1	-187	D-2x2-2500_1	-252	D-2x2-2500_1	-209
T-4x2-1250_2	-204	T-4x2-1250_2	-173	T-4x2-1250_2	-225	T-4x2-1250_2	-194
T-4x2-1250_1	-201	T-4x2-1250_1	-171	T-4x2-1250_1	-223	T-4x2-1250_1	-193

B/C (€) - Coupe 15 ans							
Sans débroussaillement à 2 ans				Avec débroussaillement à 2 ans			
min		Max		min		Max	
D-4x1-2500_1	0,34	D-4x1-2500_1	0,43	D-4x1-2500_1	0,32	D-4x1-2500_1	0,40
D-2x1-5000_1	0,34	D-2x1-5000_1	0,45	D-2x1-5000_1	0,32	D-2x1-5000_1	0,43
D-2x1-5000_2	0,34	D-2x2-2500_2	0,45	D-2x1-5000_2	0,32	D-2x2-2500_2	0,43
D-2x2-2500_2	0,35	D-2x1-5000_2	0,46	D-2x2-2500_2	0,33	D-2x1-5000_2	0,44
D-4x1-2500_2	0,36	T-4x2-1250_2	0,47	D-4x1-2500_2	0,34	T-4x2-1250_2	0,44
D-2x2-2500_1	0,37	T-4x2-1250_1	0,47	D-2x2-2500_1	0,35	T-4x2-1250_1	0,44
T-4x2-1250_2	0,38	D-4x1-2500_2	0,47	T-4x2-1250_2	0,35	D-4x1-2500_2	0,44
T-4x2-1250_1	0,38	D-2x2-2500_1	0,49	T-4x2-1250_1	0,35	D-2x2-2500_1	0,46

TIR - Coupe 15 ans							
Sans débroussaillement à 2 ans				Avec débroussaillement à 2 ans			
min		Max		min		Max	
D-2x1-5000_2	-5,1%	D-4x1-2500_1	-3,5%	D-4x1-2500_1	-5,5%	D-4x1-2500_1	-3,9%
D-2x1-5000_1	-5,1%	D-2x2-2500_2	-3,0%	D-2x1-5000_1	-5,5%	D-2x2-2500_2	-3,5%
D-4x1-2500_1	-5,1%	D-2x1-5000_1	-3,0%	D-2x1-5000_2	-5,5%	D-2x1-5000_1	-3,4%
D-2x2-2500_2	-4,9%	D-2x1-5000_2	-2,8%	D-2x2-2500_2	-5,3%	T-4x2-1250_2	-3,3%
D-4x1-2500_2	-4,7%	T-4x2-1250_2	-2,8%	D-4x1-2500_2	-5,1%	T-4x2-1250_1	-3,3%
D-2x2-2500_1	-4,6%	T-4x2-1250_1	-2,8%	D-2x2-2500_1	-5,0%	D-4x1-2500_2	-3,2%
T-4x2-1250_2	-4,5%	D-4x1-2500_2	-2,8%	T-4x2-1250_2	-4,9%	D-2x1-5000_2	-3,2%
T-4x2-1250_1	-4,4%	D-2x2-2500_1	-2,5%	T-4x2-1250_1	-4,9%	D-2x2-2500_1	-3,0%

Résultats des cultures dédiées sur Hourtin à 20 ans :

BASIF - Coupe 20 ans							
Sans débroussaillement à 2 ans				Avec débroussaillement à 2 ans			
min		Max		min		Max	
D-2x1-5000_2	-8310	D-2x1-5000_2	-6422	D-2x1-5000_2	-8912	D-2x1-5000_2	-7023
D-2x1-5000_1	-7943	D-2x1-5000_1	-6328	D-2x1-5000_1	-8545	D-2x1-5000_1	-6929
D-2x2-2500_2	-6931	D-4x1-2500_1	-5766	D-2x2-2500_2	-7532	D-4x1-2500_1	-6368
D-4x1-2500_1	-6898	D-2x2-2500_2	-5588	D-4x1-2500_1	-7499	D-2x2-2500_2	-6189
D-2x2-2500_1	-6753	D-2x2-2500_1	-5278	D-2x2-2500_1	-7354	D-2x2-2500_1	-5879
D-4x1-2500_2	-6622	D-4x1-2500_2	-5264	D-4x1-2500_2	-7224	D-4x1-2500_2	-5865
T-4x2-1250_2	-6013	T-4x2-1250_2	-4867	T-4x2-1250_2	-6615	T-4x2-1250_2	-5468
T-4x2-1250_1	-5943	T-4x2-1250_1	-4817	T-4x2-1250_1	-6544	T-4x2-1250_1	-5418

ACE (€/ha/an) - Coupe 20 ans							
Sans débroussaillement à 2 ans				Avec débroussaillement à 2 ans			
min		Max		min		Max	
D-2x1-5000_2	-249	D-2x1-5000_2	-193	D-2x1-5000_2	-267	D-2x1-5000_2	-211
D-2x1-5000_1	-238	D-2x1-5000_1	-190	D-2x1-5000_1	-256	D-2x1-5000_1	-208
D-2x2-2500_2	-208	D-4x1-2500_1	-173	D-2x2-2500_2	-226	D-4x1-2500_1	-191
D-4x1-2500_1	-207	D-2x2-2500_2	-168	D-4x1-2500_1	-225	D-2x2-2500_2	-186
D-2x2-2500_1	-203	D-2x2-2500_1	-158	D-2x2-2500_1	-221	D-2x2-2500_1	-176
D-4x1-2500_2	-199	D-4x1-2500_2	-158	D-4x1-2500_2	-217	D-4x1-2500_2	-176
T-4x2-1250_2	-180	T-4x2-1250_2	-146	T-4x2-1250_2	-198	T-4x2-1250_2	-164
T-4x2-1250_1	-178	T-4x2-1250_1	-144	T-4x2-1250_1	-196	T-4x2-1250_1	-163

B/C (€) - Coupe 20 ans							
Sans débroussaillement à 2 ans				Avec débroussaillement à 2 ans			
min		Max		min		Max	
D-4x1-2500_1	0,32	D-4x1-2500_1	0,44	D-4x1-2500_1	0,31	D-4x1-2500_1	0,41
D-2x1-5000_1	0,32	D-2x1-5000_1	0,46	D-2x1-5000_1	0,31	D-2x1-5000_1	0,44
D-2x1-5000_2	0,33	D-2x2-2500_2	0,47	D-2x1-5000_2	0,31	D-2x2-2500_2	0,44
D-2x2-2500_2	0,34	D-2x1-5000_2	0,48	D-2x2-2500_2	0,32	T-4x2-1250_2	0,45
D-2x2-2500_1	0,35	D-4x1-2500_2	0,48	D-2x2-2500_1	0,33	T-4x2-1250_1	0,45
D-4x1-2500_2	0,35	T-4x2-1250_2	0,48	D-4x1-2500_2	0,33	D-2x1-5000_2	0,46
T-4x2-1250_2	0,36	T-4x2-1250_1	0,48	T-4x2-1250_2	0,33	D-4x1-2500_2	0,46
T-4x2-1250_1	0,36	D-2x2-2500_1	0,49	T-4x2-1250_1	0,34	D-2x2-2500_1	0,47

TIR - Coupe 20 ans							
Sans débroussaillement à 2 ans				Avec débroussaillement à 2 ans			
min		Max		min		Max	
D-4x1-2500_1	-3,5%	D-4x1-2500_1	-1,9%	D-4x1-2500_1	-3,9%	D-4x1-2500_1	-2,2%
D-2x1-5000_1	-3,5%	D-2x1-5000_1	-1,5%	D-2x1-5000_1	-3,8%	D-2x1-5000_1	-1,8%
D-2x1-5000_2	-3,4%	D-2x2-2500_2	-1,5%	D-2x1-5000_2	-3,7%	D-2x2-2500_2	-1,8%
D-2x2-2500_2	-3,4%	T-4x2-1250_1	-1,4%	D-2x2-2500_2	-3,7%	T-4x2-1250_1	-1,7%
D-2x2-2500_1	-3,1%	T-4x2-1250_2	-1,4%	D-4x1-2500_2	-3,5%	T-4x2-1250_2	-1,7%
D-4x1-2500_2	-3,2%	D-4x1-2500_2	-1,3%	D-2x2-2500_1	-3,4%	D-2x1-5000_2	-1,5%
T-4x2-1250_2	-3,1%	D-2x1-5000_2	-1,2%	T-4x2-1250_2	-3,4%	D-4x1-2500_2	-1,6%
T-4x2-1250_1	-3,1%	D-2x2-2500_1	-1,2%	T-4x2-1250_1	-3,4%	D-2x2-2500_1	-1,5%

Annexe xxvii : Classement des résultats économiques (BASIF, ACE, B/C, TIR), des schémas dédiés pour un débouché bois d'industrie/bois d'œuvre, pour une coupe finale à 15 ou 20 ans, à l'échelle du scénario sylvicole, sur Hourtin. Le gradient de couleur vert correspond à la densité à 9 ans. Plus l'intensité du vert est élevée et plus la densité totale à 9 ans est élevée (1083 à 4146 tiges/ha).

ACE (€/ha/an)			
Coupe 15 ans		Coupe 20 ans	
D-4x1-2500_1	-140	D-4x1-2500_1	-67
D-2x2-2500_2	-86	D-2x2-2500_1	34
D-2x2-2500_1	-79	D-2x2-2500_2	41
D-2x1-5000_2	-78	D-4x1-2500_2	74
T-4x2-1250_2	-70	T-4x2-1250_2	102
D-2x1-5000_1	-62	D-2x1-5000_1	122
D-4x1-2500_2	-55	T-4x2-1250_1	135
T-4x2-1250_1	-45	D-2x1-5000_2	145

B/C (€)			
Coupe 15 ans		Coupe 20 ans	
D-4x1-2500_1	0,59	D-4x1-2500_1	0,77
T-4x2-1250_2	0,78	D-2x2-2500_1	1,10
D-2x2-2500_2	0,78	D-2x2-2500_2	1,12
D-2x2-2500_1	0,80	D-4x1-2500_2	1,25
D-2x1-5000_2	0,83	D-2x1-5000_1	1,30
D-4x1-2500_2	0,83	T-4x2-1250_2	1,37
T-4x2-1250_1	0,85	D-2x1-5000_2	1,38
D-2x1-5000_1	0,86	T-4x2-1250_1	1,50

BASIF			
Coupe 15 ans		Coupe 20 ans	
D-4x1-2500_1	-4661	D-4x1-2500_1	-2247
D-2x2-2500_2	-2871	D-2x2-2500_1	1121
D-2x2-2500_1	-2644	D-2x2-2500_2	1378
D-2x1-5000_2	-2594	D-4x1-2500_2	2450
T-4x2-1250_2	-2339	T-4x2-1250_2	3371
D-2x1-5000_1	-2070	D-2x1-5000_1	4071
D-4x1-2500_2	-1898	T-4x2-1250_1	4492
T-4x2-1250_1	-1509	D-2x1-5000_2	4833

TIR			
Coupe 15 ans		Coupe 20 ans	
D-4x1-2500_1	-0,81%	D-4x1-2500_1	1,5%
D-2x2-2500_2	1,06%	D-2x2-2500_1	3,6%
T-4x2-1250_2	1,10%	D-2x2-2500_2	3,7%
D-2x2-2500_1	1,22%	D-4x1-2500_2	4,3%
D-2x1-5000_2	1,58%	D-2x1-5000_1	4,6%
D-4x1-2500_2	1,64%	T-4x2-1250_2	4,9%
D-2x1-5000_1	1,82%	D-2x1-5000_2	4,9%
T-4x2-1250_1	1,82%	T-4x2-1250_1	5,4%

Densité à 9 ans (tiges/ha) associée au grade vert et donc à la modalité pour les cultures dédiées sur Hourtin :

Modalité	Densité à 9 ans (tiges/ha)
D-2x1-5000_2	4146
D-2x1-5000_1	2979
D-2x2-2500_1	1917
D-2x2-2500_2	1875
D-4x1-2500_1	1646
D-4x1-2500_2	1583
D-4x2-1250_2	1125
D-4x2-1250_1	1083

RESUME - Analyse de la croissance et de la rentabilité d'itinéraires semi-dédiés et Dédiés à la production de bois énergie, mis en place pour le Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.), dans le cadre du programme CLIMAQ

Dans les années 2000, marquées par le développement des politiques de soutien aux énergies renouvelables, deux nouveaux schémas sylvicoles émergent pour le Pin maritime dans les Landes de Gascogne, massif forestier déstabilisé par la tempête de 1999 : les peuplements semi-dédiés (alliant une production bois énergie/bois d'œuvre) et les peuplements dédiés pour la production de bois énergie (coupe rase à 15-20 ans). Des parcelles expérimentales pour ces schémas ont été installées dans le cadre du programme CLIMAQ. L'objectif de ce stage est d'évaluer 10 ans après : la rentabilité de la production de biomasse, l'impact du motif de plantation sur la production et l'avenir du peuplement principal pour les semi-dédiés. Le site principal de cette étude est situé à Hourtin (33). L'étude statistique est réalisée à l'aide du logiciel R. La croissance des peuplements est simulée à l'aide du logiciel Capsis/PP3 afin d'évaluer leur rentabilité économique. L'augmentation de la densité affecte négativement la croissance en circonférence et le volume unitaire. Dans les peuplements semi-dédiés, l'ajout d'une ligne et le motif de plantation affectent la croissance du peuplement principal. La production de biomasse, valorisée au cours actuel du bois énergie, ne permet pas de compenser le surcoût de plantation. La plupart des modalités testées sont économiquement rentables mais le bilan économique est bien moins favorable que celui d'un itinéraire bois d'œuvre standard. Les modalités dédiées ne sont jamais rentables avec une valorisation bois énergie (cours du bois 2020). Elles sont rentables à 20 ans pour une valorisation bois d'industrie/bois d'œuvre.

Mots-clefs : Pin maritime – Densité de plantation - Motif de plantation – Bois énergie – Economie

ABSTRACT – Assessment of *growth and profitability of semi-dedicated and dedicated stands of Maritime pine (Pinus pinaster,* Ait.*) for bioenergy production, tested during the CLIMAQ program*

In the 2000s, marked by the development of policies to support renewable energies, two new silvicultural schedules were designed for Maritime pine in the Landes de Gascogne, a forest who had been destabilized by the 1999 storm : "semi-dedicated" stands (combining wood for energy and timber production), and "dedicated" stands to bioenergy production (clear cutting at 15-20 yrs). Experimental plots have been set up during the CLIMAQ program to test those patterns. The objective of this internship is to assess 10 yrs later: the profitability of biomass production, the impact of the planting design on the production and the future of the main stand in semi-dedicated stands. The main site of this study is located in Hourtin (33). The statistical study is carried out using R software. Stand growth is simulated using the Capsis/PP3 growth model in order to assess the economic profitability. The increase in stand density negatively affects the radial growth and the mean tree volume. In semi-dedicated stands, the addition of a biomass row and the planting design affects the growth of the main stand. Biomass production, valued at the current price of wood for energy, does not balance the additional cost of planting. Most of the treatments which were tested are economically profitable but the results are far lower than what is expected from a standard sylvicultural schedule for timber production. Dedicated stands schedules are never profitable with a bioenergy valorisation (2020 prices). They are profitable harvesting pulpwood / timber at 20 yrs.

Keewords: Maritime pine – stand density – planting design – forest bioenergy– economics