



Rapport final : Modélisation du profil de duramen du douglas

Chef de projet : Marin Chaumet
Équipe projet : RFT

2020-2023

Siège social
10, rue Galilée
77420 Champs-sur-Marne
Tél +33 (0)1 72 84 97 84
www.fcba.fr

Siret 775 680 903 00132
APE 7219Z
Code TVA CEE : FR 14 775 680 903

Institut technologique FCBA :
Forêt, Cellulose, Bois – Construction
Ameublement

Avec le soutien financier de



Résumé

A travers l'étude de 8 peuplements de douglas (72 arbres au total) de Nouvelle Aquitaine le projet a permis d'établir un modèle de profil de tiges et de profil de duramen à partir d'informations simples (hauteur et diamètre). Ces équations couplées à un simulateur de croissance, un module de billonnage et de schémas de sciage constituent un démonstrateur de l'utilisation d'outils d'aide à la décision intégrant la qualité des bois en gestion courante.

Ce démonstrateur appliqué sur des sylvicultures contrastées mets en évidence que sur un cycle de production l'effet de la sylviculture sur la production totale de sciage hors-aubier est assez limité. Néanmoins les résultats dépendent des sections de sciage souhaitées, la production de sciage hors aubier est optimisée par :

- l'itinéraire sylvicole qui maximise la production totale du peuplement s'il s'agit de petites sections (25x150 mm)
- l'itinéraire sylvicole qui maximise le volume unitaire des arbres s'il s'agit de sections plus importantes (35x200 mm)

Au-delà de cette comparaison les travaux réalisés vont permettre surtout d'éclairer les choix de gestion en documentant l'une des nombreuses caractéristiques qualitatives des productions forestières.



SOMMAIRE

1.	Contexte et enjeux	4
2.	Modélisation du profil de tige et duramen	4
2.1	Matériel et méthodes	4
2.1.1	Choix des sites et des arbres	4
2.1.1	Mesures réalisées en forêt	7
2.1.2	Mesures réalisées a posteriori.....	9
2.2	Analyse des données et modélisation	10
2.2.1	Profil de tige.....	10
2.2.2	Profil de duramen	13
2.2.3	Imbrication des modèles de profil de tige et duramen.....	17
3.	Billonnage et schémas de sciages	18
4.	Prototype d'OAD pour raisonner la production de sciage hors aubier dans les itinéraires sylvicoles et les opérations de récolte.	20
5.	Conclusion et perspectives.....	25
6.	Bibliographie	26
7.	Annexe	Erreur ! Signet non défini.
7.1	Modèle 1 taux duramen avec âge.....	Erreur ! Signet non défini.
7.2	Modèle 2 taux de duramen sans âge.....	Erreur ! Signet non défini.

1. Contexte et enjeux

La nouvelle Aquitaine possède un massif de 70 000ha de Douglas qui produit 857 000 m³/an en forêt, la récolte s'élève à environ 500 000m³/an de bois d'œuvre et la production de sciage à 210 000m³/an.

Les sciages de douglas se différencient sur le marché par leurs caractéristiques de résistance mécanique et durabilité. L'optimisation de ces qualités se joue dès la forêt avec les choix sylvicoles effectués au fil de la vie du peuplement, ces choix sont principalement influencés par la dynamique des peuplements et les caractéristiques dimensionnelles des produits. Améliorer la description des qualités et informer sur leurs évolutions permettrait d'optimiser le fonctionnement global de la filière en facilitant l'adéquation des productions forestières aux besoins des marchés et industries.

Cette optimisation passe par la connaissance des différentes qualités (aubier, duramen, bois juvénile, bois mature, types de nœuds) et de leur localisation dans l'arbre. Le précédent projet « Duramen » a permis de montrer que le taux de duramen à 1,3 m semblait peu influencé par la sylviculture, l'étude du profil de duramen sur la hauteur de l'arbre permettrait d'aller plus loin et de vérifier cette observation sur le volume total de duramen. L'enjeu est de modéliser précisément le duramen pour fournir un outil d'aide à la décision, basé sur le profil de duramen et intégrant des schémas de sciages pour permettre aux propriétaires, gestionnaires ou acheteurs d'ajuster l'année de récolte afin d'optimiser la production de sciages hors-aubier (naturellement durable). A plus long terme, l'enjeu est également de coupler la modélisation du duramen à un modèle de branchaison et / ou de résistance mécanique (suite du projet Douglas QDB convention CRNA 2019-2021) pour caractériser finement les qualités du bois et ainsi aider les forestiers à optimiser les itinéraires sylvicoles et aider les acheteurs de bois dans l'estimation du prix des coupes.

Les objectifs techniques du projet sont :

- Modéliser l'évolution du taux de duramen tout au long de la hauteur de l'arbre en réalisant des abattages dans des peuplements issus de la « gestion courante »
- Créer un outil permettant de calculer le nombre de sciage, pour une section donnée (largeur x hauteur), selon le diamètre du billon
- Tester la démarche d'intégrer modélisation de croissance, profil de duramen, et schéma de sciage comme outil d'aide à la décision

2. Modélisation du profil de tige et duramen

2.1 Matériel et méthodes

2.1.1 Choix des sites et des arbres

Cette étude repose sur un échantillonnage de peuplements représentatif de la gestion courante. L'échantillonnage visait à stratifier 2 facteurs susceptibles d'influencer la production de duramen : l'âge et l'altitude (supposée liée à la fertilité). Suite aux recherches et prise de contact avec les gestionnaires et propriétaires c'est au total 8 peuplements de 21 à 54 ans qui ont été sélectionnés. Tous les sites sont localisés en Limousin (excepté Brigueul en Charente) à des altitudes comprises entre 300 et 750.

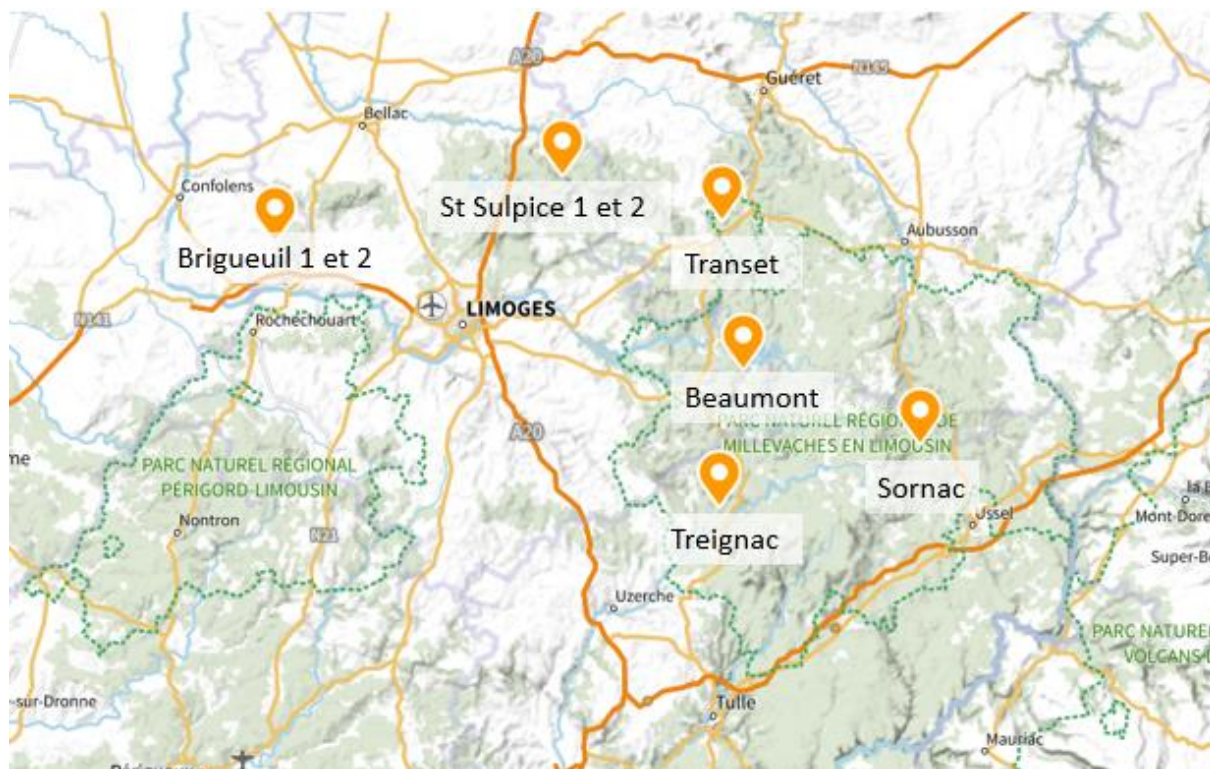


Figure 1 carte de localisation des peuplements étudiés

Pour chaque site sélectionné une description de peuplement a été réalisée par placette circulaire, l'âge a été calculé a posteriori par analyse des cernes.

nom	département	altitude m	age	D moyen cm	D dominant cm	H dominant m	H moyen m	densité t/ha
St sulpice 1	87	500	21	19	25	18	17	857
St sulpice 2	87	500	44	46	59	38	36	240
Brigueuil 1	16	300	46	44	52	31	30	187
Brigueuil 2	16	300	33	31	39	29	26	400
Treignac	19	600	34	36	43	30	29	374
Transet	23	500	34	39	44	30	29	300
Beaumont	87	700	54	47	59	36	35	130
Sornac	19	750	22	22	24	20	19	797

Malgré l'effort de recherche pour trouver des sites de fertilité contrastée, tous les sites sont proches de la classe de fertilité 1 à l'exception des deux plus vieux peuplements Brigueuil 1 et Beaumont qui sont plus proches de la classe de fertilité 2.

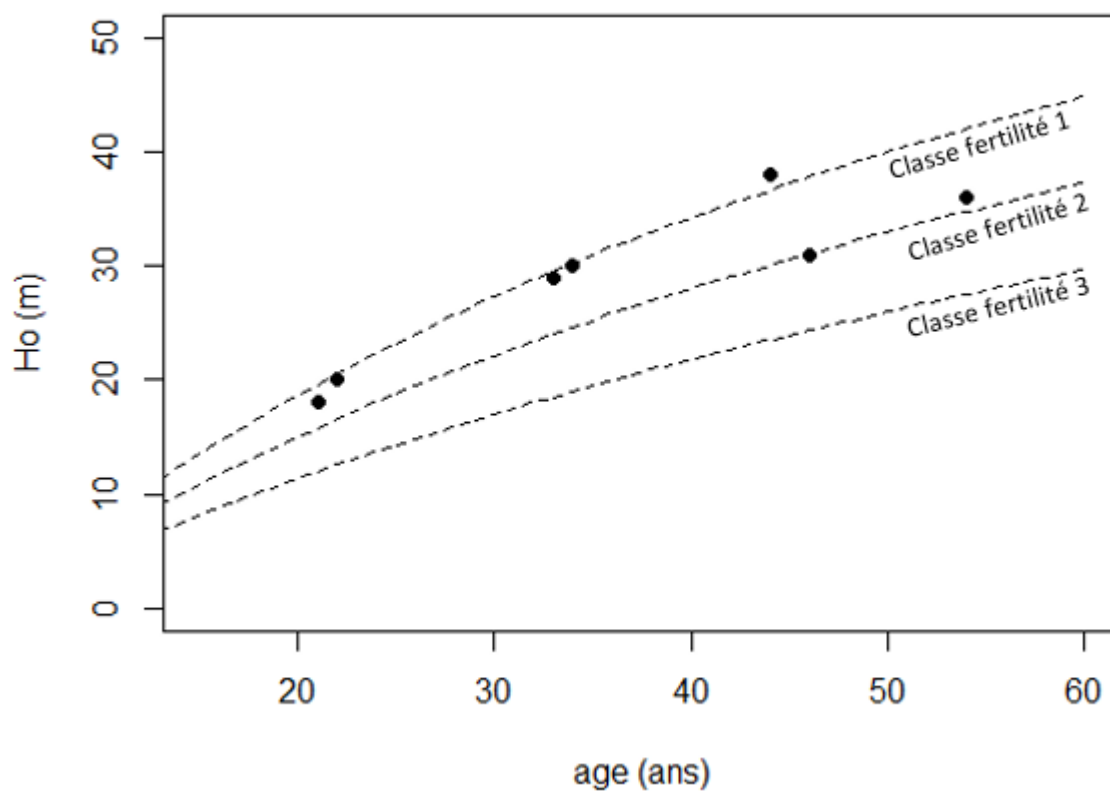


Figure 2 hauteurs dominantes des peuplements étudiés

Dans chaque peuplement 9 arbres : 3 dominants, 3 co-dominants, 3 dominés ont été abattus, soit 72 arbres au total.

Description des arbres échantillonnés :

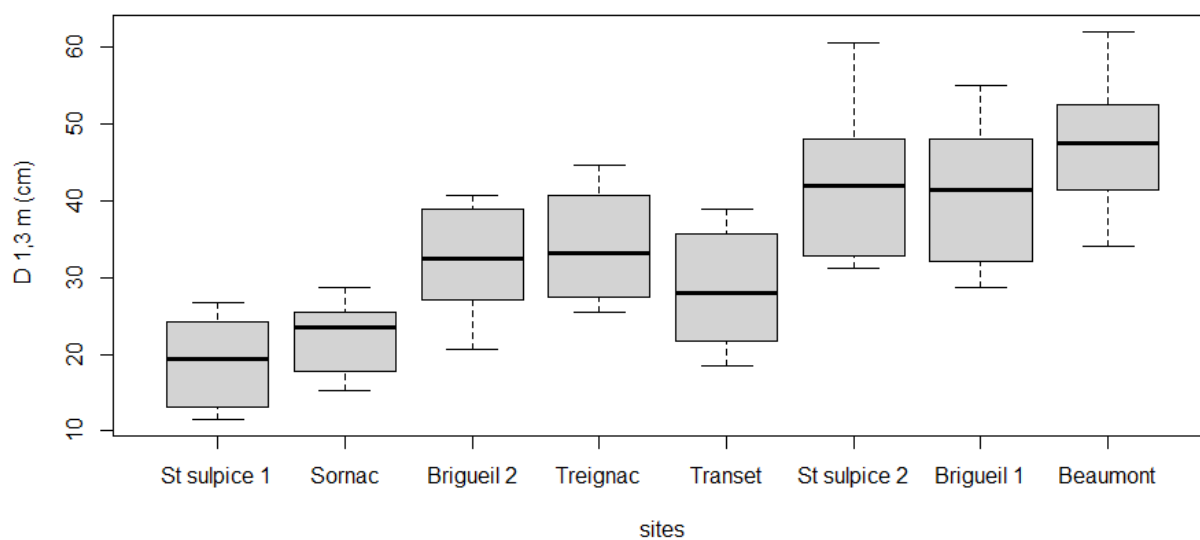


Figure 3 diamètres des arbres échantillonnés par peuplement étudié

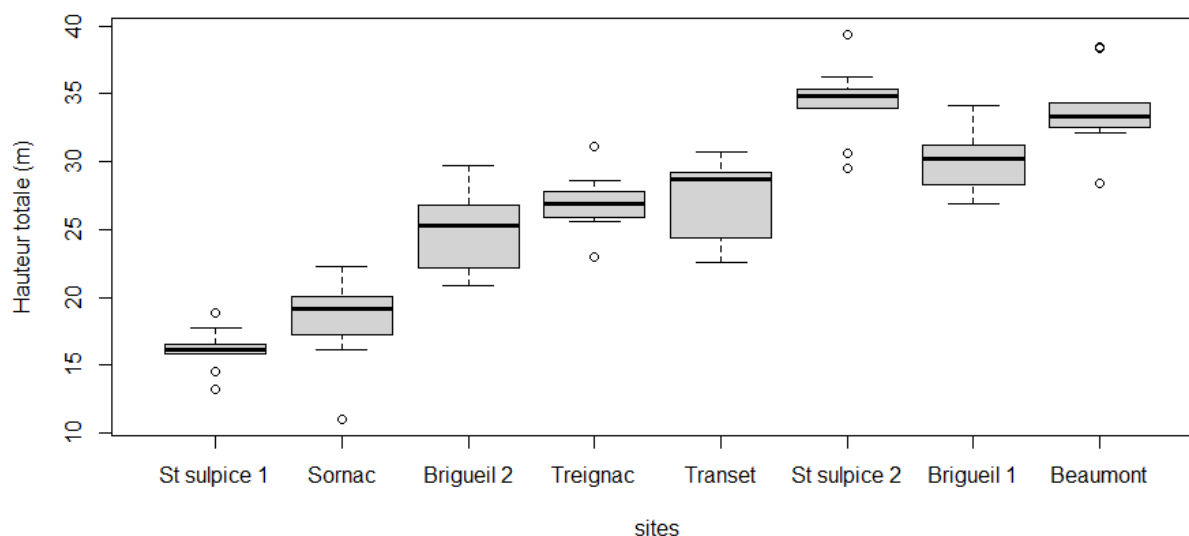


Figure 4 Hauteur des arbres échantillonnés par peuplement étudié

2.1.1 Mesures réalisées en forêt

Les mesures suivantes sont réalisées bois abattus à l'aide d'un ruban et d'un décamètre :

- Circonférence à 0,65m
- Circonférence à 1,3m
- Hauteur totale
- Hauteur découpe 7 cm
- Hauteur 1^{ère} branche verte
- Hauteur du 1^{er} verticille vert (75% de branches vertes)
- Hauteur des billonnages

Le billonnage a été réalisé tous les 2 à 4,5m (selon la longueur nécessaire pour les produits commerciaux). Au bas de chaque billon une rondelle de bois est prélevée, identifiée puis photographiée avec une référence de mesure pour permettre une analyse des rondelles a posteriori. La délimitation aubier duramen est réalisée au feutre noir sur le terrain car la distinction du duramen sur la photo est parfois difficile.

Réalisation des abattages et billonnage par les équipes FCBA



Figure 5 abattage et billonnage d'un douglas



Figure 6 Exemple de photo de rondelles réalisées permettant la mesure de la quantité de duramen

2.1.2 Mesures réalisées a posteriori

La réalisation des photos a permis d'optimiser le temps passer en forêt et d'avoir des conditions plus favorables pour acquérir les différentes données sur les rondelles à partir d'un logiciel de mesure de dimension sur images (www.piximetre.fr). Avant toute mesure, piximètre est étalonné pour chaque photo avec la référence positionnée lors de la prise de vue, puis les différentes caractéristiques sont mesurées simplement en cliquant sur l'image. Pour chaque caractéristique 2 mesures croisées sont réalisées, la valeur enregistrée est la moyenne des 2 mesures. Les caractéristiques relevées sont :

- L'épaisseur d'écorce
- Le diamètre sous écorce
- Le diamètre de duramen
- Le nombre de cernes d'aubier
- Le nombre de cernes de duramen

C'est un total de 578 rondelles qui ont été analysées.



Figure 7 Exemple du traitement d'une photo avec Piximètre

2.2 Analyse des données et modélisations

2.2.1 Profil de tige

Il existe une multitude d'équation permettant de modéliser le profil de tige (Zhang 2021) mais celle proposée par Kozak (2004) semble bien adaptée aux résineux. Elle permet de calculer le diamètre sous écorce en tout point de la tige à partir du diamètre sur écorce à 1,3m et de la hauteur totale :

Kozak [1]
$$d = b_1 \cdot D^{b_2} \cdot H^{b_3} \cdot \left(\frac{(1 - T^{1/3})}{(1 - p^{1/3})} \right)^{b_4} \cdot T^{b_5} \cdot (1/e^{D/H}) + b_6 \cdot \left(\frac{(1 - T^{1/3})}{(1 - p^{1/3})} \right)^{0.1} + b_7 \cdot (1/D) + b_8 \cdot H^{1 - (H/D)^{1/3}} + b_9 \cdot \left(\frac{(1 - T^{1/3})}{(1 - p^{1/3})} \right)$$

Notes: D: diameter at breast height (cm); H: tree total height (m); h: height above ground level (m); d: diameter at a height h (cm); b_i and p: coefficients to be estimated; $X = ((H - h)/(H - 1.3))$; $T = h/H$; $Z = ((H - h)/(H - 1.3))$.

Table 3. Fit parameters and statistics of six selected models.

Model	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	R^2_{adj}	Bias/cm	RMSE
Kozak [1]	1.0097	0.9800	0.0205	0.2983	-0.3391	0.4754	0.1523	0.03195	-0.0621	0.9829	0.0036	0.4631

Issu de Zhang 2021

La publication de Zhang et al. 2021 fournit les paramètres de l'équation ajustés au « chinese fir » à l'exception du paramètre « p ». Pour trouver le paramètre p adapté au douglas en France nous avons procédé par itération. Les profils des 72 arbres ont été calculés avec des valeurs de p variant dans des intervalles donnés. L'analyse de la moyenne et de l'écart-type calculé sur l'écart moyen aux valeurs mesurées permet d'affiner les ordres de grandeur de p, jusqu'à l'obtention d'un compromis satisfaisant entre minimisation de l'écart type et centrage de la moyenne sur 0 pour limiter les biais.

Ce travail permet de retenir une valeur de $p = 0,00697$

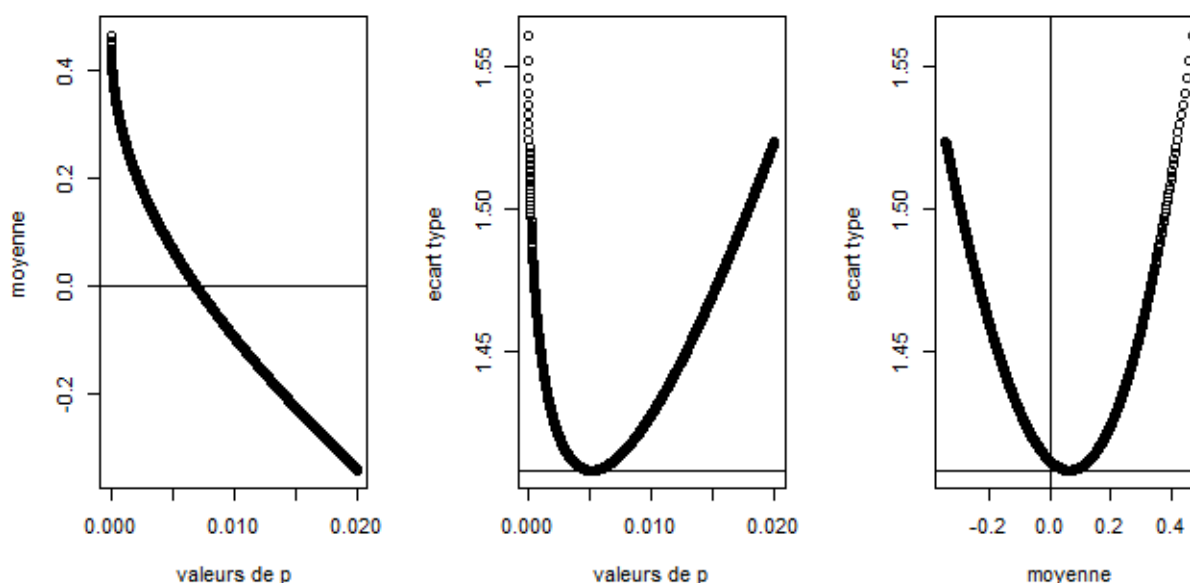


Figure 8 valeurs du paramètre p selon la moyenne et l'écart-type calculé sur l'écart moyen entre valeurs simulées et valeurs mesurées des 72 arbres

Ensuite les autres paramètres de l'équations (b1 à b9) sont réajustés au jeu de données avec une régression non linéaire.

L'analyse des erreurs (=valeur observée – valeur modélisée) révèle une erreur moyenne faible de 0,88 cm soit 5% et un biais également très faible de 0,01%. Pour 95% des simulations l'erreur est inférieure à 2,5 cm, 66% des simulations ont une erreur inférieure à 1cm.

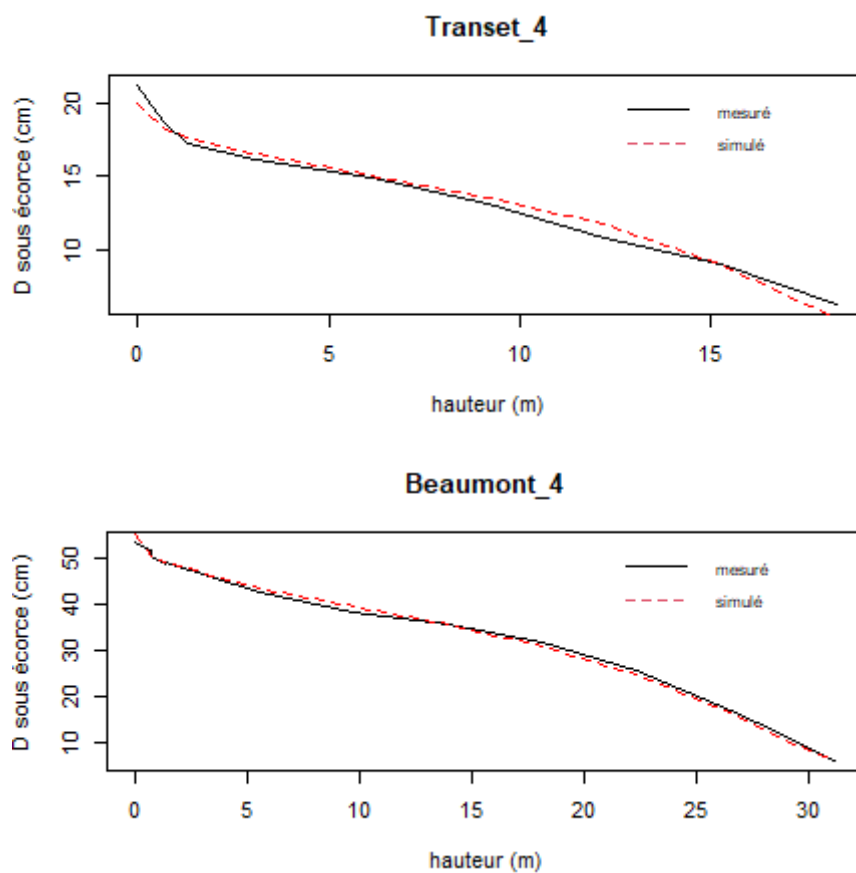


Figure 9 exemple de profil de tiges observés et simulés

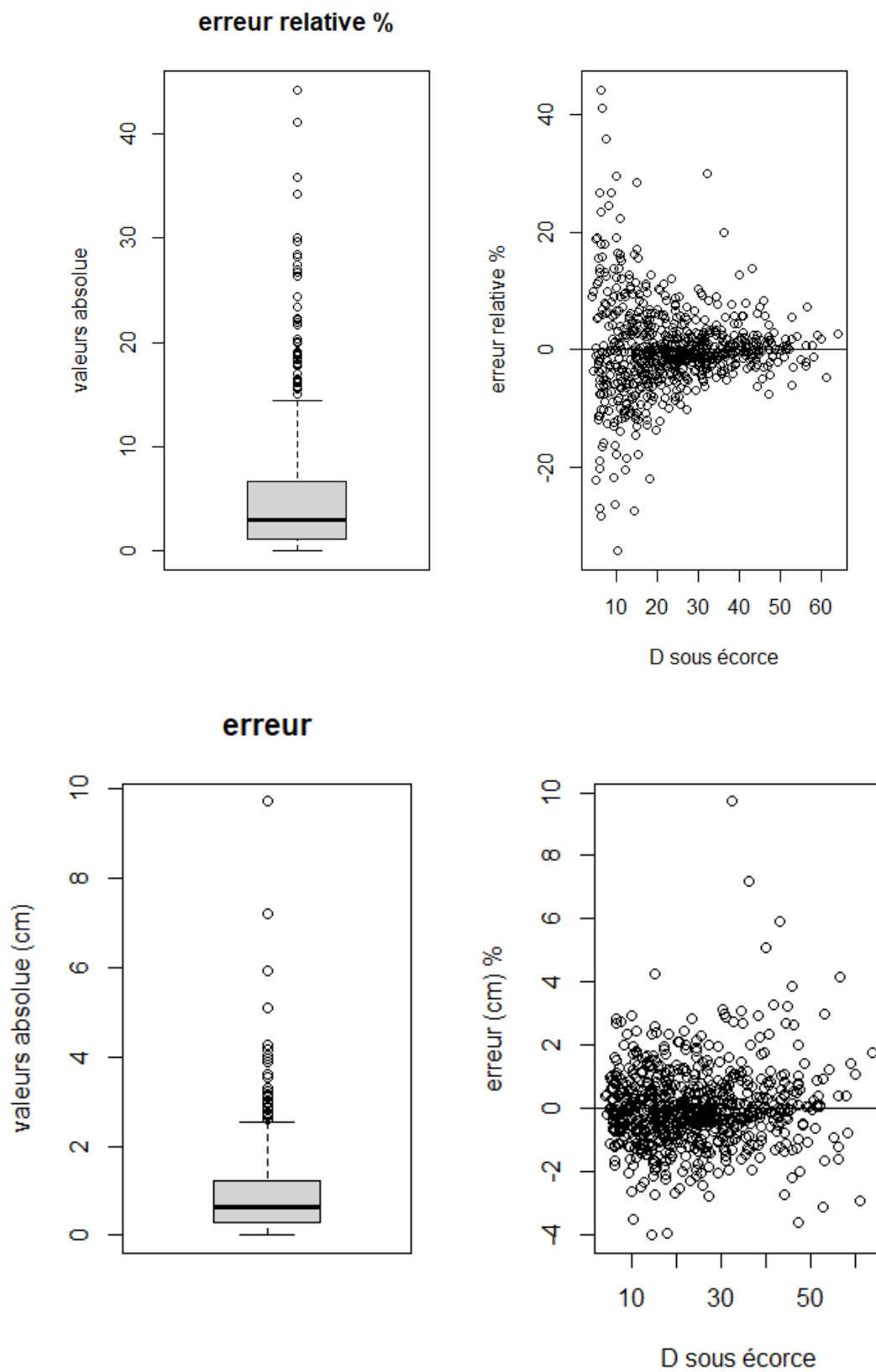


Figure 10 erreur relative (%) et erreur absolue (cm) du modèle de profil de tige

2.2.2 Profil de duramen

Contrairement au profil de tige, la littérature est moins fournie sur le profil de duramen. De plus les références identifiées (Maguire et Batista 1996) proposent des équations qui :

- ne se révèlent pas adaptées à notre jeu de données avec une forte surestimation du duramen dans la partie supérieure de l'arbre (résultats non présentés),
- sont basées sur la surface d'aubier à 1,3m et d'autres caractéristiques telles que la hauteur du houppier vert car l'objectif est souvent d'analyser la physiologie de l'arbre mais ces métriques sont compliquées à acquérir sur le terrain.

L'ajustement d'un modèle adapté aux besoins de l'étude est nécessaire. Diverses solutions ont été testées pour modéliser le profil de duramen : profil de duramen directe, largeur d'aubier, profil du taux de duramen, en fonction de la hauteur relative ou du diamètre relatif. Au final deux modèles sur le taux de duramen ont été retenus car ils offrent un bon compromis entre performance et simplicité :

- Modèle 1 (avec l'âge) :

$$Tx_{du} = a + b D130r + c D130r^2 + d D130r^3 + e D130r \times \frac{1}{age} + f D130r^2 \times \frac{1}{age}$$

Avec :

$D130r = (D \text{ à une hauteur donnée} / D \text{ à } 1,3m) \times 100$

Le modèle a un r^2 de 0,87, l'utilisation du modèle sur les profils de tige mesurés pour simuler le diamètre de duramen le long des tiges révèle que le modèle 1 est très peu biaisé -0,04 cm avec une erreur moyenne de 1,2 cm.

Dans la précédente étude l'effet de l'âge sur le taux de duramen a été identifié comme fort notamment en dessous de 30/35 ans, au-delà le taux se stabilise ou augmente peu. Sur ce jeu de données ces tendances se confirment que l'on considère toutes les rondelles étudiées ou simplement celles des 6 premiers mètres :

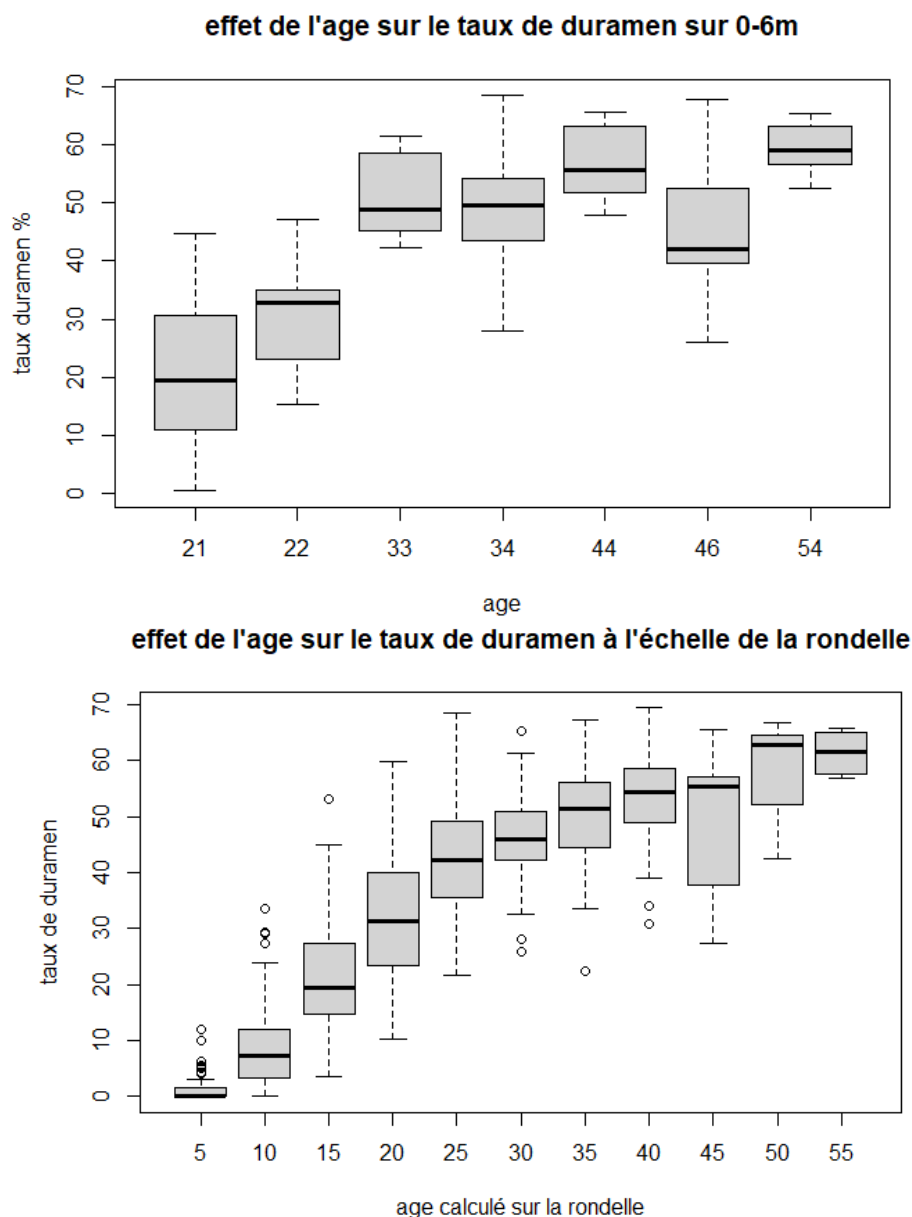


Figure 11 effet de l'âge sur le taux de duramen

Ces observations justifient l'inclusion de l'âge dans le modèle sous la forme d'une fonction inverse, l'inclusion de l'âge sous des formes plus complexes (non linéaires) pourrait permettre d'être plus représentatif des données, cependant sur ce jeu de données, les gains apportés ne justifiaient pas la complexité du modèle.

Par ailleurs pour décrire au mieux le rôle de l'âge sur le taux de duramen, des points de mesures supplémentaires à 80 voire 100 ans seraient nécessaires.

- Modèle 2 (sans l'âge) :

$$Tx_{du} = a + b D130r + c D130r^2 + d D130r^3 + e HD + f D_{soe} + g D130r \times D_{soe}$$

Avec :

$D130r = (D \text{ à une hauteur donnée} / D \text{ à } 1,3\text{m}) \times 100$

$HD = H \text{ total (m)} / D \text{ à } 1,3\text{m (m)}$

$D_{soe} = \text{diamètre sous écorce (cm)}$

Le modèle a un r^2 de 0,83, l'utilisation du modèle sur les profils de tige mesurés pour simuler le diamètre de duramen le long des tiges révèle que le modèle 2 est peu biaisé -0,22 cm avec une erreur moyenne de 1,46 cm.

La comparaison par ANOVA des deux modèles ne révèle pas de différence significative, malgré les quelques différences observées graphiquement.

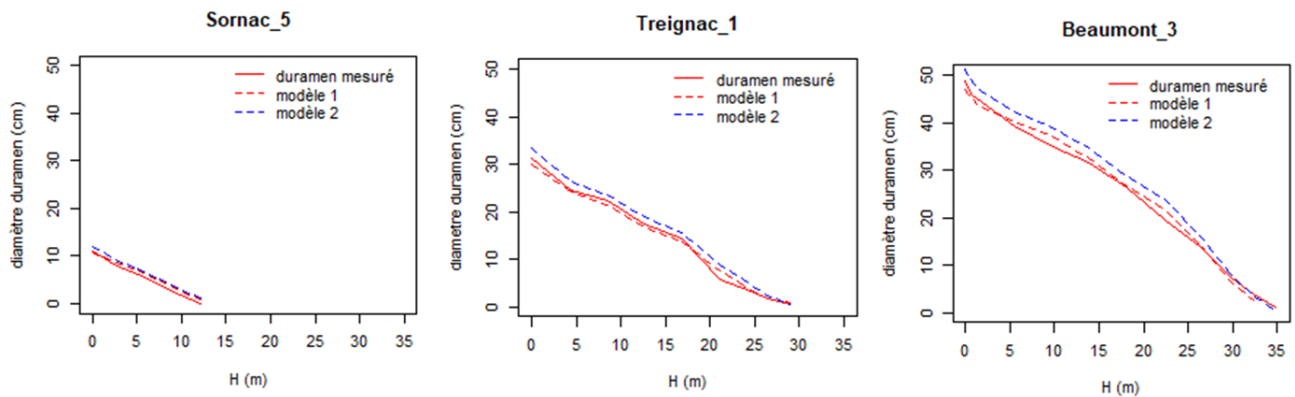


Figure 12 comparaison entre valeurs observées et simulées avec les 2 modèles pour 3 profils de tige

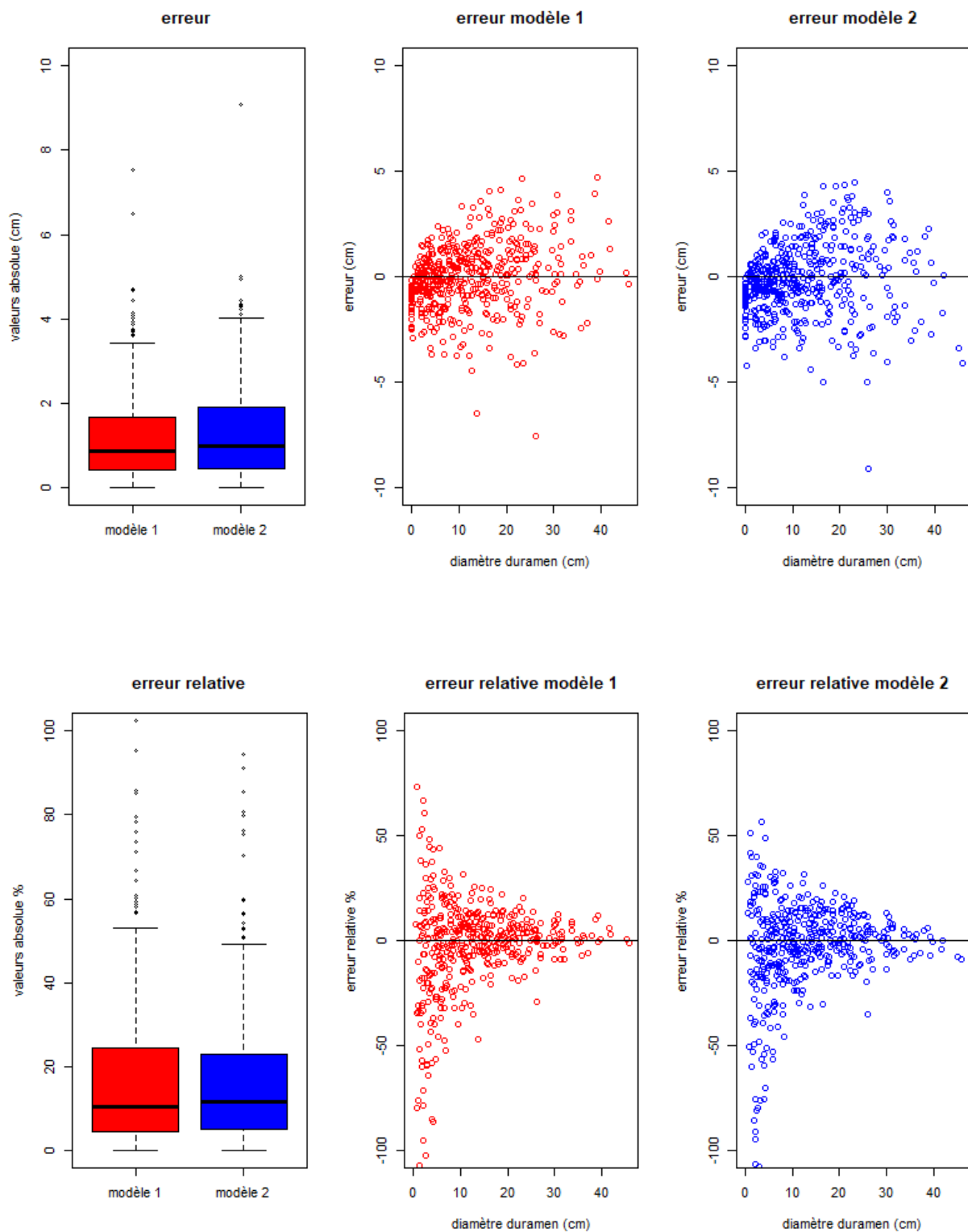


Figure 13 erreurs absolues et relatives du modèle 1 et 2 de taux de duramen

2.2.3 Imbrication des modèles de profil de tige et duramen

Pour la suite des travaux, les profils de tiges seront simulés, il convient de vérifier la propagation des erreurs dans l'utilisation successive du modèle de duramen à partir du modèle de profil de tige.

Comme le modèle de profil de tige est très peu biaisé, les biais observés sur le duramen sont quasiment identiques lorsque les deux modèles sont imbriqués (modèle 1 = -0,016 cm et modèle 2 = -0,2 cm).

L'erreur moyenne évolue peu (+0,6cm) et reste acceptable, en imbriquant les deux modèles elle est de 1,42 cm pour le modèle 1 et de 1,52 cm pour le modèle 2.

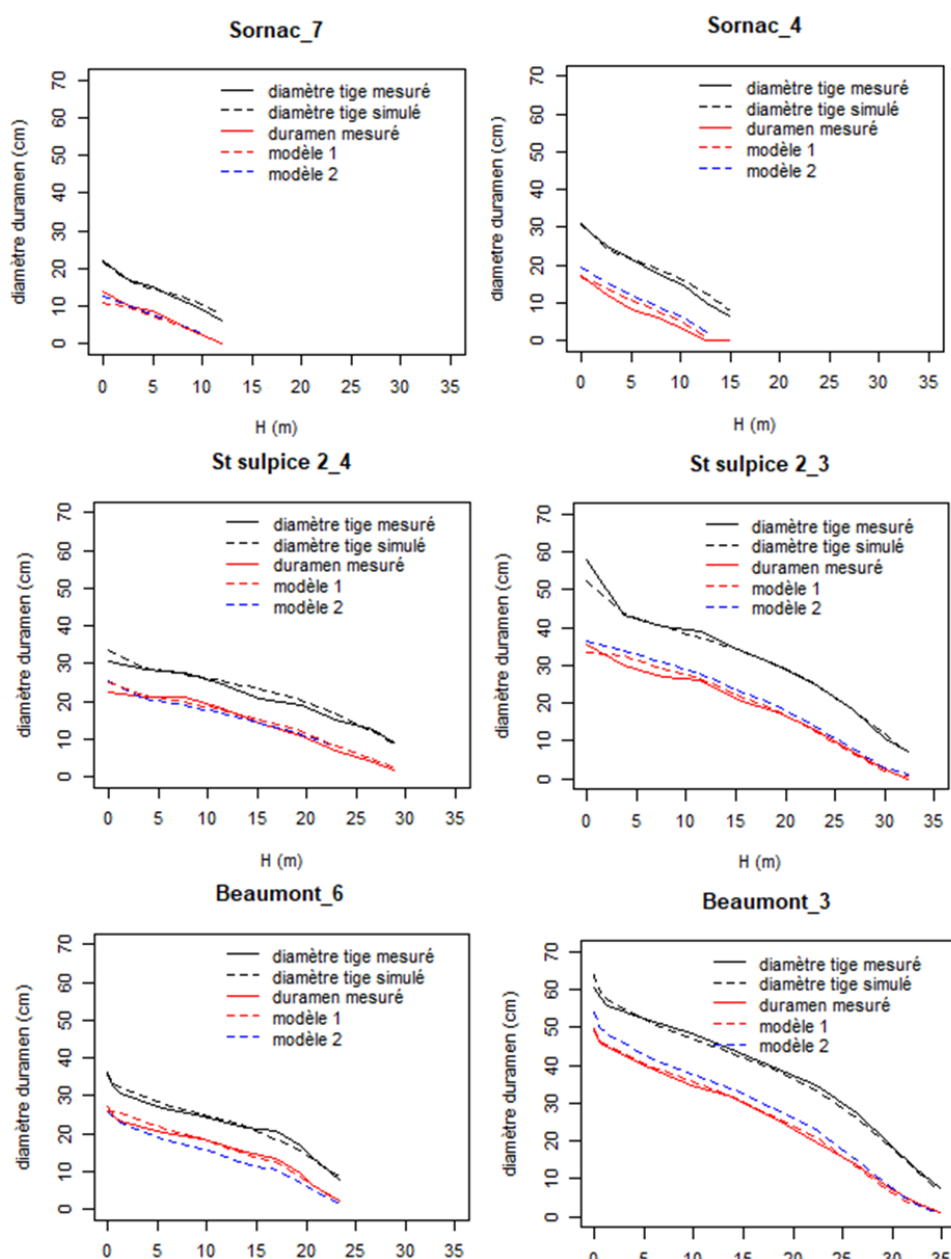


Figure 14 résultats de l'imbrication du modèle de profil de tige et de taux de duramen pour 6 profils de tiges

3. Billonnage et schémas de sciages

Les modèles de profil de tige et duramen permettent d'obtenir une description relativement précise de la forme des tiges à partir de 2 (ou 3) informations : Diamètre, Hauteur, (âge). Ainsi il est aussi possible de simuler un billonnage pour chaque tige en suivant les règles suivantes pratiquées par la filière :

Produits	Longueurs minimales (m)	Diamètre fin bout sous écorce (cm)
Trituration	2,3	7
Palette / emballage	2,4	13
Bois d'œuvre	3	19

Pour cette étude, le parti pris est de réaliser un billonnage maximisant la production de billons de 3 m. En réalité, selon les productions visées (et les cahiers des charges associés) il existe une multitude de longueurs possibles supérieures à 3 m. Pour une utilisation ultérieure par les professionnels les règles de billonnages pourront être adaptées aux besoins de chacun.

NB : La longueur du dernier billon de bois d'œuvre peut être supérieure à 3m (mais toujours inférieure à 6m), c'est le diamètre fin bout qui fixe le passage à la palette et non le nombre de billons multiple de la longueur exacte de 3m.

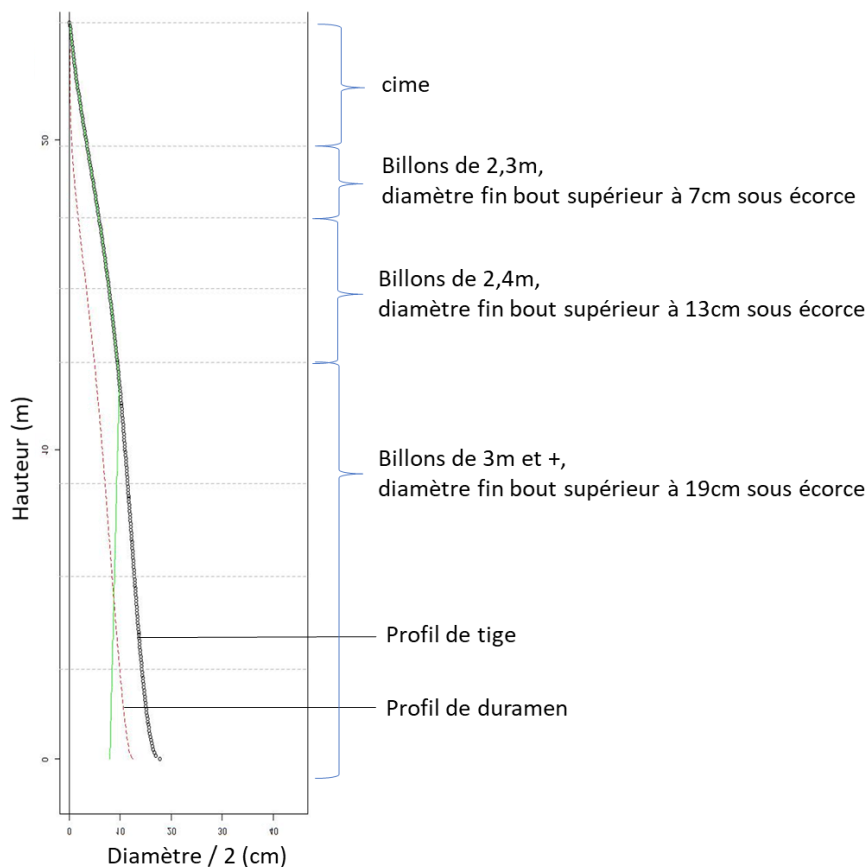


Figure 15 schémas des caractéristiques modélisées et du billonnage réalisé sur les profils de tiges

Chaque billon est décrit par ses diamètres gros bout, fin bout, sur écorce, sous écorce, volume, et diamètres de duramen. Ces informations permettent par la suite d'analyser le type de sciage (avec aubier, hors aubier) selon un schéma de sciage défini.

Les schémas de sciage sont propres à chaque unité de transformation, il existe une infinité de combinaisons de produits selon le diamètre des billons, les types de produits à prioriser, la gestion du rendement matière. Pour cette étude le choix est fait de raisonner sur deux cas simples, mais comme pour le billonnage ces informations peuvent-être modifiées pour s'approcher au plus près de cas réels.

Les schémas de sciage considérés sont issus d'un travail avec l'équipe IBC de FCBA. Ils comportent un produit unique et identique pour tous les diamètres de billon : il s'agit dans un cas d'avivés à destination de bardage de dimensions 25x150 mm et dans l'autre cas de 35x200 mm. Ces schémas varient selon le diamètre fin bout considéré, ils intègrent le nombre de noyaux, le nombre de sciages par noyau ainsi que le nombre de produits de rives.

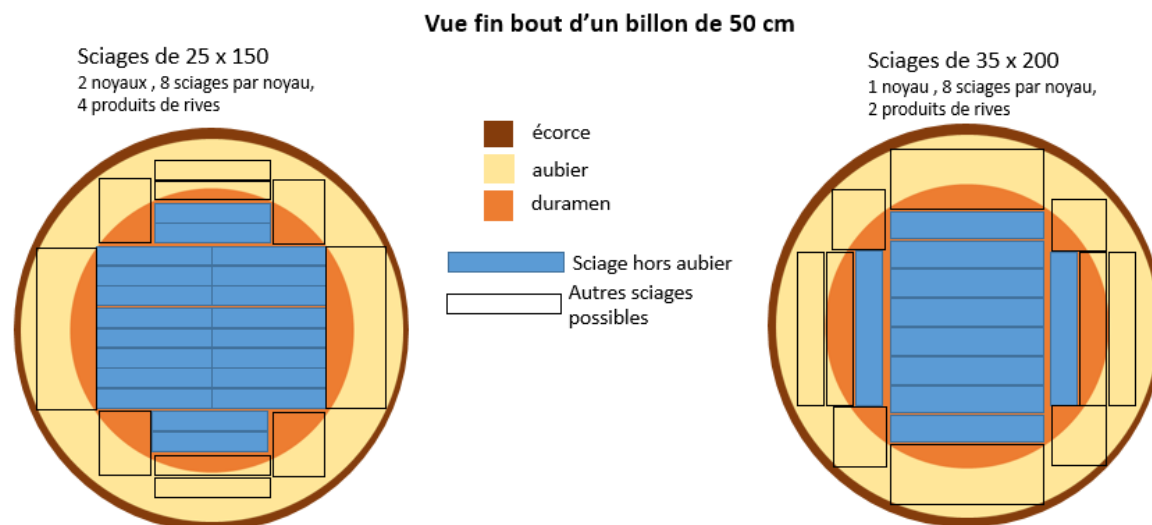


Figure 16 exemple des schémas de sciages considérés pour un billon de 50 cm de diamètre fin bout

4. Prototype d'OAD pour raisonner la production de sciage hors aubier dans les itinéraires sylvicoles et les opérations de récolte.

La finalité de ce travail est d'intégrer au modèle de croissance existant (FCBA *pseudotsuga menziesii*) la modélisation du profil de tige, modélisation du duramen, billonnage et schéma de sciage pour proposer un outil permettant de raisonner les choix de gestion, d'estimer les volumes par qualité à différentes échelles de temps. Affiner la ventilation des qualités permet d'analyser les productions sous l'angle économique et de caractériser la rentabilité des itinéraires sylvicoles, c'est l'objectif de l'application Sylveco en cours de développement.

Pour être complet un travail similaire serait à réaliser sur les qualités mécaniques et visuelles/esthétiques (notamment en intégrant la quantité et le type de nœud)

L'objectif est d'illustrer l'intérêt de ces travaux auprès des professionnels à partir de quelques exemples d'application, la chaîne de traitement suivante a été programmée dans un script R :

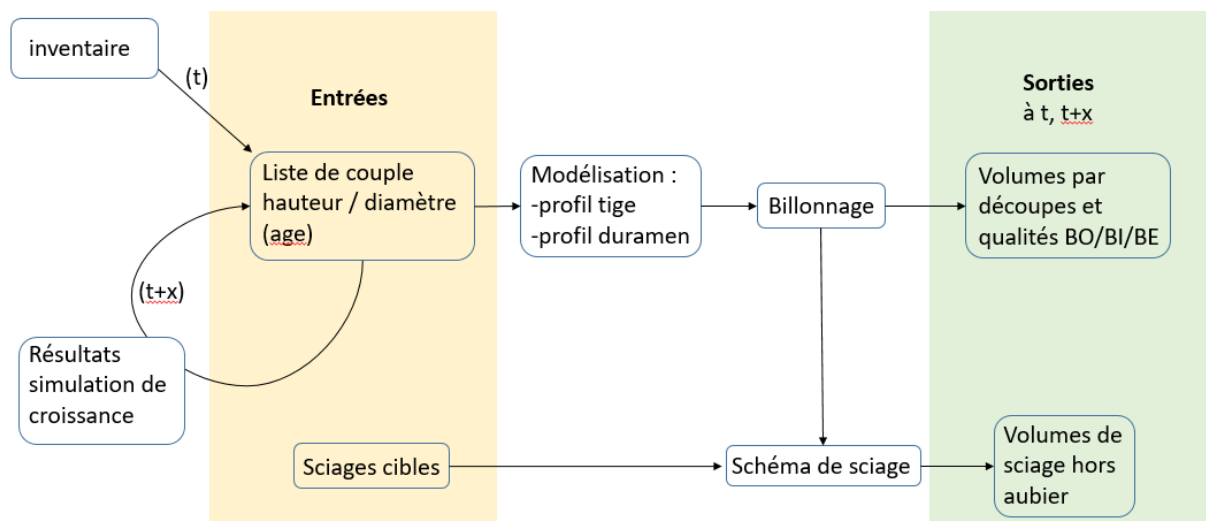


Figure 17 chaîne de traitement mise en œuvre pour traiter les exemples

Exemple 1 : Quel itinéraire sylvicole permet de produire le plus de duramen ?

Pour cet exemple considérons une plantation de 1000t/ha à 20 ans, deux itinéraires sont envisagés, l'un est dit « dynamique » avec 4 éclaircies le second est « peu dynamique » avec seulement 2 éclaircies, dans les deux cas la coupe rase est prévue à 53 ans.

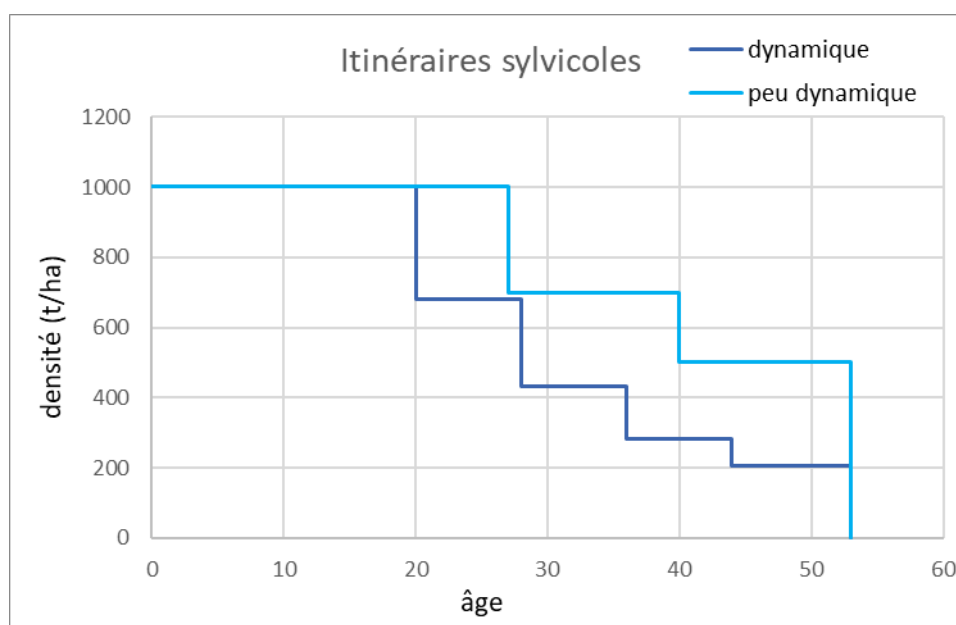


Figure 18 évolution de la densité pour les 2 itinéraires considérés

La croissance du peuplement selon les deux itinéraires est simulée avec le modèle FCBA pseudotsuga menziesii. Le calcul des volumes par qualité est réalisé avec la méthode présentée précédemment et, les résultats sont repris dans le tableau ci-dessous :

		Volume récolté								
coupe type - age		V total m3	% V duramen	V Bois d'œuvre m3	Vu (m3/arbres)	% sciage BO	V sciage hors aubier m3		% sciage hors aubier m3	
							avivés 25 x 150	avivés 35 x 200	avivés 25 x 150	avivés 35 x 200
dynamique	total	853	43	684		80,23	134,7	52,9	19,7	7,7
éclaircies	20	63	18	0	0,20	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0
	28	78	33	25	0,31	32,12	0,3	0,0	1,1	0,0
	36	102	41	74	0,68	72,57	7,0	0,6	9,5	0,8
	44	97	45	89	1,29	91,77	15,4	4,6	17,4	5,2
coupe rase	53	514	48	497	2,48	96,74	111,8	47,7	22,5	9,6
peu dynamique	total	924	47	752		81,32	140,1	45,0	18,6	6,0
éclaircies	27	88	32	20	0,29	22,96	0,0	0,0	0,0	0,0
	40	127	44	83	0,63	65,30	10,1	1,2	12,2	1,4
coupe rase	53	710	49	649	1.42	91.39	130.1	43.8	20.1	6.7

Les grandes tendances généralement observées se retrouvent dans le tableau à savoir que l'itinéraire peu dynamique maximise la production totale de bois (+8%) mais que cette production est principalement récoltée à la coupe rase avec des bois de plus petite dimension (1,4 m³ contre 2,5m³). Le taux de duramen sur le volume de l'itinéraire peu dynamique est plus important de 4 points et s'explique simplement par le fait que la récolte est principalement effectuée à la coupe définitive, moment où le taux de duramen est le plus élevé en regard des éclaircies. A la coupe rase la différence de taux de duramen entre les 2 itinéraires est minime.

Concernant la production de sciage de duramen il est intéressant de remarquer que l'itinéraire dynamique permet de produire des sciages hors aubier de petites sections dès 28 ans. En relatif (volume de sciage hors aubier/ volume bois d'œuvre) les deux itinéraires sont très proches mais c'est l'itinéraire dynamique qui permet de maximiser ce taux notamment à la coupe définitive.

En production totale de sciage hors aubier, les résultats dépendent des sections de sciages considérés :

- sur les sciages de petite section (25x150), c'est l'itinéraire peu dynamique qui permet de produire le plus de sciage hors aubier. En effet, même si les billons sont plus petits, la perte au niveau des schémas de sciage est limitée du fait de la faible section des avivés et elle est largement compensée par la production totale supplémentaire de cet itinéraire.
- sur les sciages de plus forte section (35x200) c'est l'itinéraire dynamique qui permet de produire le plus de sciage hors aubier. La valorisation d'avivés de fortes sections requiert des billons de plus fort diamètre et cette fois la production de l'itinéraire peu dynamique ne compense pas ce manque.

Exemple 2 : Quel est l'impact de la dernière éclaircie sur la production de duramen ?

Pour cette exemple le peuplement considéré a 42 ans, il a bénéficié jusque-là d'une sylviculture « dynamique » telle que décrit dans l'exemple 1 et dont l'objectif est une récolte à 60 ans.

4 scénarios sont envisagés :

- IT0 : pas d'éclaircie jusqu'à 60 ans
- IT bas : une éclaircie mixte à 42 ans (du fait de la régularité du peuplement une éclaircie réellement par le bas à ce stade de développement n'est pas possible)
- IT haut : une éclaircie par le haut à 42 ans
- IT fort : une éclaircie forte à 42 ans

Le tableau et les graphiques ci-dessous reprennent les principales caractéristiques des itinéraires :

prélevé		IT0	IT bas	IT haut	IT fort
N	t/ha	0	75	45	150
	%	0	27	16	53
V	m3/ha	0	77	82	155
	%	0	22	23	44
K (Vu ecl/Vu av)		0	0,8	1,4	0,8

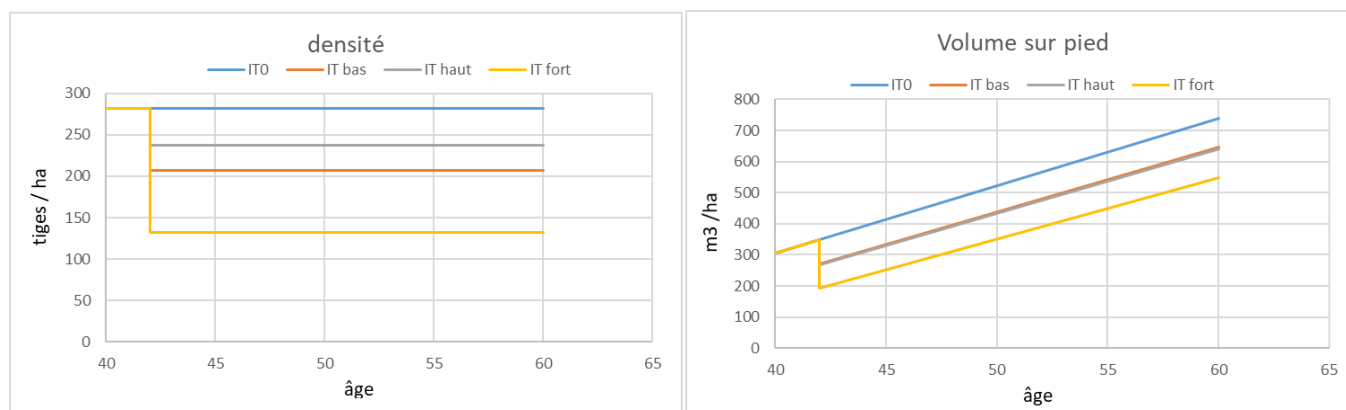


Figure 19 évolution de la densité et du volume sur pied des itinéraires étudiés

Les résultats des simulations sont les suivants :

coupe type - age		V total m3	% V duramen	V Bois d'œuvre m3	Vu (m3/arbres)	% sciage BO	V sciage hors aubier m3		% sciage hors aubier m3	
							avivés 25 x 150	avivés 35 x 200	avivés 25 x 150	avivés 35 x 200
IT0	total	762	54	738	2,70	97	196	84	26,5	11,4
coupe rase	60	762	54	738	2,70	97	186	84	25,2	11,4
IT bas	total	749	53	724	2,66	97	179	80	24,7	11,0
éclaircie	42	86	44	78	1,15	90	12	3	15,5	3,9
coupe rase	60	663	54	647	3,20	98	167	77	25,8	11,9
IT haut	total	748	53	725	2,65	97	178	80	24,5	11,0
éclaircie	42	86	43	83	1,92	96	16	6	19,3	7,2
coupe rase	60	662	54	643	2,79	97	162	74	25,2	11,5
IT fort	total	730	51	704	2,59	96	171	74	24,3	10,5
éclaircie	42	172	44	155	1,15	90	25	6	16,1	3,9
coupe rase	60	558	53	549	4,23	98	146	68	26,6	12,4

Cet exemple permet d'illustrer l'impact de la sylviculture sur la production totale, les volumes unitaires et leur répartition dans le temps :

IT 0 permet de maximiser la production de bois d'œuvre mais celle-ci n'est récoltée qu'à la coupe définitive.

IT fort permet de maximiser le volume unitaire à la coupe rase et de mobiliser une quantité de bois plus importante lors de l'éclaircie mais cela se fait au détriment de la production totale de bois d'œuvre.

IT bas est un compromis permettant de maximiser le volume unitaire final tout en conservant une production de bois d'œuvre élevée.

IT haut est un compromis permettant de récolter, à volume prélevé égal à IT bas, des bois de volumes unitaires plus importants lors de la dernière éclaircie : 1,9 m³ vs 1,1 m³ (et/ou de limiter le volume unitaire des bois lors de la coupe rase) tout en conservant une production de bois d'œuvre élevée.

Concernant les volumes de sciages hors aubier, dans le cas des sections de 25x150 le classement des itinéraires suit le classement établi sur la productivité totale, la différence entre les itinéraires extrêmes est de 20m³ de sciage hors aubier par hectare. Dans le cas de sections plus larges 35x200 la dimension des arbres produits est un critère plus important et compense partiellement des productions totales plus faible, les différences entre itinéraires sont réduites à 10 m³ de sciage hors aubier par hectare.

5. Conclusion et perspectives

Le projet a permis d'établir un modèle de profil de tiges et de profil de duramen à partir d'informations simples (hauteur et diamètre). Ces équations couplées à un simulateur de croissance, un module de billonnage et de schémas de sciage constituent un démonstrateur de l'utilisation d'outils d'aide à la décision intégrant la qualité des bois en gestion courante. Il permettra de commencer à discuter avec les professionnels de l'intérêt de ces outils et de leurs modalités de développement et de diffusion.

L'utilisation de ces outils, comme dans les exemples proposés, n'a pas vocation à être conclusif sur un itinéraire ou un choix de gestion. Les résultats dépendent fortement des paramètres considérés (section des sciages par exemple) et visent à documenter les différentes possibilités et leurs conséquences à court et moyen termes à la fois sur la quantité et la qualité des bois produits. Ces outils sont donc utiles pour préciser et quantifier, dans un contexte donné (peuplement et cahier des charges de produits bois), des tendances attendues (liées à la sylviculture) ou plus compliquées à apprécier (interaction entre les produits sciés et la sylviculture).

Dans le cas du duramen, l'approche présentée se veut généraliste et volontairement simple car les longueurs de billon, les schémas de sciages dépendent des sites de transformation et ils évoluent dans le temps avec les marchés. La possibilité de personnaliser ces données est nécessaire pour que l'outil réponde aux besoins propres des professionnels

Ce premier travail nécessite d'être validé sur des jeux de données complémentaires au jeu de données de calibration utilisé et l'effet de l'âge au-delà de 60 ans mériterait d'être spécifier avec des mesures supplémentaires. Il a aussi vocation à être complété par des travaux similaires sur la nodosité et la résistance mécanique pour affiner les caractéristiques des produits issus des coupes. L'inclusion d'hypothèses économiques (prix du bois, coûts d'exploitation) et autres (intégrations des risques, biodiversité, ...) permettrait de compléter l'analyse et éclairerait au mieux les choix de gestion.

Ce type d'outils peut-être structurant pour la filière car il permet d'optimiser les interactions entre acteurs économiques (gestion forestière, exploitation, 1^{ère} transformation) en documentant plus précisément les volumes et qualités escomptés à l'échelle d'une parcelle, d'une ou d'un ensemble de propriétés.

6. Bibliographie

- Brix, H., et A. K. Mitchell. « Thinning and Nitrogen Fertilization Effects on Sapwood Development and Relationships of Foliage Quantity to Sapwood Area and Basal Area in Douglas-Fir », 1983. <https://doi.org/10.1139/x83-057>.
- Kort, Ingrid de. « Relationships Between Sapwood Amount, Latewood Percentage, Moisture Content and Crown Vitality of Douglas Fir, *Pseudotsuga Menziesii* ». *IAWA Journal* 14, n° 4 (1 janvier 1993): 413-27. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000596>.
- Kozak, A. « A variable-exponent taper equation ». *Canadian Journal of Forest Research* 18 (9 février 2011): 1363-68. <https://doi.org/10.1139/x88-213>.
- Kozak, Antal. « My last words on taper equations ». *The Forestry Chronicle* 80, n° 4 (août 2004): 507-15. <https://doi.org/10.5558/tfc80507-4>.
- Långström, Bo, et Claes Hellqvist. « Effects of different pruning regimes on growth and sapwood area of Scots pine ». *Forest Ecology and Management* 44, n° 2 (15 novembre 1991): 239-54. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(91\)90011-J](https://doi.org/10.1016/0378-1127(91)90011-J).
- Lassen, L. E., et E. A. Okkonen. « SAPWOOD THICKNESS OF DOUGLAS-FIR AND FIVE OTHER WESTERN SOFTWOODS. » *FOREST PRODUCTS LAB MADISON WIS*, octobre 1969. <https://apps.dtic.mil/docs/citations/AD0696631>.
- Long, James, Frederick Smith, et David Scott. « The role of Douglas-fir stem sapwood and heartwood in the mechanical and physiological support of crowns and development of stem form ». *Canadian Journal of Forest Research* 11 (9 février 2011): 459-64. <https://doi.org/10.1139/x81-063>.
- Maguire, Douglas A., et João L.F. Batista. « Sapwood taper models and implied sapwood volume and foliage profiles for coastal Douglas-fir ». *Canadian Journal of Forest Research* 26, n° 5 (mai 1996): 849-63. <https://doi.org/10.1139/x26-093>.
- Maguire, Douglas, et David Hann. « Equations for predicting sapwood area at crown base in southwestern Oregon Douglas-fir ». *Canadian Journal of Forest Research* 17 (1 mars 1987): 236-41. <https://doi.org/10.1139/x87-040>.
- Pollet, C., J.M. Henin, J. Hébert, et B. Jourez. « Effect of growth rate on the natural durability of Douglas-fir in western Europe ». *Canadian Journal of Forest Research* 43, n° 10 (16 juillet 2013): 891-96. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0161>.
- Poudel, Krishna, Hailemariam Temesgen, et Andrew Gray. « Estimating upper stem diameters and volume of Douglas-fir and Western hemlock trees in the Pacific northwest ». *Forest Ecosystems* 5 (12 mars 2018). <https://doi.org/10.1186/s40663-018-0134-2>.
- Sebastian, Hein, Aaron Weiskittel, et Ulrich Kohnle. « Effect of wide spacing on tree growth, branch and sapwood properties of young Douglas-fir [*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco] in southwestern Germany ». *European Journal of Forest Research* 127 (1 octobre 2008): 481-93. <https://doi.org/10.1007/s10342-008-0231-9>.
- Smith, J. H. G., J. Walters, et R. W. Wellwood. « Variation in Sapwood Thickness of Douglas-Fir in Relation to Tree and Section Characteristics ». *Forest Science* 12, n° 1 (1 mars 1966): 97-103. <https://doi.org/10.1093/forestscience/12.1.97>.
- Taylor, Adam M., Barbara L. Gartner, et Jeffrey J. Morrell. « Co-incident variations in growth rate and heartwood extractive concentration in Douglas-fir ». *Forest Ecology and Management* 186, n° 1 (5 décembre 2003): 257-60. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00278-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00278-0).
- Weiskittel, A. R., R. A. Monserud, R. Rose, E. C. Turnblom, et Douglas A. Maguire. « Intensive Management Influence on Douglas-Fir Stem Form, Branch Characteristics, and Simulated Product Recovery ». *New Zealand Journal of Forestry Science*. 36(2/3): 293-312, 2006. <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/29346>.
- Zhang, Sensen, Jianjun Sun, Aiguo Duan, et Jianguo Zhang. « Variable-Exponent Taper Equation Based on Multilevel Nonlinear Mixed Effect for Chinese Fir in China ». *Forests* 12, n° 2 (février 2021): 126. <https://doi.org/10.3390/f12020126>.