

ForêtNeuchâtel

Président Jean Wenger, Chemin des Longues Raies 13 - 2013 Colombier

Groupement des propriétaires et gérants de forêts privées GPGFP

Président Alain Tüller, Sandoz 21, 2105 Travers

Personne de contact :

François Godi, GG Consulting Sàrl, ch du Franoz 11, 1038 Bercher

Tél. 021 887 88 12, e-mail : ggconsulting@vtx.ch

Projet N° 2016.05**Etude du potentiel de production en bois de haute qualité d'épicéa des forêts de l'arc jurassien**

Rapport final à l'attention du Fonds pour les recherches forestières et l'utilisation du bois (WHFF)

Période du juillet 2016 au septembre 2018



Photo J.-P. Schütz : Forêt jardinée Couvet



ForêtNeuchâtel

Association des propriétaires forestiers



ForêtSuisse

Association des propriétaires forestiers



ne.ch



Fondation Ernest Dubois

Une contribution privée pour la protection de la faune, de la flore et du patrimoine



**Sophie und Karl
Binding Stiftung**

Avant-propos

Cette étude n'aurait pas pu se réaliser sans le soutien financier et technique de différentes institutions mentionnées ci-dessous. Nous sommes très reconnaissants pour leur soutien.

Nous remercions tous les propriétaires de forêts qui nous ont mis leur bois à disposition de l'étude, ainsi que les gardes forestiers pour leur disponibilité et intérêt pour cette étude qui a aussi éveillé des attentes de leur côté.

Les travaux et rapports techniques ont été réalisés par Sylvain Jacot, Ingénieur forestier HES (relevés de terrain), Fabien Langenegger, Laboratoire de dendrochronologie de Neuchâtel (analyses dendrochronologiques) et Prof. Dr. Ernst Zürcher (analyses physiques et mécaniques, corrélation avec les données sylvicoles). Nous les remercions pour leur engagement sans faille, ainsi que les membres des institutions qui ont travaillé sous leur direction.

Nous remercions tout particulièrement le Prof. Dr. Jean-Philippe Schütz pour ses précieux conseils lors du déroulement de l'étude.

La coordination du projet a été assurée par François Godi, Ingénieur forestier EPFZ, avec le soutien du comité de pilotage composé de Alain Tüller, Bernard Lavarini et Willem Pleines du GPGFP, de Jean Wenger, Nicolas Joss et Stéphane Jeanrichard de ForêtNeuchâtel, de Patrick Gassmann (ex-Laboratoire de dendrochronologie), de Jean-Laurent Pfund et Pierre Alfter du SFFN, de Gilbert Hirschi de Lignum Neuchâtel et de Gérard David, facteur de harpes.

Appui financier

- Office fédéral de l'environnement, Fonds pour les recherches forestières et l'utilisation du bois
- ForêtSuisse
- Service cantonal de la faune, des forêts et de la nature, Canton de Neuchâtel
- Direction générale de l'environnement, Division Forêts, Canton de Vaud
- Fondation Sophie et Karl Binding
- Fonds vaudois du bois
- Fondation Ernst Dubois
- Lignum Neuchâtel

Appui technique

- Le Laboratoire de dendrochronologie de l'Office du Patrimoine et de l'Archéologie du Canton de Neuchâtel
- La Haute école spécialisée bernoise, Architecture, bois et génie civil de Bienne HESB
- L'Ecole polytechnique fédérale de Zürich EPFZ

Jean Wenger
Président de ForêtNeuchâtel

Alain Tüller
Président du GPGFP

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	3
2. RAPPEL DU CONTEXTE	3
2.1 Les sites d'études	3
2.2 Les types de bois de qualité d'épicéa	4
2.3 La valorisation des produits de niche	4
3. RAPPEL DES OBJECTIFS	5
4. ACTIVITES REALISEES	6
4.1 Sélection du matériel et prélèvement des échantillons	6
4.2 Analyses dendrochronologiques	7
4.3 Analyses des propriétés du bois et corrélation avec la station	8
4.4 Transfert de connaissances	9
5. RESULTATS	9
5.1 Estimation du potentiel de production de bois de qualité du périmètre d'étude	9
Tab. 4 : Prix de vente des billons du projet sur le marché des bois précieux de Colombier en 2016 et 2017	11
5.2 Analyses de la qualité des échantillons	11
5.2.1 Analyses dendrochronologiques	11
5.2.1 Analyses mécaniques et physiques	13
5.3 Corrélations entre station, sylviculture et propriétés des bois	14
5.4 Méthodologie d'identification du bois de haute qualité	16
6. CONCLUSIONS	17
7. PERSPECTIVES	18
BIBLIOGRAPHIE	19
ANNEXE 1 : REVUE DE PRESSE	20

1. Introduction

L'étude du potentiel de production en bois de haute qualité d'épicéa des forêts de l'arc jurassien vise à estimer le volume de production en bois de haute qualité avec comme perspective pour le propriétaire forestier de mieux valoriser son patrimoine.

L'étude a été initiée par les associations faîtières des propriétaires forestiers ForêtNeuchâtel et le Groupement des Propriétaires et Gérants de Forêts Privées (GPGFP).

Il bénéficie du soutien du Département du développement territorial et de l'environnement du Canton de Neuchâtel à travers son Service de la faune, des forêts et de la nature, des Inspections cantonales des forêts du Canton de Vaud et du Canton du Jura, du Laboratoire de Dendrochronologie de l'Office du Patrimoine et de l'Archéologie du Canton de Neuchâtel, de la Haute école spécialisée bernoise, Architecture, bois et génie civil et de Lignum Neuchâtel et de l'Ecole polytechnique de Zürich.

Le projet a fait l'objet d'un premier rapport intermédiaire, couvrant la période de juillet à octobre 2016, présentait brièvement les préparatifs pour la première campagne de prise d'échantillons. Le deuxième rapport intermédiaire (juillet 2017) a présenté les résultats des mesures des 25 premiers échantillons récoltés dans l'arc jurassien.

Le présent rapport présente une synthèse des activités réalisées, des principaux résultats des différentes analyses, ainsi que les conclusions et perspectives issues de l'étude menée. Les rapports techniques en annexe font partie intégrante du rapport final. Le lecteur se référera à ces rapports pour les résultats détaillés.

2. Rappel du contexte

L'arc jurassien est, après le Sud des Alpes, la région la plus boisée de Suisse. Près de la moitié de l'arc jurassien (48%) est recouvert de forêt. Selon l'inventaire national IFN4, le volume sur pied d'épicéa s'élève à 21.1 mio. m³, soit près d'un tiers du volume de bois de l'ensemble de ces forêts (OFEV 2015).

Dans le contexte du marché du bois actuel en Suisse, la valorisation des produits de qualité représente, pour le propriétaire forestier, un potentiel intéressant comme le démontre les prix obtenus lors des différentes ventes de bois précieux à travers la Suisse.

Le bois d'épicéa de haute qualité et le bois de résonance en particulier sont des assortiments recherchés avec des débouchés commerciaux dépassant largement nos frontières. Ces produits sont susceptibles d'apporter une plus-value importante aux membres d'une filière organisée du producteur au consommateur final.

2.1 Les sites d'études

L'arc jurassien est la région ciblée par le projet. Les secteurs rouges présentent les sites dans lesquels des échantillons ont été prélevés, soit dans les forêts du canton de Neuchâtel et dans les forêts de la Vallée de Joux (canton de Vaud) situées au-dessus 700 m. d'altitude.

Ces forêts se distinguent d'une part par une forte proportion d'épicéa (50%) et d'autre part par un climat rude et un sol pauvre propice à une croissance lente et régulière. Elles se caractérisent depuis plus d'un siècle par une gestion forestière basée sur une pratique sylvicole respectueuse de la nature qui fait des propriétaires forestiers de ce début de 21^e siècle les héritiers privilégiés d'un patrimoine d'une grande richesse.

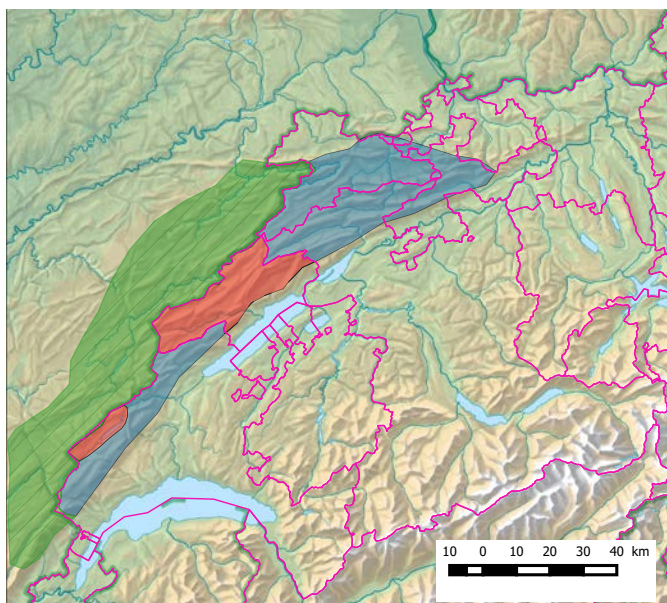


Figure 1 : Carte de l'arc jurassien
(geodata@swisstopo)

Légende : en rouge : zone d'étude ; en vert et en bleu : secteurs potentiels d'utilisation des résultats de l'étude.

2.2 Les types de bois de qualité d'épicéa

Les normes pour le bois de menuiserie / ébénisterie étant trop générales, elles ne permettent pas aux propriétaires forestiers de commercialiser les bois de haute qualité à leur juste valeur. L'étude se propose de distinguer les grumes de qualité A en trois catégories :

- le bois de résonance ou bois de lutherie qui convient à la fabrication d'instrument de musique à corde et doit répondre à des exigences de qualité très élevées,
- le bois de haute qualité qui présente des caractéristiques supérieures qu'il convient de valoriser dans des marchés de niches, telle la menuiserie haut de gamme, l'ébénisterie, coffrets et emballages précieux.
- le bois de menuiserie destiné à la fabrication de meubles ou à la décoration et à l'équipement des bâtiments (portes, fenêtre).

2.3 La valorisation des produits de niche

Sur la base des données obtenues des services forestiers, des études réalisées sur le Domaine des Cottards (Lavarini B. 2014/2, Lavarini 2016/1) et de celles de Ph. Domont (Domont Ph. 2000 et 2001), 3 % des grumes d'épicéa exploitées sont de qualité A et 1% de qualité bois de résonance.

L'utilisation du bois de résonance par les facteurs d'instruments de musique se fait à partir de planchettes débitées dans la grume selon un protocole particulier. Ces planchettes sont ensuite collées pour la réalisation des tables d'harmonie de tous les instruments à cordes. La figure 2 et le tableau 1 présentent des estimations de volume et de chiffres d'affaires annuels pour le bois de qualité A, le bois de résonance et les planchettes de résonance. Ces estimations montrent que la valorisation d'un produit de niche comme le bois de résonance, dépassent, déjà sous forme de grumes le chiffre d'affaire d'un volume beaucoup plus important de bois de qualité A.

Figure 2 : Estimation des chiffres d'affaires annuels
(Sources : données des services forestiers NE, JU, VD, AFN, manufacture d'harpes David).

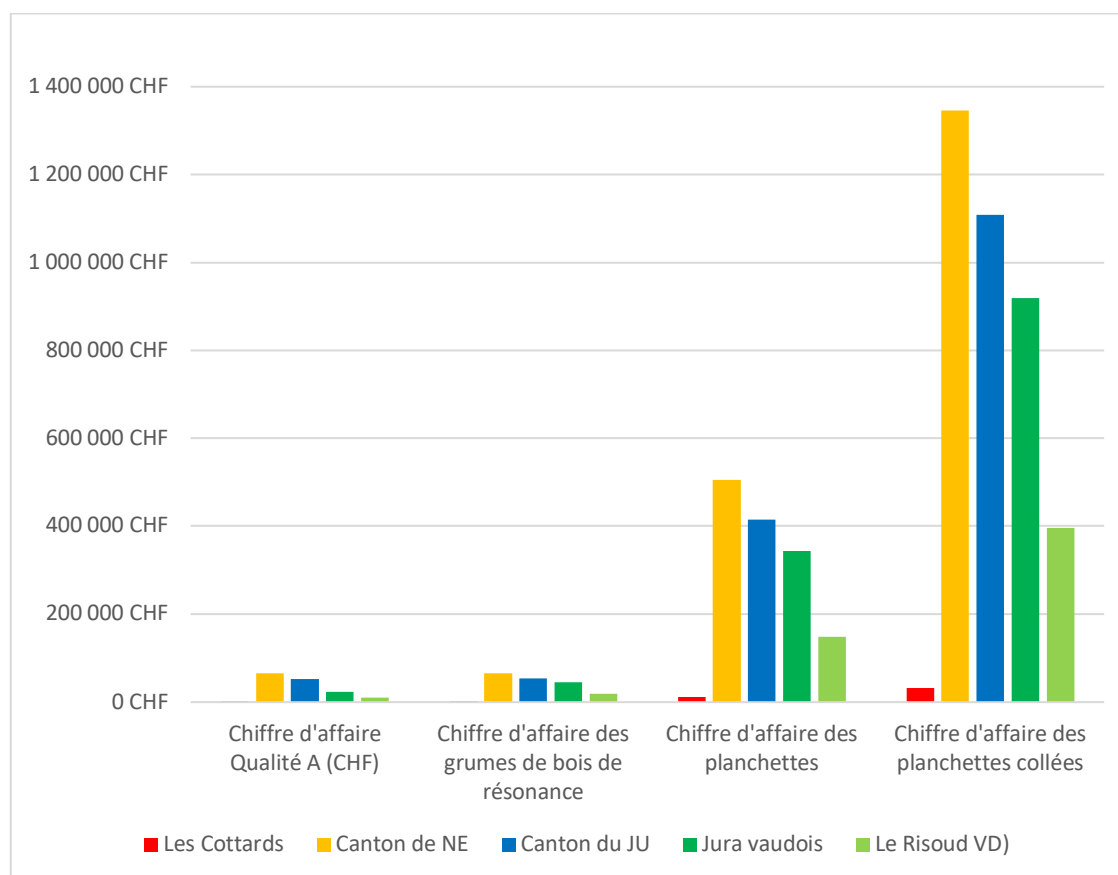


Tableau 1 : Estimation des volumes et des chiffres d'affaire
(Sources : données des services forestiers NE, JU, VD, AFN, manufacture d'harpes David).

	Les Cottards	Canton de NE	Canton du JU	Jura Vaudois	Le Risoud VD)
Volume d'épicéa exploité au-dessus de 1'000 m. (m3/an)	165	17000	13500	5'800	2500
Volume d'épicéa de Qualité A (m3/an), env. 3% du volume exploité	5	510	405	175	75
Volume d'épicéa Bois de résonance (m3/an), env. 1 % du volume exploité	2	85	70	58	25

Prix de vente de la qualité A CHF/m3 (Source AFN 2015)	130 CHF	130 CHF	130 CHF	130 CHF	130 CHF
Chiffre d'affaire Qualité A (CHF)	650 CHF	66 300 CHF	52 650 CHF	22 750 CHF	9 750 CHF
Prix de vente de la grume d'épicéa bois de résonance (CHF/m3) (Prix moyen selon Domont, 2001)	780 CHF	780 CHF	780 CHF	780 CHF	780 CHF
Chiffre d'affaire des grumes de bois de résonance	1 560 CHF	66 300 CHF	54 600 CHF	45 240 CHF	19 500 CHF
Volume de planchettes (m3) (60% du volume de la grume)	1.2	51.0	42.0	34.8	15.0
Prix de vente de la planchette de bois de résonance (CHF/m3) (Prix du marché international)	9 900 CHF	9 900 CHF	9 900 CHF	9 900 CHF	9 900 CHF
Chiffre d'affaire des planchettes	11 880 CHF	504 900 CHF	415 800 CHF	344 520 CHF	148 500 CHF
Prix de vente de la planchette de bois de résonance collée (CHF/m3) (Prix du marché international)	26 400 CHF	26 400 CHF	26 400 CHF	26 400 CHF	26 400 CHF
Chiffre d'affaire des planchettes collées	31 680 CHF	1 346 400 CHF	1 108 800 CHF	918 720 CHF	396 000 CHF

3. Rappel des objectifs

Afin de contribuer à une meilleure valorisation du bois de haute qualité d'épicéa et de promouvoir un mode de gestion sylvicole axée sur la qualité, le projet avait pour objectifs de :

- déterminer le potentiel de production du bois de haute qualité d'épicéa
- mettre en évidence la corrélation entre les caractéristiques stationnelles et sylvicoles et les propriétés et qualités des bois,
- définir des critères visuels et techniques simples pour distinguer les sciages de haute qualité et les bois de résonance.

4. Activités réalisées

4.1 Sélection du matériel et prélèvement des échantillons

La sélection des échantillons s'est basée en premier lieu sur la carte des potentiels établies en début de projet et le programme des coupes prévues. Pour rappel, la carte des zones potentielles de production de bois de haute qualité a été établie selon les critères suivants : l'altitude supérieure à 1000 m, la pente inférieure à 15°, hauteur des arbres supérieure à 25 m, géologie karst ou marne (Figure 3).

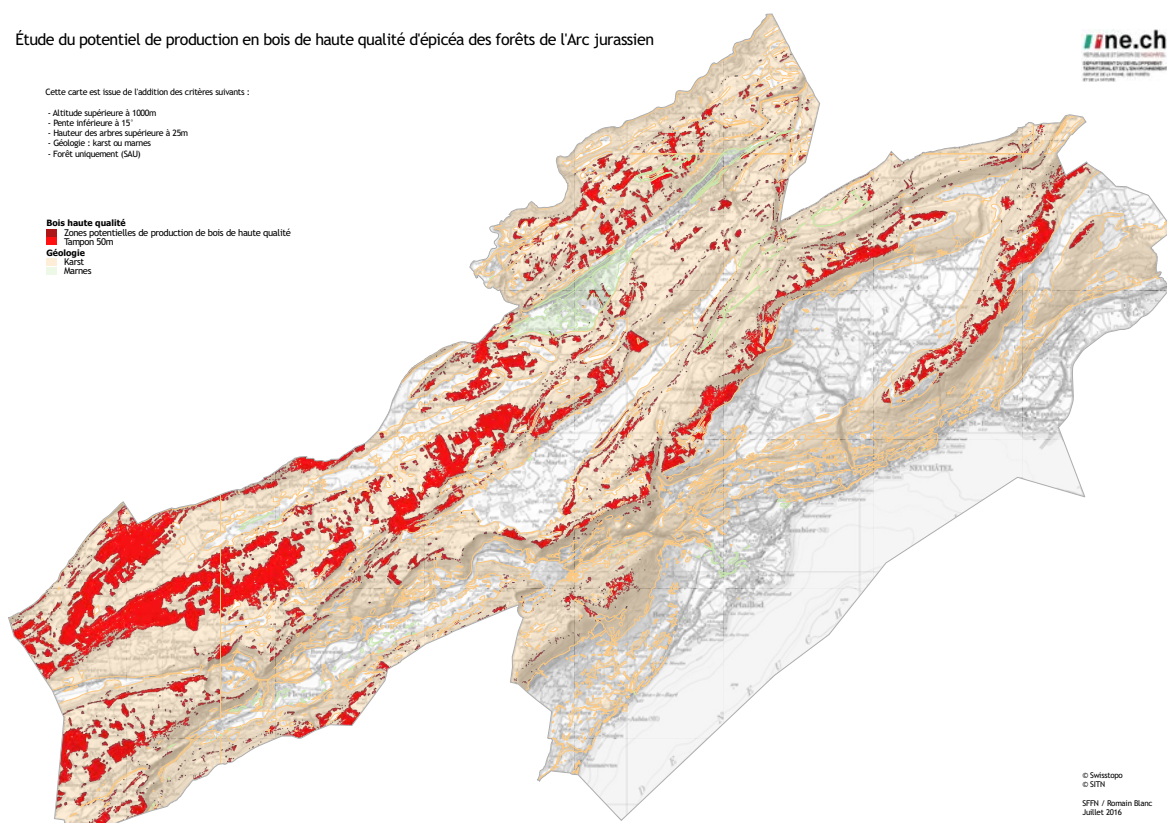


Fig. 3 Carte des zones potentielles de production de bois de haute qualité

Dans un second temps, des échantillons ont également été prélevés en dehors de ce périmètre suite à l'annonce des coupes par les gardes forestiers. Au total, 195 coupes ont été prises en compte, soit 164 dans le canton de Neuchâtel et 31 dans le canton de Vaud.

Dans chacune des coupes, le plus bel épicéa a été sélectionné sur la base des critères ci-après : l'absence de nœuds sur 5 m au moins, la rectitude du fût et un diamètre minimum de 50 cm. A qualité égale, l'arbre avec le plus gros diamètre a été choisi.

La position de l'arbre, ainsi que les données sur la station ont été récoltées afin d'avoir une situation de l'environnement de l'arbre. Pour les arbres du canton de Neuchâtel, la carte du modèle numérique des canopées établies sur les données Lidar a été utilisée pour la mesure de la hauteur de l'arbre et des concurrents. Dans le canton de Vaud, les données Lidar n'étant pas encore disponibles, les données ont été récoltées sur le terrain. Les données des procès-verbaux de martelage ont également été collectées.

Une fois les arbres abattus et débités en billon de 5 m de long, le taux d'humidité, la vitesse longitudinale du son (avec le TreeSonic de Fakopp) et l'angle de fibre ont été relevés et les bois classés selon les catégories suivantes :

Fig. 4 Mesures de la vitesse longitudinale sur le billon



Qualité A	1	Potentiel bois résonance: qq boutons < 2cm, parfaitement rond et centré, très clair (peu de bois final), fibre torse < 5cm/5m
	2	Potentiel bois haute qualité: max 10 branches sèches (sur 5m), ovale ou décentré max 10% du diamètre, bois final marqué, fibre torse 10cm/5m et plus
	3	Potentiel bois de menuiserie: max 20 branches sèches (sur 5m), ovale et décentré de plus de 10%, présence de quelques cernes de côte rouge, fibre torse 10cm/5m et plus
	4	Potentiel bois de charpente: Bois ne remplissant pas les caractéristiques des 3 premières catégories. Correspond à une qualité B selon l'Usage suisse du commerce des bois ronds.
	5	Potentiel bois de coffrage: Bois sain très nouveaux. Correspond à une qualité C selon l'Usage suisse du commerce des bois ronds.
	6	Potentiel bois rouge: Bois pourri pour plus de la moitié de la section.

Ensuite pour chaque arbre, une section complète de 10 cm d'épaisseur a été tronçonnée à cinq mètres de hauteur et transportée au Laboratoire de dendrochronologie.



Fig. 4 Prélèvements de sections complètes dans les forêts de la Sagne

4.2 Analyses dendrochronologiques

Les premières observations et mesures réalisées ont eu comme buts de définir le diamètre des arbres, la largeur de l'aubier, la présence ou non de bois de réaction et la position centrée ou excentrée de la moelle. Toutes les sections ont été photographiées.

Les échantillons ont ensuite été préparés afin de pouvoir effectuer les mesures dendrométriques qui sont effectuées de préférence sur les rayons moyens. Les prélèvements effectués englobent la totalité des cernes de la moelle au cambium. Ils évitent dans la mesure du possible les défauts du bois (noeuds, zones de compression ou d'extension des cernes, bois de réaction).

D'autres prélèvements ont également été sciés pour les analyses physiques et mécaniques effectuées par la Haute école spécialisées bernoise, Architecture, bois et génie civil HESB et l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich EPFZ.

La largeur totale de chaque cerne de croissance et du bois final est mesurée au 1/100^e de mm sur une table électronique. En tout, plus de 84'000 mesures ont été réalisées. Elles ont permis de déterminer l'âge des arbres, la régularité de la croissance, la largeur du cerne moyen et la quantité de bois final.



Fig. 5 Les prélèvements destinés aux mesures dendrométriques sont obtenus à l'aide d'une scie à ruban. Chaque section d'épicéa bénéficie de deux tranches permettant de définir la croissance moyenne.

4.3 Analyses des propriétés du bois et corrélation avec la station

L'approche méthodologique choisie a été de comparer les résultats de différentes propriétés des échantillons aux résultats de différentes études réalisées en Europe afin de situer la qualité des bois prélevés dans l'arc jurassien. Ceci permet de situer de la façon la plus objective possible le niveau de qualité des meilleures billes sélectionnées dans le cadre des exploitations forestières courantes des zones élevées de la chaîne jurassienne.

Les critères physiques et mécaniques déterminés furent les suivants :

- Densité (kg / m^3) à l'état conditionné (sur la base du poids et des dimensions)
- Vitesse de propagation du son (m/s)
- Module d'élasticité (N / mm^2)
- Résistance à la flexion (N / mm^2)
- Résistance à la compression (N / mm^2).

L'influence des conditions de croissance, comme l'altitude, l'exposition, le niveau thermique, la pente, surface terrière, etc. sur les propriétés du bois a été analysée afin de mettre en évidence d'éventuelles corrélations. Cette partie est la plus originale de ce projet, dans la mesure où il n'existe à ce jour pratiquement aucune recherche scientifique précise allant au-delà de règles très générales formulées par des praticiens.

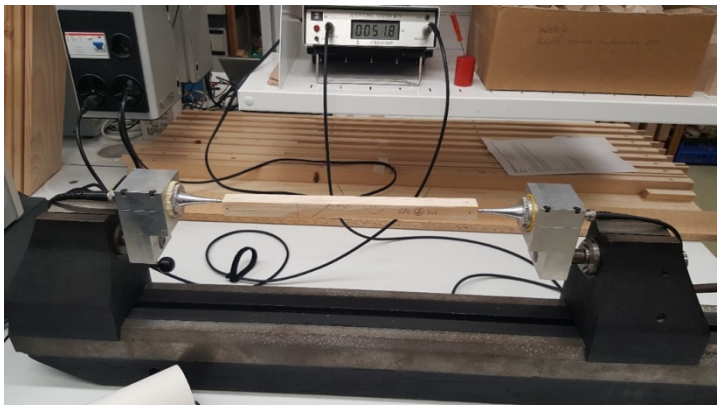


Fig. 6 : Test acoustique d'éprouvettes longues (Ultrasonic Tester BPV Steinkamp)



Prélèvement des éprouvettes longues et tests : 1 = t. acoustiques & flexion / 2 = compression / 3 = anal. de cernes

Prélèvement des éprouvettes courtes testées en compression. La structure des cernes a été au préalable analysée.

Fig. 7 : Matériel testé en éprouvettes longues (194 pièces) et en éprouvettes courtes (395 pièces).

4.4 Transfert de connaissances

Deux conférences de presse ont été organisées au cours de la durée du projet. La première le 24 novembre 2016 aux Geneveys-sur-Coffrane pour le lancement du projet et le 10 juillet 2018 au Laténium de Neuchâtel pour la présentation des résultats de l'étude. Les deux conférences de presse se sont déroulées en présence de Monsieur Laurent Favre, Conseiller d'Etat et Chef du Département du Développement Territorial et de l'Environnement (DDTE) du canton de Neuchâtel et de représentants du canton de Vaud. Nous avons eu le plaisir d'accueillir des représentants de la télévision suisse romande et locale neuchâteloise, la radio locale neuchâteloise et la presse écrite (Arcinfo, Agri et La Forêt). Une revue de presse est présentée en annexe 1.

En outre, les premiers résultats de l'étude ont été présentés lors de la l'Assemblée générale de ForêtNeuchâtel du 15 juin 2018 à Malvilliers.

5. Résultats

Les résultats présentés ci-après sont une synthèse des différents rapports techniques en annexe. Le lecteur se référera à ces rapports pour les résultats détaillés et les références bibliographiques.

5.1 Estimation du potentiel de production de bois de qualité du périmètre d'étude

La classification des billons des plus beaux arbres sélectionnés de manière visuelle avant l'abattage montre que 67% des arbres sélectionnés ont un potentiel de qualité A, dont 8% de bois de résonance (Tableau 2).

Qualité A	1	Potentiel bois de menuiserie	39%	67%
	2	Potentiel bois haute qualité	20%	
	3	Potentiel bois résonance	8%	
	4	Potentiel bois de charpente	18%	
	5	Potentiel bois de coffrage	4%	
	6	Potentiel bois rouge	11%	

Tab. 2 : Proportion du potentiel des qualités des billons en forêt après abattage

Sur cette base et en tenant compte des éléments suivants :

- les arbres choisis n'étaient en général que légèrement supérieurs aux autres épicéas martelés,
- les martelages ont été effectués par différentes personnes selon les principes de la coupe jardinée,
- le volume des billons choisis représente 39% du volume des arbres,

- les gros bois (> 52,5 cm de diamètre) représentent 86% du volume des épicéas martelés (selon les procès-verbaux des martelages),

nous estimons que le potentiel de qualité A du volume martelé d'épicéa dans les coupes répertoriées dans l'étude est **de 22,5%** dont 2,7 % de bois de résonance :

Qualité A	1	Potentiel bois de menuiserie	13,1%	22,5%
	2	Potentiel bois haute qualité	6,7%	
	3	Potentiel bois résonance	2,7%	
	4	Potentiel bois de charpente	6%	
	5	Potentiel bois de coffrage	1,3%	
	6	Potentiel bois rouge	3,6%	

Tab. 3 : Proportion du potentiel des qualités du volume martelé d'épicéa dans les coupes répertoriées dans le cadre de l'étude.

En appliquant ces pourcentages sur les volumes moyens exploités dans les différentes régions, le volume potentiel de qualité A dans l'arc jurassien neuchâtelois et vaudois est de 5'100 m³/an, respectivement de 3'825 m³/an dans le Jura neuchâtelois et de 1'305 m³/an dans le Jura vaudois. En regard des estimations initiales mentionnées au début de projet (voir tableau 1, chap. 2.3), les volumes potentiels des bois de haute qualité estimés dans le cadre de cette étude sont nettement supérieurs comme le montre le tableau ci-après (tableau 4).

Aucun échantillon n'ayant été prélevé dans le canton du Jura et dans le Jura bernois, nous n'avons pas appliqué les pourcentages potentiels de cette étude à ces régions. Il est néanmoins probable que pour l'ensemble de l'arc jurassien, le potentiel de bois d'épicéa de qualité A s'élèvent aux environs de 5'500 m³/an.

	Les Cottards (NE)	Canton de NE	Le Risoud (VD)	Jura Vaudois	Arc jurassien Total VD/NE
Volume d'épicéa exploité au-dessus de 1'000 m. (m3/an)	165	17000	2500	5'800	22'800
Volume potentiel d'épicéa de Qualité A (m3/an), 22,5%	37	3'825	563	1'305	5'130
Volume potentiel d'épicéa Bois de menuiserie (m3/an), 13,1 % du volume exploité	22	2'227	327	760	2'987
Volume potentiel d'épicéa Bois de haute qualité (m3/an), 6,7 % du volume exploité	11	1'139	168	388	1'527
Volume potentiel d'épicéa Bois de résonance (m3/an), 2,7 % du volume exploité	4	459	68	157	616

Tab. 4 : Evaluation du potentiel de production de bois selon les qualités en fonction du volume d'épicéa martelé dans le cadre de l'étude.

L'estimation de production de bois de résonance de plus de 600 m³/an dans l'arc jurassien corrobore les travaux de Ph. Domont qui dans son étude sur la mise en valeur du bois de résonance en Suisse a estimé que la Suisse disposerait d'un potentiel entre 1'000 et 3'000 m³/an (Domont Ph. 2000). En comparaison, dans les Grisons, Florinett AG exploite un volume de 300 m³/an et la société italienne Ciresa, qui commercialise aussi des planchettes, annonce un volume de 600 m³/an pour le Val de Fiemme en Italie.

La carte des zones potentielles pour la production de bois de haute qualité s'est révélée utile dans la phase de démarrage de l'étude pour cibler l'identification des coupes. Cependant, l'analyse de l'échantillonnage montre que seulement 60% des arbres sélectionnés sont à l'intérieur des zones potentielles définies. Les critères sont donc trop restrictifs. Par exemple, du bois de résonance a été identifié à une altitude de 850 m ou des pentes supérieures à 15°.

Les prix de vente

34 billons sélectionnés dans le cadre de l'étude ont été vendus aux enchères dans le cadre de la vente des bois précieux de Colombier (NE), organisée par ForêtNeuchâtel, en décembre 2016 et en décembre 2017. Le prix moyen de vente est de 241.-- CHF/m³. Le billon le plus cher a été vendu pour 700.--CHF/m³.

Dans le cadre de vente privée, les épicéas de qualité A se sont vendus lors de ces mêmes périodes entre 250.--et 1'000.--CHF/m³ (Source GPGFP).

Pour rappel le prix de vente moyen des grumes résineuses étaient en 2017 de Fr. 76,50 CHF/m³ (ForêtNeuchâtel 2018).

Code	Propriétaire	CHF/M3	Années	Potentiel
LSAPL061296	La Sagne	CHF 700	2016	BHQ
LSAPL09	La Sagne	CHF 633	2017	BHQ
LPA06	Val-de-Ruz	CHF 488	2017	BM
JOR078453	Etat NE MN	CHF 450	2016	BHQ
Lamb121	Hoirie Lambelet	CHF 433	2016	BM
Tüller2092	Conedera Marco	CHF 400	2016	BR
ZI04	Nicole Zill	CHF 278	2017	BHQ
JOR078397	Etat NE MN	CHF 275	2016	BR
FNE08	Val-de-Ruz	CHF 262	2017	BHQ
JOR088654	Etat MN	CHF 255	2016	BM
LLO04B	Le Locle	CHF 225	2017	BM
BPL13HA	Brot-Plamboz	CHF 225	2017	BHQ
DOM30A	Val-de-Ruz	CHF 225	2017	BM
MOT30	Val-de-Travers	CHF 225	2017	BR
BRG06	Etat NE MN	CHF 221	2016	BR
PRD03	Confédération	CHF 180	2017	BM
COV217	Val-de-Travers	CHF 180	2017	BM
Tüller2093	Conedera Marco	CHF 180	2016	BM
LGF07	Val-de-Ruz	CHF 166	2017	Charpente
BRV02	La Brévine	CHF 166	2017	BM
LSAB04	La Sagne	CHF 165	2017	BM
FLE02	Val-de-Travers	CHF 165	2017	BHQ
HGE01	Val-de-Ruz	CHF 156	2017	BM
BPL14HA628	Brot-Plamboz	CHF 155	2016	BHQ
LSAPL091331	La Sagne	CHF 155	2016	BM
LSAPL061311	La Sagne	CHF 155	2016	BM
LLO06	Le Locle	CHF 145	2017	BM
JOR09	Etat NE MN	CHF 145	2017	BM
SMC02	C. St-Maurice	CHF 145	2017	Charpente
DOM17B	Val-de-Ruz	CHF 136	2017	BM
JOR078699	Etat NE MN	CHF 135	2016	BM
Lamb93	Hoirie Lambelet	CHF 135	2016	BM
DOM05	Val-de-Ruz	CHF 116	2017	BM
Giroud9182	Giroud Charles-André	CHF 115	2016	BM
Prix moyen		CHF 241		

Tab. 4 : Prix de vente des billons du projet sur le marché des bois précieux de Colombier en 2016 et 2017

5.2 Analyses de la qualité des échantillons

5.2.1 Analyses dendrochronologiques

La qualité de l'échantillonnage a été analysée en fonction de trois critères, soit la régularité de la croissance, la largeur du cerne moyen et la quantité de bois final.

La variation des largeurs des cernes par rapport à la moyenne (écart-type) est un bon indice pour caractériser la **régularité des cernes**. En-dessous de 75, on peut considérer que la croissance est régulière et que l'échantillon peut entrer dans la classe des bois de résonance (figure 8). En moyenne, 54% des arbres échantillonnés entrent directement dans la classe de bois de résonance. Pour les épicéas abattus dans la Vallée de Joux, la proportion s'élève même à 78%. Dans le canton de Neuchâtel, 48% des échantillons entrent dans la classe de bois de résonance. La répartition géographique de ces arbres montre clairement un potentiel plus important dans la région de la Brévine.

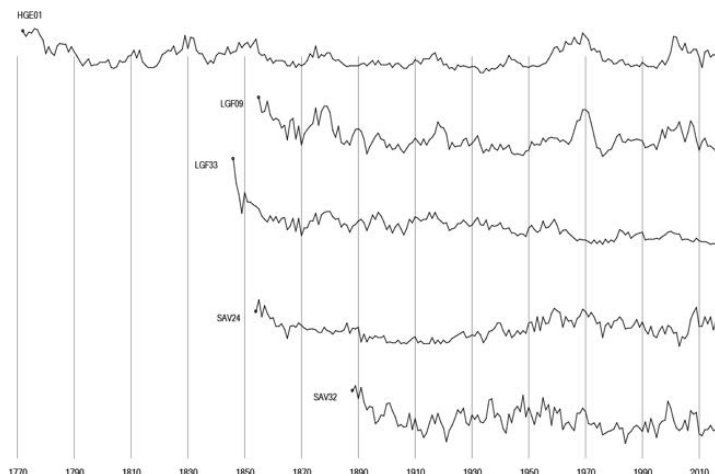


Fig. 8 Courbes dendrochronologiques d'épicéa du Val-de-Ruz qui présentent un écart-type en dessous de 75.

Un minimum de **bois final** (partie du cerne annuel qui se forme en été jusqu'à la fin de la période végétative) assure une plus grande légèreté au bois et une meilleure résonance. Le 97% des bois étudiés présente un pourcentage de 20% ou moins de bois final (figure 9). La proportion ne dépasse donc presque jamais la limite fixée au début de l'étude à 20% du cerne total au maximum (valeur idéale selon les ouvrages de référence consacrés au bois de résonance tels que Buksnowitz et al. 2006 ou Zieger 1960).

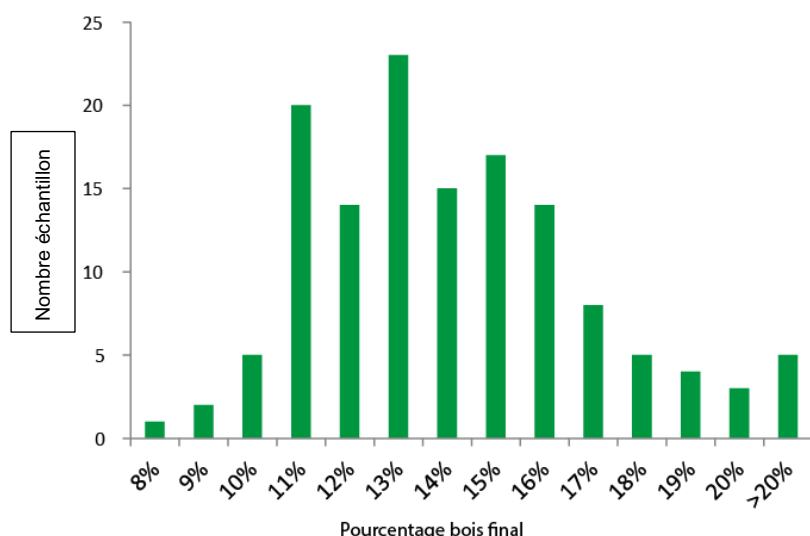


Fig. 9 : Nombre d'échantillons mesurés par classe de pourcentage de bois final

Pour le bois de résonance, **la largeur moyenne des cernes** de croissance est importante et destine un épicéa à un certain type d'instruments de musique ; pour les violons, une largeur moyenne de 1 à 1,5 mm est recherchée. Une croissance plus importante de 1,5 mm à 2,5 mm est désirée par les facteurs de pianos et de harpes et 3 à 4 mm pour la fabrication d'un violoncelle. Dans la pratique, la possibilité d'offrir une gamme étendue de largeurs de cernes est importante car les luthiers peuvent avoir des exigences différentes pour la fabrication d'un même type d'instrument.

Parmi les épicéas analysés, la largeur moyenne varie de 0,7 mm à 3,16 mm et sont donc tous potentiellement valorisables comme bois de résonance, au moins partiellement. Quatre épicéas présentent une croissance moyenne en dessous du millimètre et ils viennent tous de la Vallée de Joux.

Les mesures effectuées en coupe transversale des échantillons confirment les résultats ci-dessus relatifs à la régularité et à la largeur des cernes.

La classification des échantillons basée sur l'analyse des critères dendrochronologiques des tranches de sections indique un potentiel de bois de résonance de 68%, de bois de haute qualité de 27% et de bois de menuiserie de 5%.

5.2.1 Analyses mécaniques et physiques

La **densité** moyenne de l'ensemble des échantillons est de 432 kg/m³. Les billons classés comme bois de résonance après l'abattage ont une densité moyenne de 456 kg/m³. Ces valeurs se situent dans la fourchette 430 à 470 kg/m³ admises dans différents ouvrages de référence consacrés au bois de résonance. Du point de vue de la densité du bois, les épicéas des massifs forestiers de l'arc jurassien représentent donc un potentiel important de production de bois de haute qualité.

La **vitesse moyenne de propagation longitudinale du son** de l'ensemble des échantillons est de 5'729 m/s. Cette valeur se situe dans la fourchette 5'600 à 6'000 m/s admise dans différents ouvrages de référence consacrés au bois de résonance. La vitesse maximale mesurée était de 6'302 m/s. Donc du point de vue de la vitesse longitudinale de propagation du son les épicéas des massifs forestiers de l'arc jurassien représentent également un potentiel important de production de bois de haute qualité.

Le critère qualitatif principal pour du bois de résonance est le **Coefficient de Résonance** (QR = rapport entre la vitesse longitudinale du son et la densité). Les valeurs des 193 échantillons sont dans l'ensemble excellentes, la plupart étant supérieure à la valeur référence de 12 m⁴/s*kg (figure 10). Le coefficient de résonance maximal mesuré était de 17.2 m⁴/s*kg. La comparaison avec la répartition du Coefficient de Résonance QR dans l'analyse acoustique de 1200 tables d'harmonie de guitares (Ziegenhals 2001) confirme parfaitement l'excellente répartition des valeurs obtenues pour les bois de l'arc jurassien (figure11). Ces valeurs sont équivalentes, voire supérieures aux valeurs rapportées pour les Grisons et Paneveggio.

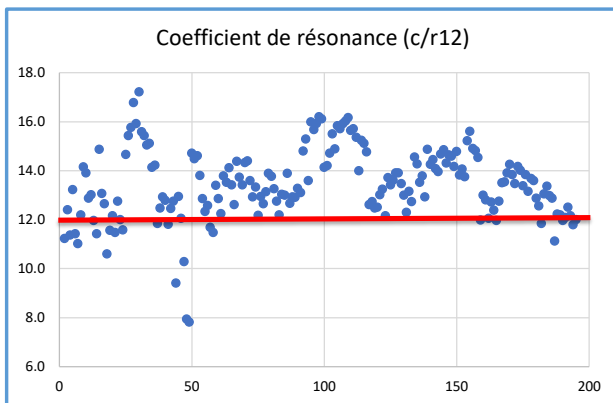


Figure 10 : Distribution des Coefficients de Résonance pour les 193 échantillons longs testés dans les laboratoires de l'EPFZ, avec indication du seuil de référence de 12, permettant des comparaisons.

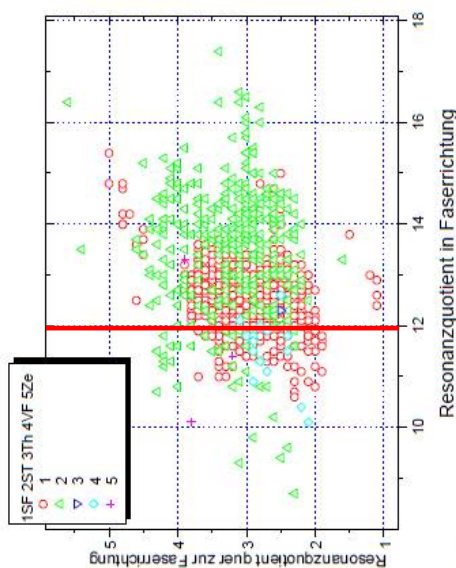


Figure 11 : Distribution des Coefficients de Résonance pour 1200 tables d'harmonie de guitares (Ziegenhals 2001), avec indication du seuil de référence de 12.

Un autre critère qualitatif du bois de résonance est la **distribution du coefficient de Résonance en fonction de la densité** (figure 12). Les bois les plus appréciés possèdent à la fois une haute vitesse longitudinale de propagation du son, tout en étant de faible densité, clairement en-dessous de la valeur moyenne pour l'épicéa (470 kg/m³) comme le montre le diagramme ci-après. Autant pour le critère *Coefficient de Résonance* que pour le critère *Basse densité*, les valeurs obtenues dans l'étude ont une distribution très intéressante.

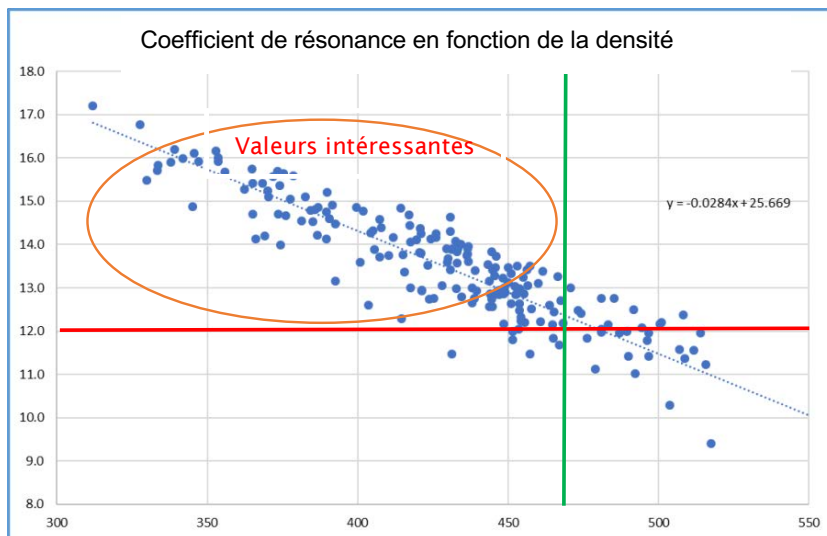


Figure 12 : Distribution des Coefficients de Résonance en fonction de la densité avec indication des seuils de référence pour l'arc jurassien.

En comparant les résultats avec ceux de l'étude effectuée par Sonderegger, Alter et Niemz (2008) sur un ensemble de 160 échantillons sélectionnés comme caractéristiques pour du bois de résonance (figure 13), on constate que la distribution des valeurs du coefficient de résonance est proportionnellement inférieure à la distribution des bois échantillonnés de l'arc jurassien. Autrement dit, il existe potentiellement une plus grande proportion de bois de haute qualité dans l'arc jurassien qu'aux Grisons.

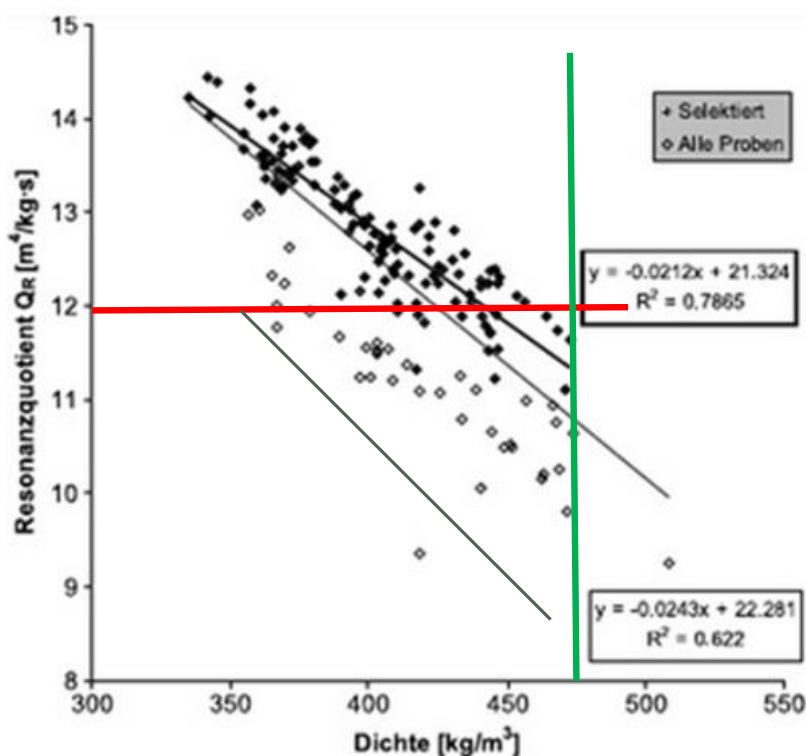


Figure 13 : Relation Quotient de résonance / Densité, telle que représentée dans Sonderegger et al. (2008). Les valeurs indiquées en foncé furent obtenues en éliminant un certain nombre d'arbres de classement inférieur. « Resonanzquotient » = quotient de résonance / « Dichte » = densité.

5.3 Corrélations entre station, sylviculture et propriétés des bois

Du point de vue du critère altitudinal, les massifs forestiers des hauteurs jurassiennes offrent leur potentiel de bois de haute qualité, et en particulier de résonance, déjà à partir de 800 m environ et ce jusqu'à une altitude de 1400 m. Des billons de l'étude classés visuellement comme « bois de résonance » avaient en effet été trouvés à partir de l'altitude de 850 m environ. Néanmoins, l'effet de l'altitude sur la densité n'est que faiblement décelable pour le matériel testé.

L'analyse de la largeur des cernes en fonction de l'emplacement des arbres selon un axe Ouest (océanique) - Est (continental) donne une très faible corrélation ($R^2 = 0.17$).

Aucune tendance significative ne se dégage de l'étude de l'exposition, du niveau thermique, de la topographie, du type de sol, de la profondeur du sol, de l'association végétale comme facteur d'influence sur les structures ou les propriétés des bois testés dans le cadre de cette étude. Néanmoins, les pentes locales les plus fréquentes caractérisant l'emplacement des arbres choisis se situent entre 10 et 40%. Cela relativise la règle que les bois de haute qualité (et en particulier de résonance) croîtraient en particulier sur des topographies localement planes.

La hauteur moyenne des arbres à la base de cette étude est de 35.4 m. Une part importante de 78% est comprise entre les valeurs de 31 m et 42 m. Ceci permet de déduire que des bois de haute qualité sont fournis par des arbres de taille relativement importante. La taille de l'arbre n'a cependant dans cette étude pratiquement aucune influence sur la largeur des cernes. Les arbres sélectionnés font cependant clairement partie de la strate dominante.

L'étude des critères suivants comme facteur d'influence sur la structure des cernes ou la densité du bois n'a pas dégagé de corrélation significative :

- la longueur de la couronne,
- la surface terrière de la cellule d'influence,
- le nombre de tiges de la cellule d'influence,
- le volume de la cellule d'influence,
- la forme des branches,
- la composition du peuplement.

L'analyse de la structure et de la composition des peuplements laisse apparaître une grande plasticité pour ce qui est de l'obtention de bois de haute qualité, respectivement de résonance. Cette analyse, effectuée critère par critère, ne montra que peu ou pas d'effet sur les structures et propriétés des bois présélectionnés dans les parterres de coupe. Il est peu probable qu'une analyse multifactorielle n'apporte plus de clarté.

Des quotients de résonance élevés (> 12) sont à observer dans toutes les catégories de classification de billes issus de zones aptes à fournir des bois de lutherie dans l'arc jurassien. Ceci justifie la pratique de l'élagage dans le but de réduire la nodosité de tiges susceptibles de fournir dans le futur des bois de haute qualité (BHQ) et de résonance (BR).

Bien qu'aucun élément permettant de privilégier un type de sylviculture ne ressortent de cette étude, il convient de rappeler qu'une gestion en forêt jardinée ou de type jardinée est favorable à la régularité de la croissance. Comme le montre la figure 14, la croissance du diamètre augmente rapidement en futaie régulière et atteint vite un maximum et diminue ensuite considérablement. En forêt jardinée, la croissance en diamètre demeure dans les jeunes années à un bas niveau, elle augmente peu à peu et reste ensuite constante longtemps avant de diminuer lentement.

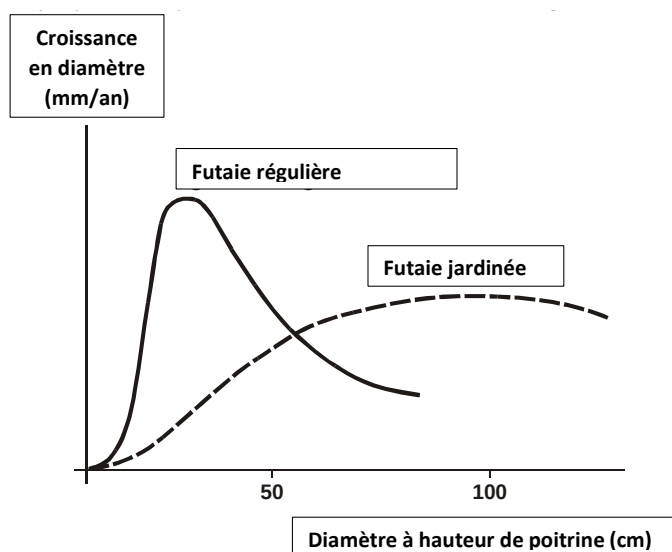


Figure 14 : Comparaison de la croissance du diamètre entre futaie régulière et futaie jardinée (Schütz J.P. 2001)

5.4 Méthodologie d'identification du bois de haute qualité

La méthodologie suivante développée au cours de l'étude peut être appliquée pour une bonne identification du bois de haute qualité. Les étapes sont les suivantes :

1. Première identification lors du martelage avec les critères visuels suivants :

- Absence de nœuds sur 5 m au moins
- Rectitude du fût
- Diamètre DHP minimum de 50 cm

Marquer les arbres avec un signe distinctif, par exemple « BHQ »

2. Après l'abattage, classer les bois identifiés en trois catégories selon les critères suivants :

- **Potentiel bois résonance** : quelques boutons < 2cm, parfaitement rond et centré, très clair (peu de bois final), fibre torse < 5cm/5m, largeur des cernes inférieure à 4 mm, croissance régulière des cernes à 5m.
- **Potentiel bois haute qualité** : max 10 branches sèches (sur 5m), ovale ou décentré max 10% du diamètre, bois final marqué, fibre torse 10cm/5m et plus, largeur des cernes inférieure à 4 mm, croissance régulière des cernes à 5m.
- **Potentiel bois de menuiserie** : max 20 branches sèches (sur 5m), ovale et décentré de plus de 10%, présence de quelques cernes de côte rouge, fibre torse 10cm/5m et plus, largeur des cernes inférieure à 4 mm, croissance régulière des cernes à 5m.

En fonction de la quantité, créer un ou deux lots et chercher un acheteur ou proposer les billons au marché annuel des bois précieux de votre région, par exemple à la vente annuelle des bois précieux de ForêtNeuchâtel à Colombier (NE).

6. Conclusions

Au terme de l'étude, nous pouvons affirmer que l'arc jurassien détient un réservoir très important de bois d'épicéa de haute qualité avec un potentiel de production d'environ 5'500 m³/an de bois de qualité A, dont plus de 600 m³/an de bois de résonance. En regard des estimations initiales mentionnées en début de projet, ce potentiel est nettement supérieur aux attentes et représente des volumes comparables aux sites reconnus en Russie, Roumanie et Italie.

Les analyses dendrochronologiques, physiques et mécaniques des échantillons prélevés confirment l'exceptionnelle qualité des épicéas de l'arc jurassien liée probablement à leur caractère génétique, mais aussi à la gestion en futaie jardinée qui favorise la régularité de la croissance des cernes. Ci-après quelques valeurs remarquables :

- 97% des échantillons présente un pourcentage inférieur à 20% de bois final (valeur idéale selon les ouvrages consacrés au bois de résonance).
- La largeur moyenne des épicéas analysés varie de 0,7 mm à 3,16 mm et sont tous potentiellement valorisable comme bois de résonance au moins partiellement.
- La densité moyenne de l'ensemble des échantillons est de 432 kg/m³, soit dans la fourchette 430 à 470 kg/m³ admises dans différents ouvrages de référence consacrés au bois de résonance.
- La vitesse moyenne de propagation longitudinale du son de l'ensemble des échantillons est de 5'729 m/s. Cette valeur se situe dans la fourchette 5'600 à 6'000 m/s admises dans différents ouvrages de référence consacrés au bois de résonance.
- Le coefficient de résonance (rapport entre la vitesse longitudinale du son et la densité) de la plupart des échantillons est supérieure à la valeur référence de 12.

Sous réserve de respecter les conditions forestières, le mode sylvicultural en futaie jardinée et des méthodes de récolte soignées, le potentiel de production de ce réservoir d'épicéa de haute qualité est pratiquement inépuisable.

Une meilleure valorisation de ce potentiel devrait se traduire par la pratique de l'élagage pour réduire la nodosité de tiges susceptibles de fournir dans le futur des bois de haute qualité, par des actions de tri des billons, le développement d'une logistique (stockage, transport, contacts avec les scieurs, les marchands, etc.) et finalement par la création, dans l'arc jurassien, d'une filière apte à transformer et à fournir, d'une part des produits de haute qualité répondant à la demande suisse et internationale en menuiserie et ébénisterie haut de gamme, et d'autre part des produits utilisables par les facteurs d'instruments de musique.

L'étude a également mis en évidence que le réservoir de bois de résonance de l'arc jurassien est comparable voire plus important que ceux des Grisons ou du Val de Fiemme en Italie. Ces régions se sont organisées, avec le soutien de l'Etat, pour élaborer des produits directement utilisables par les facteurs d'instruments de musique du monde entier. Les bois de résonance de l'arc jurassien aux caractéristiques spécifiques ont donc une place à prendre sur le marché mondial, en particulier en Chine, au Japon, aux USA et en Europe.

7. Perspectives

Les résultats de l'évaluation du potentiel de production confirment, en termes de qualité et de quantité, l'existence d'un réservoir d'épicéa de haute qualité dans l'arc jurassien et l'intérêt de mieux valoriser ce matériel.

Les initiateurs du projet, ForêtNeuchâtel et le GPGFP, estiment nécessaire de passer à une 2^{ème} phase du projet et de mener une étude du potentiel du marché pour ces produits de haute qualité afin de déterminer les acteurs, leurs besoins, leurs procédures d'achat, leurs volumes de consommation et les qualités exigées. L'étude devrait avoir pour objectif de déterminer les possibilités de commercialisation de produits de bois de haute qualité d'épicéa en Suisse et en particulier au niveau international pour le bois de résonance. Elle devrait aussi permettre d'identifier, les acteurs potentiellement intéressés à cette filière et déterminer les champs d'action et mesures à mettre en œuvre pour mettre en place dans les prochaines années une filière Bois d'épicéa de haute qualité dans l'arc jurassien.

François Godi
GG Consulting Sàrl

Jean Wenger
Président de ForêtNeuchâtel

Alain Tüller
Président du GPGFP

Colombier, 27 septembre 2018

Bibliographie

Buksnowitz et al (2006) :

Resonance wood [*Picea abies* (L.) Karst.] - Evaluation and prediction of violin makers' quality-grading

Domont Ph., 2000

Mise en valeur des bois de résonance en Suisse. Rapport final à l'intention du Fonds pour les recherches forestières et l'utilisation du bois, Direction fédérale des forêts, Berne. 46 p

Domont Ph., 2001

Sans forêts de montagne, pas de musique. In : Silviva (éd). Tourisme durable grâce à la gestion durable des forêts de montagne. Dossier d'information Journée internationale de la forêt, Birmensdorf : Silviva, p. 21-24.

ForêtNeuchâtel 2018

Rapport annuel 2017.

Jacot Sylvain, 2018

Rapport final 2018, Etude du potentiel de production en bois de haute qualité d'épicéa des forêts de l'arc jurassien, La Sagne, 26 p.

Langenegger Fabien, 2018

Étude du potentiel de production en bois de haute qualité d'épicéa des forêts de l'arc jurassien : analyses dendrochronologiques. Laboratoire de dendrochronologie, Neuchâtel.

Lavarini B., 2014/1

Pour la création d'une filière de résonance dans le canton de Neuchâtel (note non publiée).

Lavarini B. 2014/2

Etude prospective pour déterminer les possibilités de production soutenue et de commercialisation des bois de résonance du Canton de Neuchâtel du 11-11-2014 (note non publiée).

Lavarini B., 2016/1

Hypothèses de calcul du chiffre d'affaire réalisable par la vente des épicéas de classe A et de résonance pour l'arc jurassien du 4 -1- 2016 (note non publiée).

OFEV (Ed.) 2015

Annuaire La forêt et le bois 2015. Office fédéral de l'environnement, Berne. Etat de l'environnement N° 1520: 162 p.

Schütz J.P. 2001

Der Plenterwald, Parey, 2001, 207 p

Ziegenhals, G. (2001)

"Resonanzholzmerkmale von Gitarrendecken," ("Resonance wood properties"), Fachausschuss Musikalische Akustik in der DEGA, Sept. 2001, 20–23.

Zieger E. 1960

Untersuchungen über äussere Merkmale, Holzeigenschaften und forstgeographische Vorkommen der Resonanzholzqualitäten bei Fichte und einige andere Holzarten. Mitt. Staatsforstverwaltung Bayerns (1960). Heft 31:285-298

Zuercher Ernst 2018

Rapport Projet Bois de Haute Qualité. Haute école spécialisée bernoise / Architecture, Bois et Génie civil, Bienne.

Annexe 1 : Revue de presse

Revue de presse suite à la Conférence de presse du 24.11.16

Radio/TV

Liens des différents reportages (à voir et écouter) :

- RTS / téléjournal 19:30 du 24.11.16 : <http://www.rts.ch/play/tv/19h30/video/le-secteur-du-bois-veut-se-specialiser-dans-le-bois-de-haute-qualite?id=8190930>
- CanalAlpha: téléjournal du 24.11.16 : <http://www.canalalpha.ch/actu/qualite-du-bois-neuchatelois-touchez-moi-ca/>
- RTN 24.11.2016 : <http://www.rtn.ch/rtn/Actualites/Journaux-audio/Journaux-audio-1.html?pid=3145763>

Articles dans la presse écrite

Express du 25.11.2016
Agri du 2.12.2016
La Forêt, N° 2/2017

Revue de presse suite à la Conférence de presse du 10.07.18

Radio/TV

Liens des différents reportages (à voir et écouter) :

- CanalAlpha: téléjournal du 11.07.18 <http://www.canalalpha.ch/actu/nos-forets-regorgent-de-pepites-il-faut-les-exploiter/>
- RTN 11.07.2018 : Promenons-nous dans les bois... à la recherche de trésors
<http://www.rtn.ch/rtn/Actualites/Journaux-audio/Journaux-audio-1.html?pid=3145763>

Articles dans la presse écrite

ARCINFO du 19.07.2018
La Forêt, N° 8/2018
Journal forestier suisse, 5/2018



Sylvain Jacot

Ingénieur forestier HES indépendant

Gestion forestière

**«Etude du potentiel de production en
bois de haute qualité d'épicéa des
forêts de l'arc jurassien»**

Rapport final 2018

Mandants: **ForêtNeuchâtel**

Président Jean Wenger, Chemin des Longues Raies 13 - 2013 Colombier

Groupement des propriétaires et gérants de forêts privées GPGFP

Président Alain Tüller, Sandoz 21, 2105 Travers

Mandataire: Jacot Sylvain

Ingénieur forestier HES indépendant

La Queue de l'Ordon 241, 2314 La Sagne

078 630 19 58 jacotsylvain.foret@bluewin.ch

Lieu et date: La Queue de l'Ordon 241, le 08.09.2018

Table des matières

Table des matières	2
1. Introduction	3
2. Méthode	3
2.1 Carte des potentiels	3
2.2 Échantillonnage	3
2.3 Déroulement	4
2.4 Relevés	4
2.4.1 Relevé de la hauteur	5
2.4.2 Données de martelage	6
2.5 Prélèvements et tests	6
3. Résultats	7
3.1 Pertinence de la carte des potentiels	7
3.2 Influence de l'altitude et de la position sur la chaîne du Jura	8
3.3 Volume de bois prélevé	10
3.4 Débouchés des billons	10
4. Discussion	12
4.1 Discussion sur la méthode	12
4.2 Pertinence de la carte des potentiels, influence de l'altitude et de la position sur la chaîne du Jura	13
4.3 Volume de bois prélevé et représentativité	14
4.4 Débouchés des billons	16
5. Conclusion	16
6. Bibliographie	17
Annexe 1: Appréciation de l'âge des souches.	
Annexe 2: Fiche de relevés de terrain des données stationnelles	
Annexe 3: Fiche de relevé en bureau des données sylvicoles	
Annexe 4: Mise en forme des données stations et billons	

1. Introduction

Dans le cadre du projet «Etude du potentiel de production en bois de haute qualité d'épicéa des forêts de l'arc jurassien», j'ai été mandaté pour participer à l'organisation de l'étude et pour effectuer les relevés/prélèvements dans le terrain. L'exercice forestier 2017 (de septembre 2016 à juin 2017) était pour ce projet une «phase de test». Cette période a fait l'objet d'un rapport en juin 2017. Le présent rapport reprend l'ensemble du projet mais en se focalisant sur le dernier exercice (l'hiver 2017-2018).

2. Méthode

2.1 Carte des potentiels

Pour rappel, lors de l'exercice précédent, une carte de potentiels avait été effectuée sur la base des données informatiques à disposition (SIG)

- Altitude supérieure à 1000m
- Pente inférieure à 15°
- Hauteur des arbres supérieure à 25m
- Géologie: karst ou marnes
- Pluviométrie annuelle supérieure à 1000mm (données estimées).

Pour améliorer la visibilité, Romain Blanc du SFFN, auteur de la carte, a rajouté un tampon de 50m.

Pour le canton de Vaud, une carte a aussi été faite, mais comme les données sur la hauteur des arbres manquaient et que les données géologiques n'était pas comparables, cette carte n'a pas été utilisée comme sur Neuchâtel.

2.2 Échantillonnage

La prospection des zones à échantillonner s'est faite de 2 manières: active chez les propriétaires publics et passive chez les privés.

Les divisions des arrondissements neuchâtelois (sauf arrondissement de Boudry) programmées sur l'exercice 2018 ont été recoupées avec la carte des potentiels de manière visuelle.

Les coupes sélectionnées ont été classées selon 3 catégories, afin de pouvoir tester la véracité de la carte des potentiels élaborée pour le canton de Neuchâtel.

Catégories	Descriptions	Nombre
1. Oui	Celles qui sont clairement couvertes par la zone.	91 (55%)
2. Éventuellement		23 (14%)
3. Non	Celles qui ne sont pas couvertes par la zone, mais qui par exemple sont en dessous de 1000m dans des stations à beau bois de l'envers.	50 (31%)
Total		164

Au total, avec les coupes sur Vaud, ce sont 195 coupes (1506ha) qui ont concerné l'étude. 11% de celles-ci étaient en forêt privée et 8% en pâturage boisé.

2.3 Déroulement

Le travail de terrain s'est fait en 2 passages: Un premier pour faire le relevé de l'arbre et le second pour faire les tests et le prélèvement du billon.

2.4 Relevés

Chacune de ces coupes devait être visitée (parcourue). A chaque fois, le plus bel épicéa avec un diamètre minimum de 50cm était sélectionné et marqué «BHQ» au spray afin que les exploitants le reconnaissent, le débitent à 5 m et le mettent de côté. La nodosité est le premier critère de sélection utilisé, en deuxième la rectitude du fût ; à qualité égale, c'est l'arbre avec le plus gros diamètre qui a été choisi.

Une fois l'arbre marqué (sélectionné), celui-ci a fait l'objet d'un relevé détaillé, selon un protocole mis sur pied avec l'aide du Professeur Schütz (voir annexe x). L'objectif était de récolter, premièrement, des données sur la station (par exemple le sol), ainsi que des données sur la concurrence à laquelle l'arbre a été soumis. Sur Neuchâtel, grâce à la carte du modèle numérique des canopées (Lidar), chaque arbre a pu être repéré et situé au mètre près. De nombreuses données, comme la hauteur de l'arbre, celle de ses concurrents, ainsi que l'exposition, ont été relevées automatiquement à l'aide des SIG. Sur le canton de Vaud, ne disposant pas encore de ces cartes et données issues du Lidar, les données ont été relevées dans le terrain et la position de l'arbre est approximative.

La concurrence a été évaluée à l'aide de 3 outils différents :

- Le coefficient de concurrence selon Schütz et Pommerening (2013).
- La surface terrière et le volume sur pied actuel.
- Un indice de concurrence passé.

Pour cela, tous les arbres de plus de 17.5cm de diamètre, dans un rayon de 8m autour de l'arbre sélectionné, ont été mesurés (DHP et hauteur). Pour l'indice de concurrence passé, le diamètre et l'âge des souches dans ce même rayon a été relevé. L'âge a permis de «pondérer» la surface terrière de ces souches en donnant plus de poids aux souches récentes.

Le coefficient de concurrence calcule le nombre de mètres courants de couronne qui entrent dans le cône de lumière de l'arbre (voir figure 1).

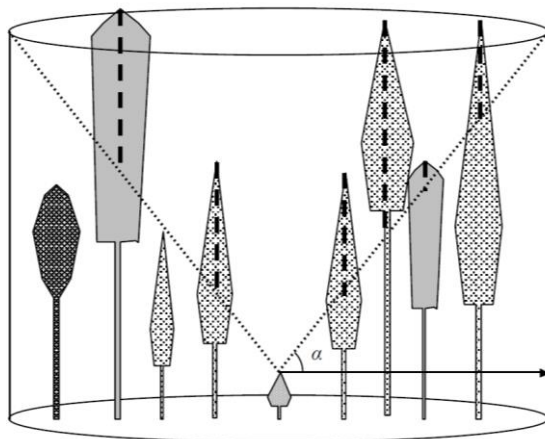


Figure 1: Coefficient de concurrence selon Schütz et Pommerening (2013)

Sur l'ensemble de l'étude, ce sont 175 arbres qui ont pu être relevés.

2.4.1 Relevé de la hauteur

Pour calculer le coefficient de concurrence selon Schütz et Pommerening (2013), il a fallu connaître la hauteur de l'arbre sélectionné ainsi que celle de ses concurrents.

Grâce au Lidar et à la position exacte de chaque arbre, la hauteur des arbres visibles sur le modèle numérique de canopée a pu être calculée automatiquement. Les petits arbres, ainsi que ceux du canton de Vaud, ont été mesurés dans le terrain avec une latte de 5 m et la méthode «Christen» (Bouchon et Pardé 1987), tout comme la hauteur du bas de la couronne. 17 grands arbres ont été mesurés avec la méthode Christen et avec le Lidar. En moyenne, la méthode Christen sous-estime de 1m la hauteur par rapport au Lidar (différence maximum 6m). Huit arbres ont également été mesurés au sol par les bûcherons; la différence avec le Lidar n'est là de quelques centimètres (différence maximum 1m). Ces données sont trop peu nombreuses pour en tirer des conclusions, mais elles ont tendance à confirmer notre choix de favoriser la méthode Lidar quand cela était possible (arbres dominants nettement distinguables dans la canopée).

2.4.2 Données de martelage

Afin de pouvoir déterminer la proportion d'épicéa prélevé, les procès-verbaux de martelage ont été étudiés pour 92 coupes sur 112 concernées par un prélèvement. Ces 92 procès-verbaux proviennent de toutes les régions et de forêts publiques et privées.

2.5 Prélèvements et tests

Une fois ces arbres marqués et débités en billons, divers relevés ont pu être effectués, notamment le taux d'humidité et la vitesse du son avec le TreeSonic de Fakopp. L'angle de la fibre a également été estimé. Après plusieurs essais de différentes méthodes (1. Blanchis, planté de serpe et traction. 2. Planté du couteau dans la coupe transversale. 3. Arracher des bouts de liber) on se rend compte qu'il n'est pas si facilement déterminable. C'est donc une combinaison de ces méthodes qui a été utilisée pour en déduire une estimation en 3 catégories (< 3.5cm/5m (7/1000); 5cm/5m; > 10cm/5m) combinée à d'autres critères visuels. Les billons ont été classés en 6 catégories :

1	Potentiel bois de résonance: qq boutons < 2cm, parfaitement rond et centré, très clair (peu de bois final), fibre torse < 5cm/5m. Correspond à une qualité A selon l'Usage suisse du commerce des bois ronds.
2	Potentiel bois haute qualité: max 10 branches sèches (sur 5m), ovale ou décentré max 10% du diamètre, bois final marqué, fibre torse 10cm/5m et plus. Correspond à une qualité A selon l'Usage suisse du commerce des bois ronds.
3	Potentiel bois de menuiserie: max 20 branches sèches (sur 5m), ovale et décentré de plus de 10%, présence de quelques cernes de côte rouge, fibre torse 10cm/5m et plus. Correspond à une qualité A selon l'Usage suisse du commerce des bois ronds.
4	Potentiel bois de charpente: Bois ne remplissant pas les caractéristiques des 3 premières catégories. Correspond à une qualité B selon l'Usage suisse du commerce des bois ronds.
5	Potentiel bois de coffrage: Bois sain très nouveaux. Correspond à une qualité C selon l'Usage suisse du commerce des bois ronds.
6	Potentiel bois rouge: Bois pourri pour plus de la moitié de la section.

Initialement, pour qu'un billon puisse être classé comme potentiel de bois de résonance, il devait afficher un angle de fibre de maximum 3.5cm sur 5m. Or, au fil des relevés, il s'est avéré que cette condition était trop sévère, que de nombreux billons commercialisés comme bois de résonance ne remplissaient pas cette condition. Après discussions et consultations de la littérature, il a été décidé d'abaisser l'exigence à 5cm pour 5 pour les «potentiel bois de résonance» et 10cm pour 5m pour les «potentiel haute qualité». En effet selon Zieger (1960) il serait même possible d'avoir du bois de résonance avec plus de 1% de déviation des fibres (5cm pour 5m). Toutes les données de relevés ont été analysées et certains billons ont été reclassés.

Pour l'ensemble de l'étude, ce sont 140 billons qui ont été «taxés», classés dans les 6 catégories de qualité. 138 ont été testés (vitesse du son).

3. Résultats

3.1 Pertinence de la carte des potentiels

Afin de rendre l'analyse probante, c'est la position de l'arbre (et pas de la division) qui a été prise en compte; grâce à cela, la catégorie «éventuellement» tombe. La répartition des 124 arbres (localisés précisément) est la suivante: 75 arbres, soit 60%, en zone favorable et 49, soit 40%, en zone non favorable.

Sur ces 124 arbres, 110 (68% oui et 32% non) ont pu être classés dans les catégories de qualité (billons testés). On constate qu'il y a autant de bois «potentiel bois de résonance» dans les zones sans potentiel (non) que dans les zones avec (oui). Pour la qualité «potentiel bois de menuiserie», il y en a même plus dans les zones non favorables. Il n'y a pas de qualité coffrage dans les zones non favorables.

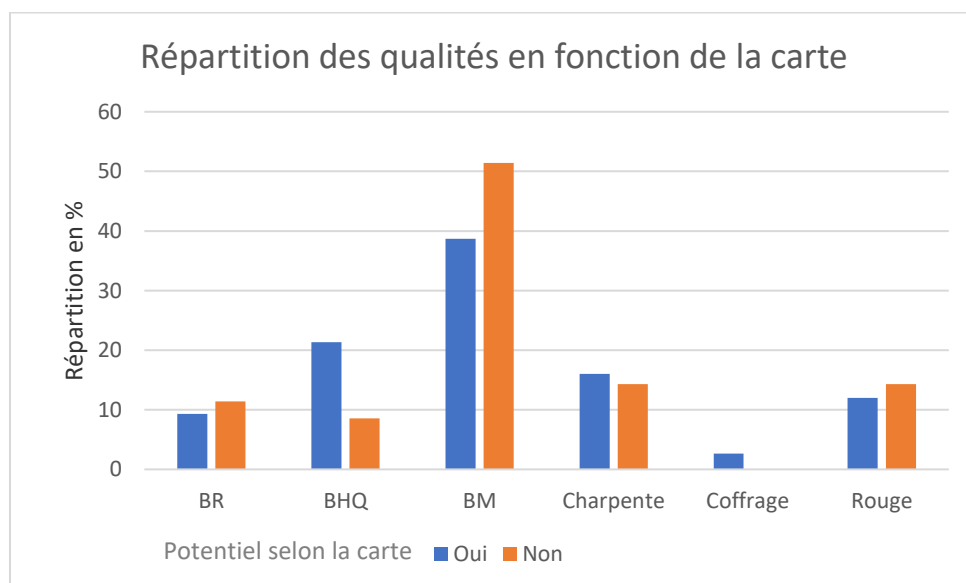


Figure 2: Répartition des qualités selon la carte N=110, 75 oui 35 non

Concernant la vitesse du son, les zones non favorables auraient même une tendance à avoir une vitesse du son plus rapide.

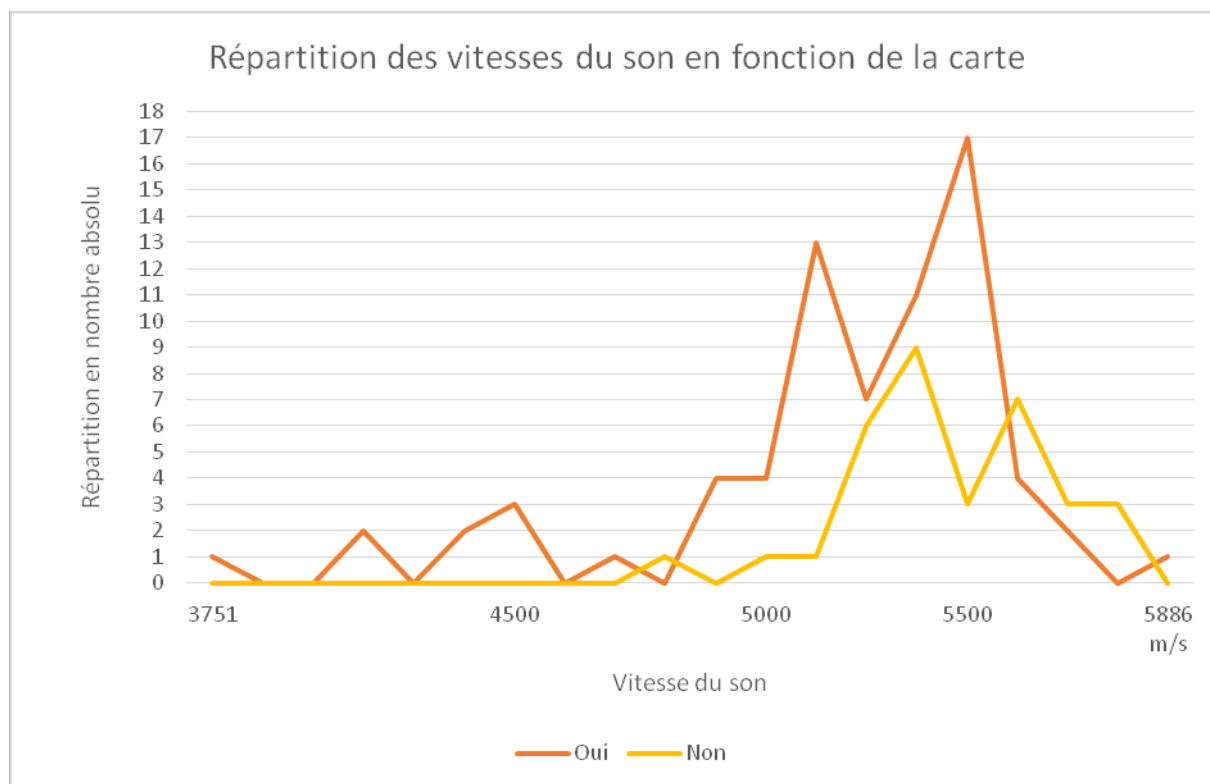


Figure 3: Répartition des vitesses du son en fonction de la carte N=106: 72 oui, 34 non

3.2 Influence de l'altitude et de la position sur la chaîne du Jura

Avec la position des arbres prélevés et testés, il a été possible de définir leur altitude et leur position sur la chaîne du Jura. Pour cela, un transect partant de l'arbre le plus près de Genève, aux Begnines près du Brassus, a été tracé jusqu'à l'arbre le plus près de Bâle, à Lignièrès (Romain Blanc SFFN 2018). Toutes les positions des arbres ont été rapportées sur cet axe.

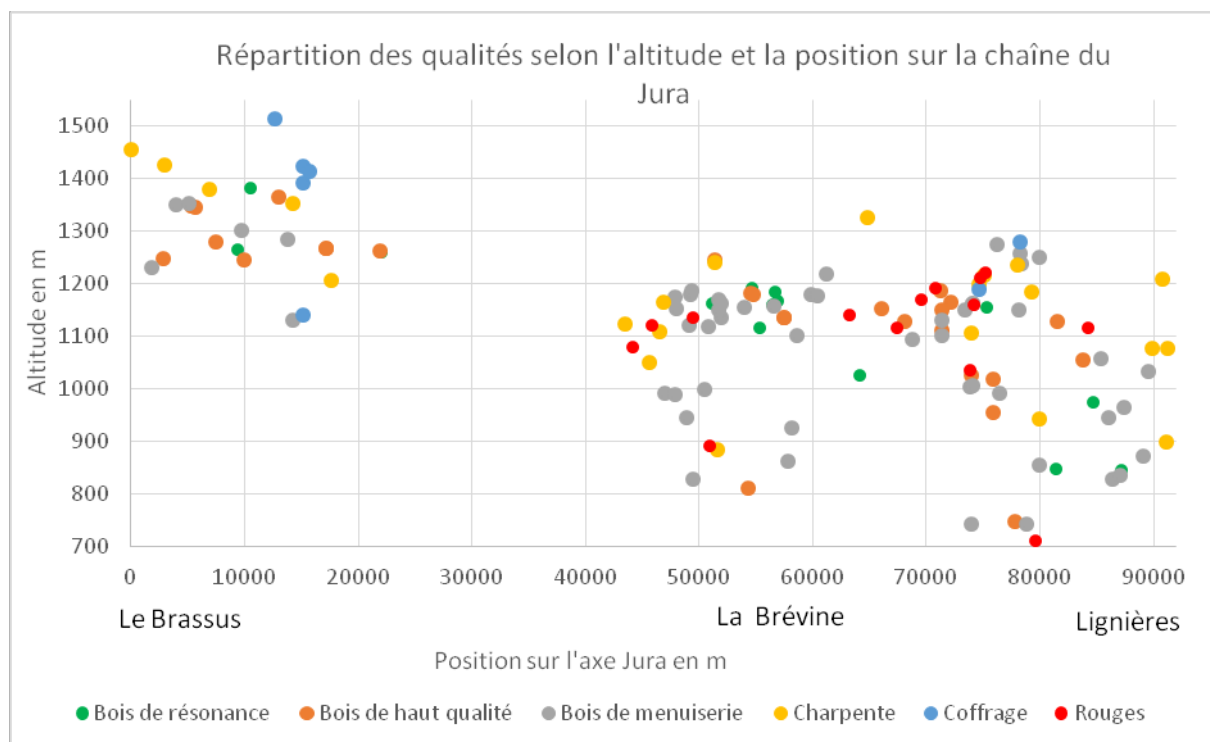


Figure 4: Répartition des qualités selon l'altitude et la position sur la chaîne du Jura N= 140

On constate que des bois «potentiel bois de résonance» ont été trouvés à toutes les altitudes entre 850 et 1500m. On constate qu'il n'y pas eu de billons rouges à la Vallée de Joux, ceux-ci se trouvent plutôt sur Neuchâtel et donc en basse altitude. Les coffrages se trouvent en altitude à partir de 1100m et les charpentes à partir de 900m. Les autres qualités sont réparties dans toutes les régions à toute altitude.

3.3 Volume de bois prélevé

Aux cours de l'exercice 2018 (hiver 2017-2018), 178m³ ont été testés et prélevés. Ce volume représente 1% du volume d'épicéa qui est martelé sur ces 112 coupes faites. (N=92 coupes dont le procès-verbal de martelage est connu, 151m³ échantillonnés sur 16141m³ d'épicéa martelé). Les différentes qualités se répartissent selon la figure 5.

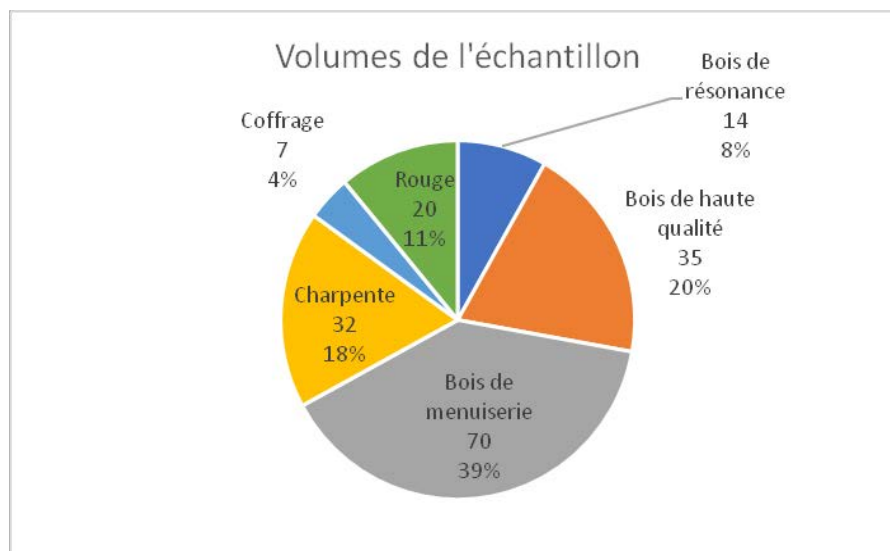


Figure 5: Volumes de l'échantillon en m³ N=178m³ pour 112 coupes

3.4 Débouchés des billons

Sur les quelques 140 billons de l'étude, 34 ont été vendus à la vente de Colombier et le reste a été vendu de diverses manières par les gestionnaires, dans la majorité des cas avec le reste du lot charpente malgré des qualités souvent supérieures.

Tableau 1: Prix de ventes des billons du projet "BHQ" aux ventes de Colombier et potentiel de qualité (appréciation forêt selon point 2.5). Source ForêtNeuchâtel.

Code	Propriétaire	CHF/M3	Années	Potentiel
LSAPL061296	La Sagne	CHF 700	2016	BHQ
LSAPL09	La Sagne	CHF 633	2017	BHQ
LPA06	Val-de-Ruz	CHF 488	2017	BM
JOR078453	Etat NE MN	CHF 450	2016	BHQ
Lamb121	Hoirie Lambelet	CHF 433	2016	BM
Tüller2092	Conedera Marco	CHF 400	2016	BR
ZI04	Nicole Zill	CHF 278	2017	BHQ
JOR078397	Etat NE MN	CHF 275	2016	BR
FNE08	Val-de-Ruz	CHF 262	2017	BHQ
JOR088654	Etat MN	CHF 255	2016	BM
LLO04B	Le Locle	CHF 225	2017	BM
BPL13HA	Brot-Plamboz	CHF 225	2017	BHQ
DOM30A	Val-de-Ruz	CHF 225	2017	BM
MOT30	Val-de-Travers	CHF 225	2017	BR
BRG06	Etat NE MN	CHF 221	2016	BR
PRD03	Confédération	CHF 180	2017	BM
COV217	Val-de-Travers	CHF 180	2017	BM
Tüller2093	Conedera Marco	CHF 180	2016	BM
LGF07	Val-de-Ruz	CHF 166	2017	Charpente
BRV02	La Brévine	CHF 166	2017	BM
LSAB04	La Sagne	CHF 165	2017	BM
FLE02	Val-de-Travers	CHF 165	2017	BHQ
HGE01	Val-de-Ruz	CHF 156	2017	BM
BPL14HA628	Brot-Plamboz	CHF 155	2016	BHQ
LSAPL091331	La Sagne	CHF 155	2016	BM
LSAPL061311	La Sagne	CHF 155	2016	BM
LLO06	Le Locle	CHF 145	2017	BM
JOR09	Etat NE MN	CHF 145	2017	BM
SMC02	C. St-Maurice	CHF 145	2017	Charpente
DOM17B	Val-de-Ruz	CHF 136	2017	BM
JOR078699	Etat NE MN	CHF 135	2016	BM
Lamb93	Hoirie Lambelet	CHF 135	2016	BM
DOM05	Val-de-Ruz	CHF 116	2017	BM
Giroud9182	Giroud Charles-André	CHF 115	2016	BM
Prix moyen		CHF 241		

4. Discussion

4.1 Discussion sur la méthode

Grâce à la saison 2016-2017 qui a servi de « test », la méthode appliquée lors de la saison principale (2017-2018) a très bien fonctionné. L'option d'effectuer 2 passages s'est avérée payante. Cela a permis de faire une sélection uniforme des plantes, la meilleure de la coupe, (par la même personne) et de relever des données sur la plante debout (forme des branches, hauteur du bas de la couronne etc.) La réalisation du premier passage (identifications, marquages et relevés) a été intensive, car il y avait peu de temps entre les martelages et le début des coupes et parce qu'il était préférable de travailler par région, pour des raisons logistiques, et non selon les programmes de martelages et coupes. Une seule coupe a été exploitée avant que l'on puisse effectuer le premier passage. Grâce à l'exécution en 2 passages, la deuxième phase (tests et prélèvements du billon) s'est faite « tranquillement » dans le laps de temps entre le débardage et le transport des bois. Ce sont seulement 2 billons qui n'ont pas pu être testés, car transportés trop vite.

La collaboration avec les exploitants forestiers s'est très bien déroulée, seulement 2 billons n'ont pas été préparés et mis de côté pour être testés/prélevés.

Malheureusement, pour diverses raisons (voir figure x), toutes les coupes n'ont pas pu être parcourues (visitées), notamment car certaines coupes ont été faites hors délais, soit après le 1er avril 2018, ou ont carrément été repoussées à l'exercice 2019 à cause de la tempête Eleanor. Dans 20 coupes visitées, nous n'avons pas trouvé d'épicéa adapté (de plus de 50 cm).

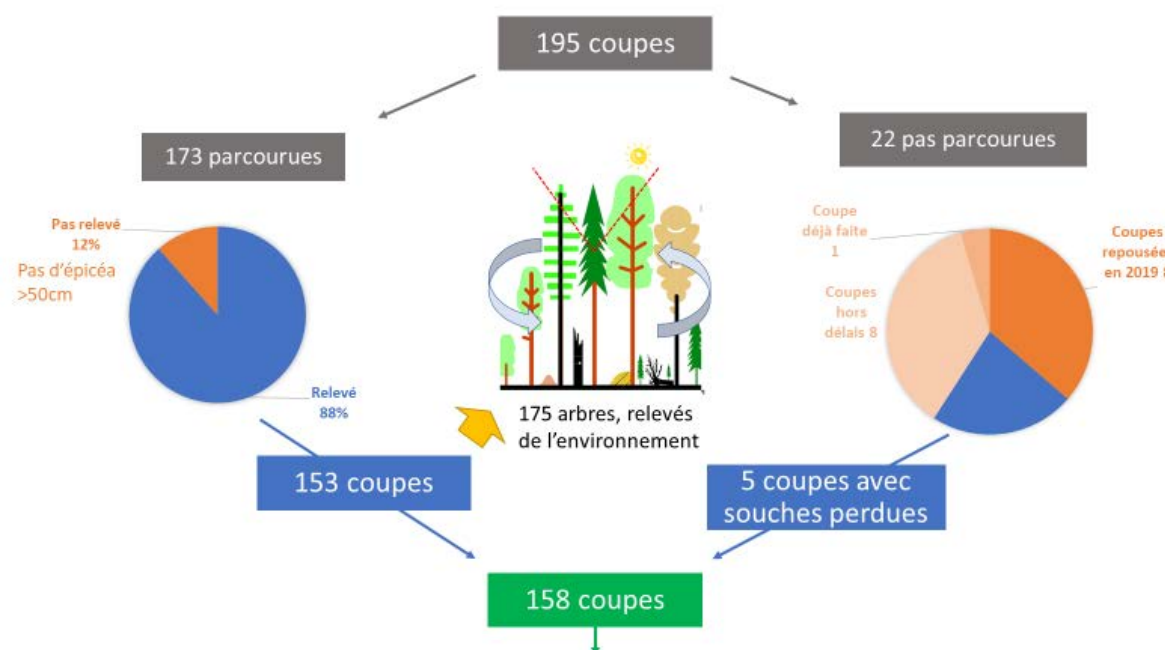


Figure 6: Visites et relevés des coupes

Lors de l'exercice précédent, aucun relevé n'avait été fait, mais certaines des souches avaient été marquées et le relevé a pu se faire après coup. Les souches n'ont pas été retrouvées dans seulement 5 coupes.

Pour des raisons d'organisation, 20 procès-verbaux de martelage n'ont pas pu être obtenus à temps pour toutes les 112 coupes qui ont été prélevées.

4.2 Pertinence de la carte des potentiels, influence de l'altitude et de la position sur la chaîne du Jura

Contrairement aux prévisions, on a trouvé autant de bois potentiel de résonance dans les zones à priori non favorables que dans les zones favorables. Néanmoins, pour conclure que la carte des potentiels n'est pas fiable, il conviendra de prendre en compte les analyses dendrologiques et physiques de ces potentiels bois de résonance. Il est en effet logiquement explicable que des bois de basse altitude aient une vitesse du son plus élevée, car la densité diminue avec l'altitude.

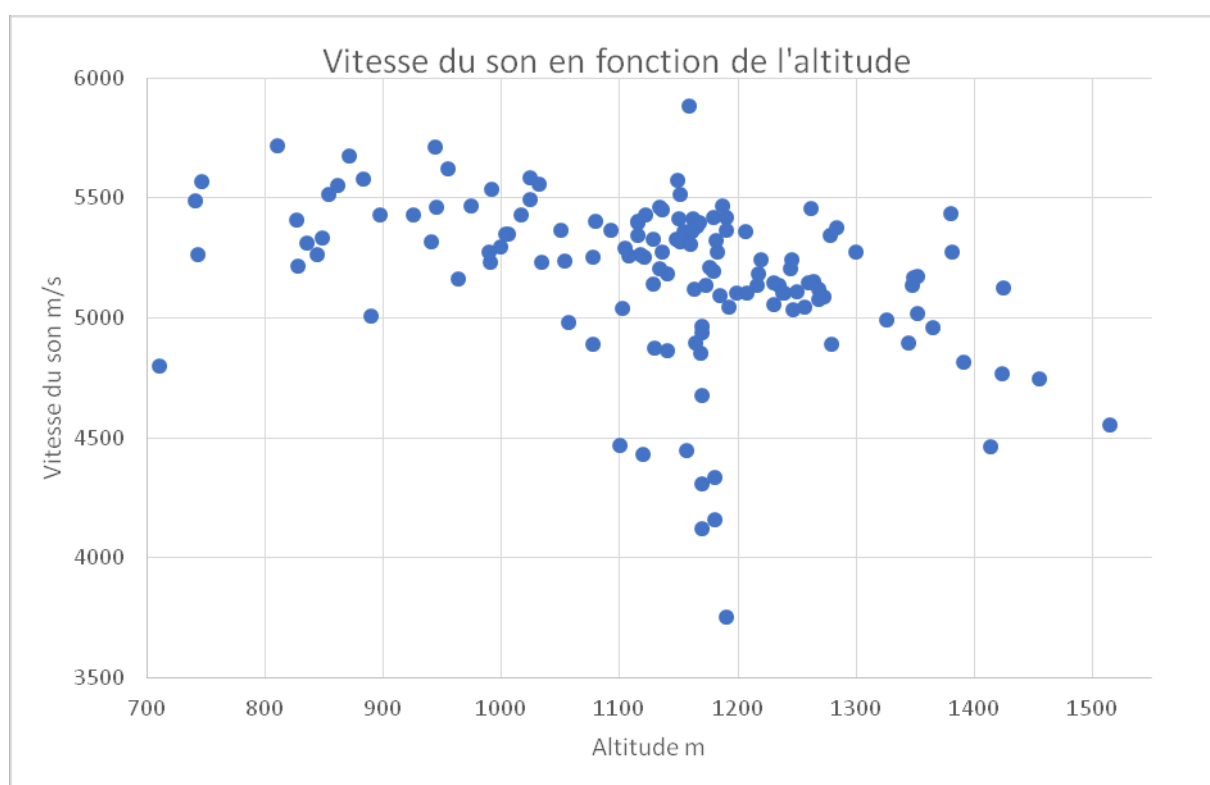


Figure 7: Vitesse du son en fonction de l'altitude N= 138

Quant à la forte répartition de bois de menuiserie en zone non favorable, en basse altitude, cela confirme bien le fait que les bois sont moins nouveaux et moins coniques dans les vallées que sur les crêtes. On le voit également avec l'abondance des qualités charpente à partir de 900m et coffrage à partir de 1000m. Cela se confirme quand on met en relation le nombre de branches et l'altitude.

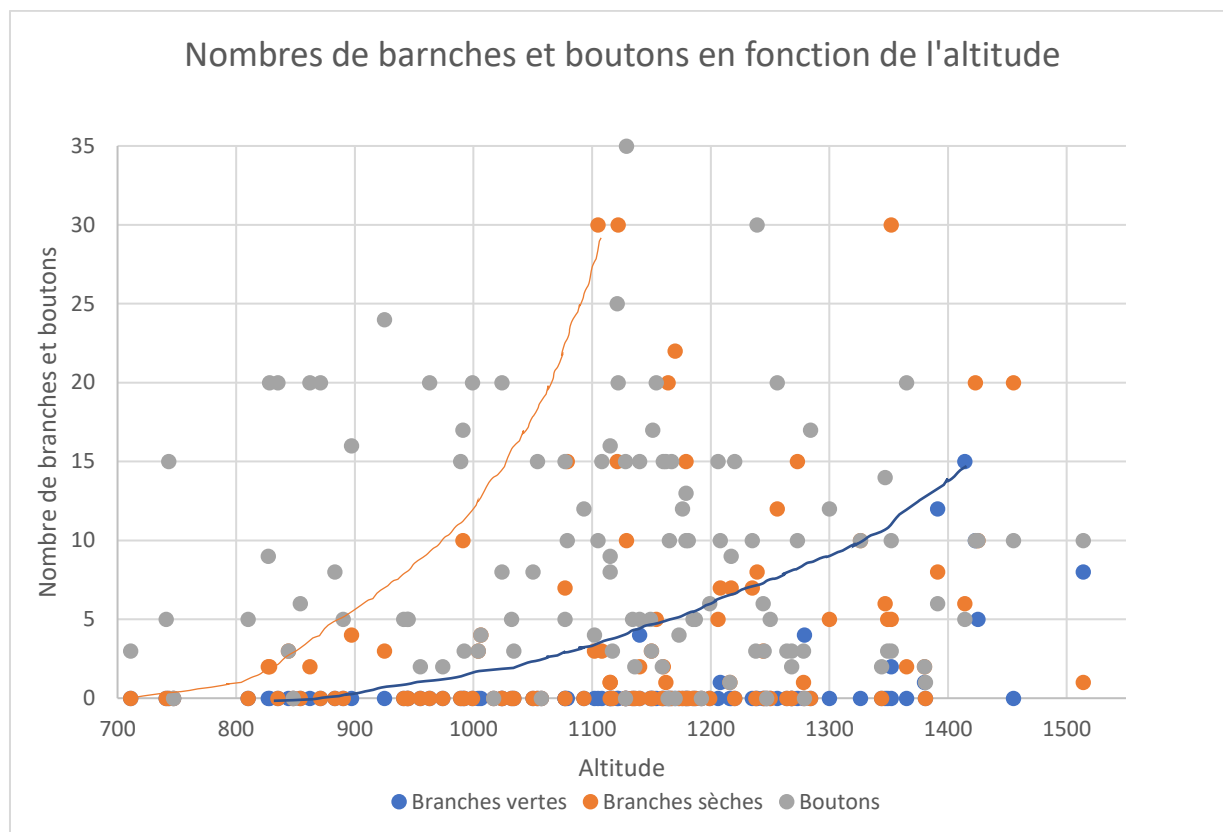


Figure 8: Nombre de branches sèches et boutons en fonction de l'altitude N= 113

4.3 Volume de bois prélevé et représentativité

Comme ce sont seulement les 5 premiers mètres et que c'est chaque fois le plus bel épicéa de la coupe qui a été choisi, les pourcentages des différentes qualités repérées ne peuvent être transposés à l'échelle 1:1 à l'ensemble du volume d'épicéa martelé. Les arbres choisis étaient certes les plus beaux, mais ils n'étaient que légèrement supérieurs aux autres épicéas martelés. Ce fut en effet rarement facile de différencier les plus beaux. De plus, le martelage constitue déjà un choix sur lequel nous n'avons aucune emprise. Il est impossible de savoir si les sylviculteurs ont martelé en récoltant les beaux ou en éliminant les vilains. Ce qui est par contre évident, c'est que ces arbres choisis ne peuvent varier fortement de la moyenne des gros arbres qui composent leur peuplement.

Partant de ce constat et des données disponibles, une estimation détaillée peut être faite. En comparant le volume des 112 billons à celui des plantes entières (volume en sylviculture neuchâteloise multiplié par 0.8), il apparaît que le volume du premier billon représente 39% du volume total de la plante. Par analyse des procès-verbaux de martelage (N=65), il apparaît que les gros bois (de plus de 52.5cm de DHP) représentent en moyenne 86% du volume d'épicéa martelé. Comme évoqué dans les résultats, on connaît la répartition des différentes qualités pour les billons (les 5 premiers mètres).

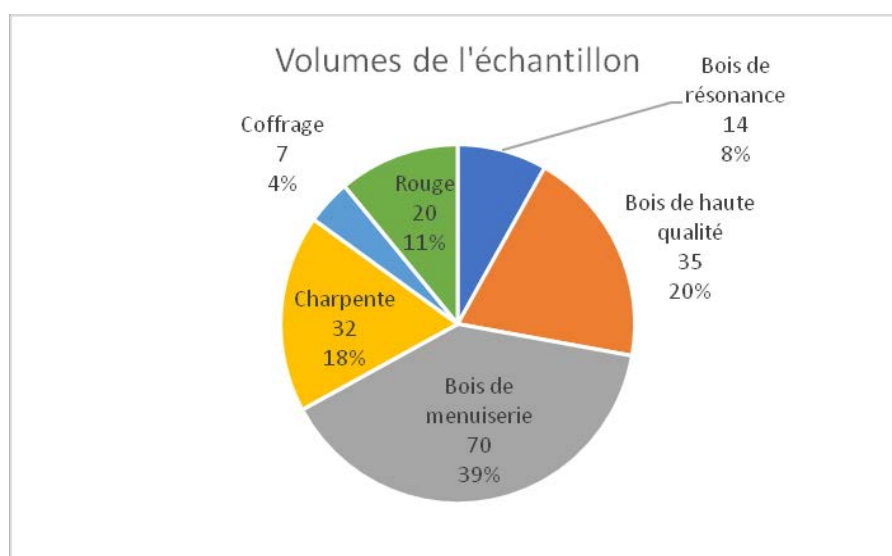


Figure 9: Volumes de l'échantillon en m3 N=178m3 pour 112 coupes

En combinant ces chiffres, il est dès lors possible d'évaluer le potentiel de chaque qualité (seulement du premier billon) sur la base du volume d'épicéa martelé:

Bois de résonance : 2.7% du volume d'épicéa martelé ($100 \times 0.86 \times 0.39 \times 0.08$)

Bois de haute qualité : 6.7%

Bois de menuiserie : 13.1%

Bois de charpente : 6%

Bois de coffrage : 1.3%

Bois rouge : 3.6%

Bien qu'il ne s'agisse que du plus beau spécimen martelé, ces chiffres sont nettement supérieurs à ceux évoqués au début de l'étude (3% du volume d'épicéa de qualité A et 1% de bois de résonance). En effet, 30% des billons proviennent de zones à priori défavorables (hors de la carte des potentiels) dès 700m d'altitude. Deuxièmement, il ne s'agit «que» du premier billon, alors qu'il est connu qu'il est tout à fait possible de sortir 2 billons de qualité dans la même plante.

4.4 Débouchés des billons

Étonnamment, ce ne sont pas les billons classés potentiel de résonance qui se sont le mieux vendus. Sur les 9 billons les mieux vendus, 5 sont chenillés (ondulation des cernes) et 7 ont été décelés sur l'ensemble de l'étude (N=138) (Langenegger 2018); ces bois présentent donc un certain intérêt pour les acheteurs. Le comportement des acheteurs reste très difficile à comprendre et à prévoir (Joss 2018 comm. Personnelles); cet échantillon nous en donne encore une fois la preuve.

5. Conclusion

La fait d'avoir trouvé des bois à potentiel de résonance en dessous de 1000m, en dehors de la zone de potentiel initialement prévue, est une bonne surprise qui doit nous inciter à mieux observer la qualité de nos bois d'épicéa, cela même dans des zones qui pourraient de prime abord être considérées comme défavorables.

Comme évoqué précédemment, l'estimation du volume potentiel de chaque qualité reste une hypothèse et non une valeur mesurée. Par contre, elle se base sur des données effectives observées en forêt et, si on la met perspective avec les autres résultats (dendrologie Langenegger 2018 et propriétés techniques Zürcher 2018), elle paraît être confirmée.

C'est donc la confirmation que la qualité des bois d'épicéa de l'Arc jurassien reste encore mal connue et sous-estimée par la majeure partie d'entre nous.



Sylvain Jacot

Ingénieur forestier HES indépendant

Gestion forestière

Plans de gestion, gérance de forêt et événementiel

jacotsylvain.foret@bluewin.ch
078 630 19 58 032 566 11 39

La Queue de l'Ordon 241
2314 La Sagne

La Queue de l'Ordon, le

6. Bibliographie

- Bouchon J et Pardé J, 1987. Dendrométrie, Ecole Nat. Génie Rural des Eaux et Forêts, Nancy, 328 p.
- Joss N, 2018 communications personnelles. Forêt Neuchâtel 2018. Prix de vente, vente des bois précieux 2016 et 2017. Colombier.
- Langenegger F 2018. Analyses dendrologique. Laboratoire de dendrochronologie. Hauterive.
- Schütz J-P, Pommerening A, 2013. Can Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (MIRB.) FRANCO) sustainably grow in complex forest structures? For Forest Ecology and Management 303 175–183.
- Zürcher E, 2018. Propriétés techniques. HES bois. Bienne

Annexe 1: Appréciation de l'âge des souches.

Aucune évaluation précise n'a été faite pour déterminer l'âge. Il s'agit plutôt d'une simplification qui nous permet de classer les souches en 4 catégories selon leur état de décomposition.



10 ans: souche encore dure partiellement recouverte de mousse



20 ans: souche recouverte de mousse; détail de l'abattage encore visible.



30 ans: souche encore debout bien pourrie



40 ans et plus: souche encore existante facilement «écrasable»

Annexe 2: Fiche de relevés de terrain des données stationnelles

Arbre

Date:

Lieu dit :

Division:

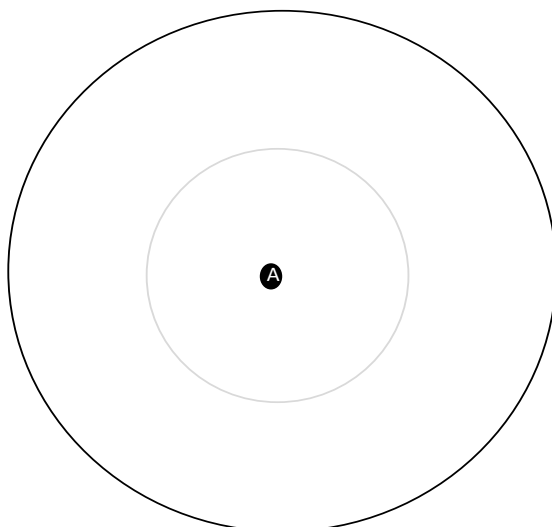
Commune:

Propriétaire :

Numéro du(des) billon(s)

Critère	Unité	Relvés
Exposition	NE	
Altitude	m	
Niveau thermique		
Topographie		
Pente	%	
Type de sol		
Profondeur sol		
Association végétale		
Arbres voisins vivants cellule d'influence	Hauteur de l'arbre	m
	Num	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
	Essence	
	Distance m	
	Hauteur m	
	Diamètre cm	
Arbres voisins morts ou abattus	Num	A B C D E F G H I J K L
	Essence	
	Distance m	
	Diamètre cm	
	Abattage	Moins x ans
Surface terrière Bitterlich	m ² /ha	
Position localisation	coordonnées	
Formes des branches		
Photo couronne n°		
Photo tronc n°		
Photo écorce n°		
DHP arbre	cm	

Esquisse a faire à la main

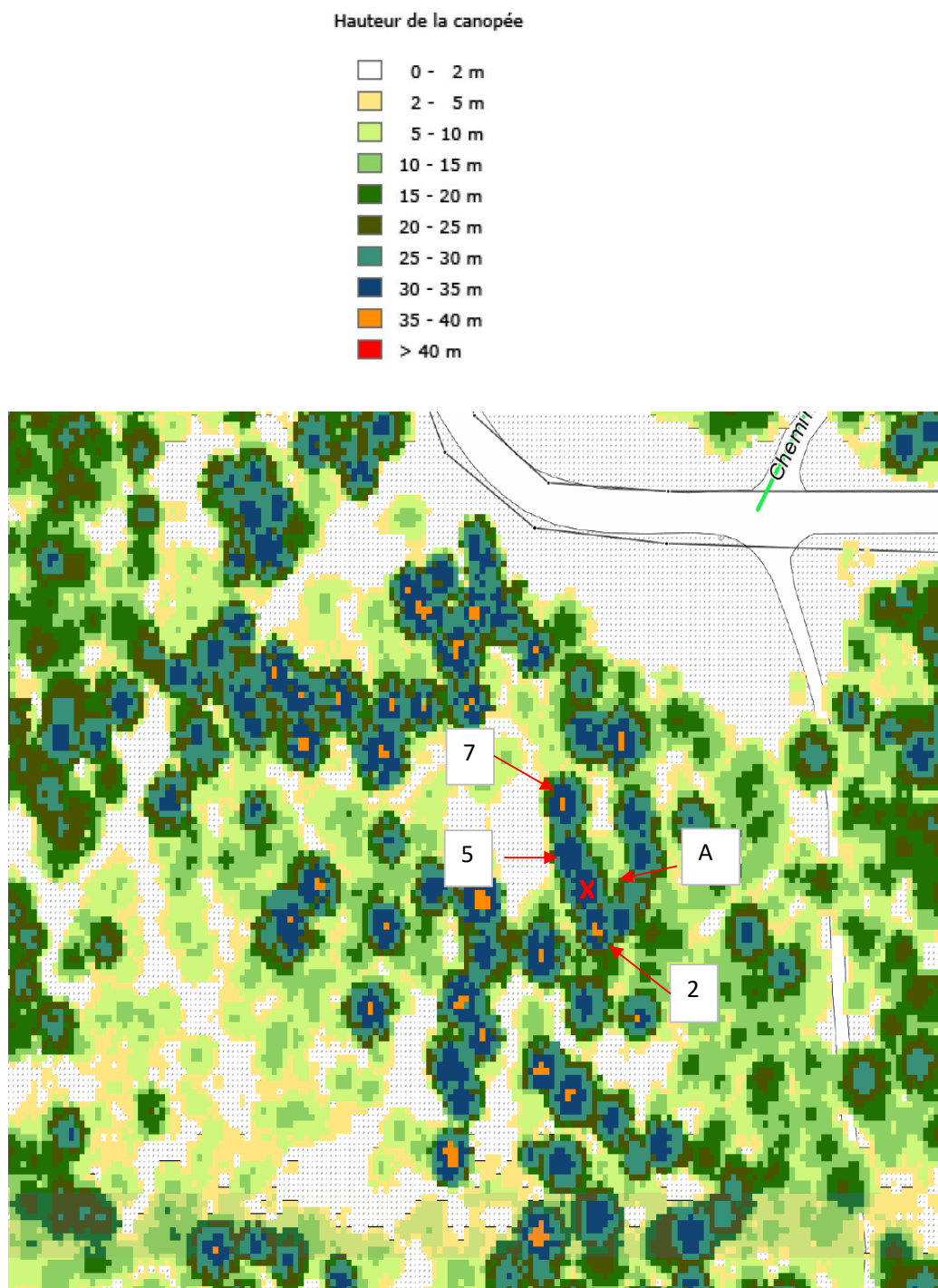


Ensemble des données sationnelles obtenues

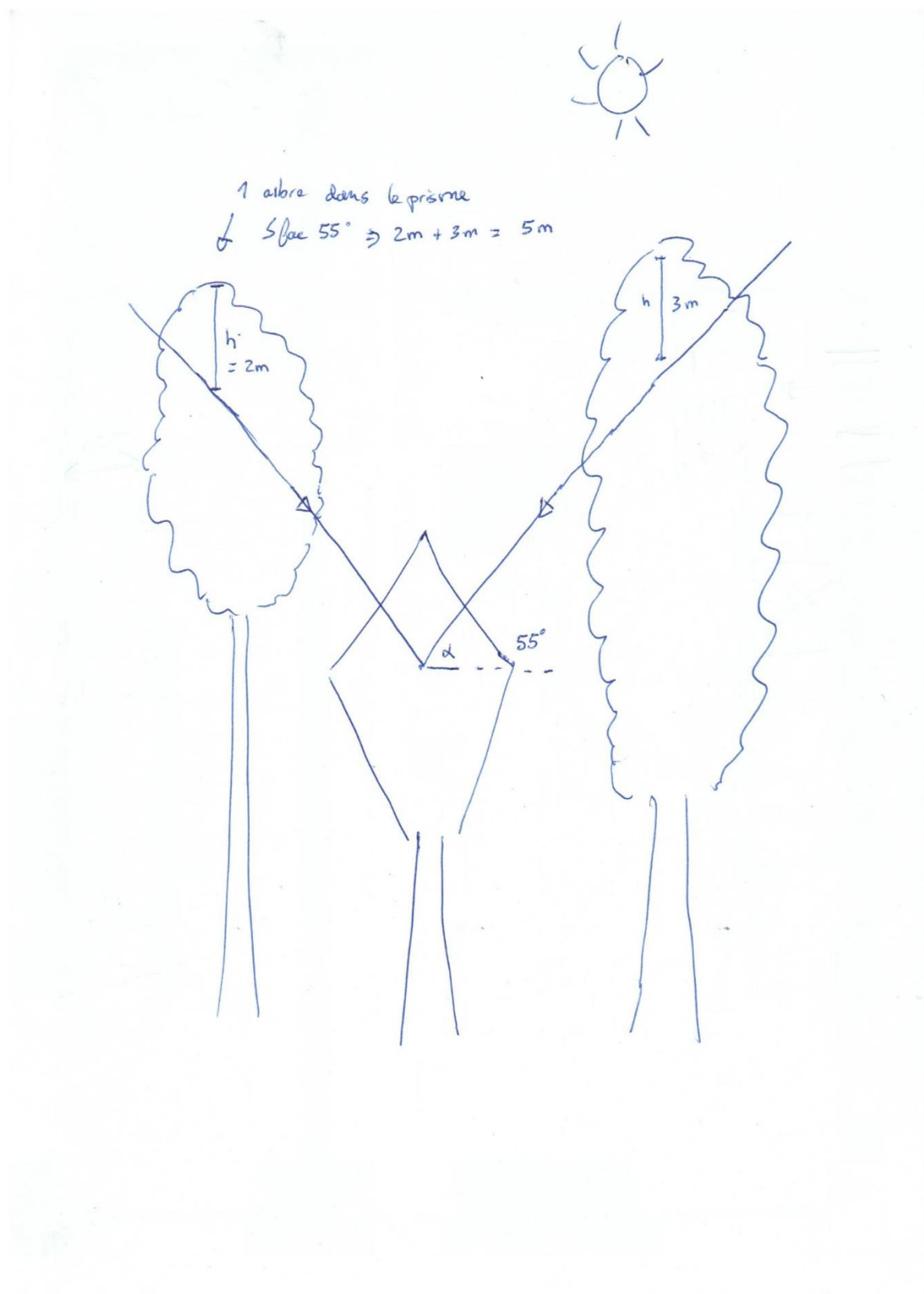
Critère	Unité	Explications
Exposition	S, SE, SO, O, NO, N, NE	SIG carré 15mx15m. Voire mise en forme des données
Altitude	m	SIG modèle numérique de terrain
Niveau thermique		SIG carte de niveaux thermiques suisse (DFJP Berne 1977). Voire mise en forme des données
Topographie		SIG. Voire mise en forme des données
Pente	%	SIG. Voire mise en forme des données
Type de sol	Lappiaz, marneux et	Voire mise en forme des données
Profondeur sol	0-30cm 30-50cm	Sonde
Association végétale	selon Richard 1956	SIG. Voire mise en forme des données
Hauteur de l'arbre A	m	Lidar modèle numérique de canopée pour les arbres NE les VD avec latte de 5m méthode "CI"
Hauteur bas de la couronne A	m	Avec latte de 5m méthode "Christen"
Longueur de la couronne A	m	Calculé sur la base de la hauteur et de la hauteur du bas de la couronne
Arbres voisins vivants	Num	1, 2, 3....
	Essence	Observation
	Distance	m
	Hauteur	m
	Sfac 55	m
	Diamètre	cm
Arbres voisins morts ou abattus	g	Calculé sur la base du diamètre
	Tarrif	Attribué sur la base du diamètre en fonction du tarrif neuchâtelois
	Num	1, 2, 3....
	Essence	Obvesvation estimation
	Distance	m
	Diamètre	cm
Abattage	Moins x ans	Estimation - 10 ans -20 ans -30ans ou -40ans et plus, voir photo
Surface terrière Bitterlich	m2	1fois positionné sur A
Surface terrière cellule d'inf.	m2/ha	Addition de toute les surfaces terrières des troncs
Volume cellule d'inf.	sv/ha	Calculé sur base du tarrif neuchâtelois
Nb de tiges cellule d'inf.	t/ha	Addition des tige dans la cellule
Nb de tiges dans le prisme		Addition du nombre d'arbre qui entre dans le prisme
Sfac 55		Addition de tous les longueurs de couronnes entrant dans le prisme
Indice surface terrière cellule d'i	m2/ha	Addition de toute les surfaces terrières des souches pondéré par l'âge (-20ans-> divisé par :
Indice volume cellule d'inf.	sv/ha	Calculé sur base du tarrif neuchâtelois
Nb de tiges cellule d'inf.	t/ha	Calculé
Hauteur du prisme de lumière		1/3 de la couronne depuis le haut; hauteur de A moins hauteur bas de la couronne
Position localisation	Coordonnées	SIG. Sur la base du modèle numérique de canopée.
Position sur l'axe du Jura		Origine (C140M01) Les Begnines, Monts Sala, Le Chenit, fin (LIG18) Lignièrès
Formes des branches	A plat ou tombantes	Observation
Photo couronne		Appareil photo
Photo tronc heure		Appareil photo
Photo écorce heure		Appareil photo
DHP de l'arbre A		Compas forestier au cm
Données relevé au bureau par SIG		
Données calculées		
Concurrence actuelle		
Concurrence passée		

Positionnement des arbres

Positionnement dans le terrain de de l'arbre "A" et de ses concurrents sur une carte papier.



Modèle numérique de canopée. Données cartographiques de SITN © 2017 / Service de la Géomatique et du Registre Fon



Annexe 3: Fiche de relevé en bureau des données sylvicoles

Division code:

Lieu dit :

Commune:

Propriétaire :

N°	Critère	Unité	Relvés	Date
1	Volume sur pied A	sv/ha		
2	Volume sur pied B	sv/ha		
3	Nombre de tiges A	t/ha		
4	Degré de recouvrement	%		
	Coupes/martelages			
	Date			
5	Relevé	oui/non		
6	Volume	sv		
7	Volume	sv/ha		
8	Tiges	nb		
9	Tiges	sv/t		
10	Epicéa	%		
11	Résineux	%		
12	Feuillus	%		
13	Epicéa A	m3		
14	Prix épi A	CHF/m3		
15	Epicéa B	m3		
16	Prix épi B	CHF/m3		
17	Résineux A	m3		
18	Prix rési A	CHF/m3		
19	Résineux B	m3		
20	Prix rési B	CHF/m3		
21	Epicéa	m3		
22	Prix moy ép	CHF/m3		
23	Résineux	m3		
24	Prix moy rés	CHF/m3		
25				
26	Remarques			

Explications

N°		Unité et expression des critères
1	Volume sur pied A	sv/ha et date de
2	Volume sur pied B	sv/ha
3	Nombre de tiges A	t/ha et date de l'inventaire
4	Degré de recouvrement	%
	Date	
5	Relevé	oui/non
6	Volume	sv
7	Volume	sv/ha
8	Tiges	nb
9	Tiges	sv/t
10	Epicéa	%
11	Résineux	%
12	Feuillus	%
13	Epicéa A	m3
14	Prix épi A	CHF/m3
15	Epicéa B	m3
16	Prix épi B	CHF/m3
17	Résineux A	m3
18	Prix rési A	CHF/m3
19	Résineux B	m3
20	Prix rési	CHF/m3
21	Epicéa	m3
22	Prix moy ép	CHF/m3
23	Résineux	m3
24	Prix moy rés	CHF/m3
25		
26	Remarques	

Méthode de relevé

Trop compliqué à trouvé, abandonné
Trop compliqué à trouvé, abandonné
Trop compliqué à trouvé, abandonné
Trop compliqué à trouvé, abandonné
Dernier PV de martelage
Correspond aux relevé fait
PV de martelage forêt publique canton de N
PV de martelage
PV de martelage
PV de martelage
PV de martelage
PV de martelage
PV de martelage
Trop compliqué à trouvé, abandonné
Trop compliqué à trouvé, abandonné
Trop compliqué à trouvé, abandonné
Trop compliqué à trouvé, abandonné
Trop compliqué à trouvé, abandonné
Trop compliqué à trouvé, abandonné
Trop compliqué à trouvé, abandonné
Trop compliqué à trouvé, abandonné
Trop compliqué à trouvé, abandonné
Trop compliqué à trouvé, abandonné
Trop compliqué à trouvé, abandonné

Annexe 4: Mise en forme des données stations et billons

Extrait par SIG pour les arbres du canton de Neuchâtel

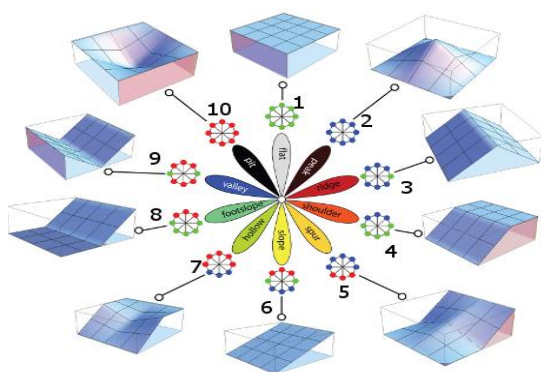
Critère			Code
Commune ploitique			
Exposition	milieu d'un carré 15x15	N	1
		NE	2
		E	3
		SE	4
		S	5
		SO	6
		O	7
		NO	8

Altitude	Par tranche de 100m	700m	7
		800m	8
		900m	9
		1000m	10
		1100m	11
		1200m	12
		1300m	13
		1400m	14
		1500m	15

Niveau thermique	numérotation reprise
------------------	----------------------

N° 02 - 80-100 jours période végétation
N° 03 - 100-120 jours période végétation
N° 04 - 120-135 jours période végétation
N° 05 - 135-150 jours période végétation
N° 06 - 150-165 jours période végétation
N° 07 - 165-180 jours période végétation
N° 08 - 180-190 jours période végétation
N° 09 - 190-200 jours période végétation
N° 10 - 200-205 jours période végétation
N° 11 - 205-210 jours période végétation
N° 12 - 210-215 jours période végétation
N° 13 - 215-225 jours période végétation

Topographie



Pour les NE synthèse de 2	Plat	1
modèle numérique de terrain un	Bosse	2
dans un carré de 10m l'autre	Crête	3
dans un carré de 30m. Dans 12	Haut de pente	4
cas sur 150 il a eu une	Arrête en pente	5
différence entre les 2 modèles	Pente	6
dans ces cas l'auteur des relevé	Coulisse	7
à choisi le plus représentatif des	Bas de pente	8
2. Pour les VD cela a été fait	Combe	9
manuellement (31 cas)	Trou	10

Pente	milieu d'un carré 15x15 par 10%	0-10%	0
		10-20%	1
		20-30%	2
		30-40%	3
		40-50%	4
		50-60%	5
		60-70%	6
		70-80%	7
		80-90%	8
		90-100%	9
Type de sol		Sol brun marneux	1
		Sol brun calcaire	2
		Rendzine	3
		Lappiaz	4
		Eboulis	5
		Sol brun moraine	6
		Roche calcaire	7
Profondeur sol		<30cm	1
		>30cm	2
Association végétale	Numérotation NE (Richard) reprise, les vaudoises sont toute dans du 165 ou 166 ce qui coresond à du 12 selon Richard		
Hauteur de l'arbre A	Hauteur de la position A selon le modèle numérique de canopé pour les NE à la main (latte) pour les VD		
Arbres voisins morts ou abattus	essence		
	Distance		
	Diamètre		
	Abattage		
Surface terrière Bitterlich			
Surface terrière cellule d'inf.			
Volume cellule d'inf.			
Nb de tiges cellule d'inf.			
Nb de tiges dans le prisme			
Sfac 55			
Hauteur du prisme de lumière			
Position coordonnées	Point (2505698.65426497720181942 1163846.57963811443187296)		
	Pour avoir la position coller les chiffres entre parenthèse dans la fenêtre recherche en haut à gauche SITN cela marche aussi pour les vaudoises		

Position sur l'axe du Jura	0-10 km	0
Origine (C140M01) Les Begnines, Monts Sala, Le Chenit, fin (LIG18) Lignièrès	10-20 km	1
	20-30 km	2
	30-40 km	3
	40-50 km	4
	50-60 km	5
	60-70 km	6
	70-80 km	7
	80-90 km	8
	90-100 km	9
Formes des branches	Plattes	1
	Tombantes	2
Longeur de la couronne		
Photo couronne n°		
Photo tronc n°		
Photo couronne heure		
Photo tronc heure		

2018

Étude du potentiel de production en bois de haute qualité d'épicéa des forêts de l'arc jurassien : analyses dendrochronologiques.

138 échantillons, 552 mesures, 84104 cernes mesurés



Fabien Langenegger
01/09/2018



Fabien Langenegger
Archéologue-dendrochronologue



RÉPUBLIQUE ET CANTON DE **NEUCHÂTEL**

Laqboratoire de dendrochronologie
Service des affaires culturelles
Espace Paul Vouga
2068 Hauterive
T +41(0)32 889 87 37
M +41(0)78 684 66 73
Fabien.langenegger@ne.ch
www.dendrochronologie.ch

Étude du potentiel de production en bois de haute qualité d'épicéa des forêts de l'arc jurassien : analyses dendrochronologiques.

Table des matières

L'étude des sections transversales	4
Le diamètre des sections	6
La largeur de l'aubier	7
Le bois de réaction	8
La position de la moelle	9
La préparation des échantillons	9
La mesure des échantillons	12
L'âge des arbres	13
Les analyses dendrochronologiques	15
La régularité des courbes	15
La proportion de bois final	21
La largeur moyenne des cernes	23
Les mesures pour l'EPFZ	24
Annexe 1 : cartes avec la position des épicéas échantillonnés	25
Annexe 2 : mesures et observations sur les sections	29
Annexe 3 : analyses dendrométriques	33
Annexe 4 : analyses dendrométriques pour l'EPFZ	38
Annexe 5 : mesures des Cottards effectuées par Patrick Gassmann	42

L'étude des sections transversales

L'étude menée doit permettre de déterminer le potentiel de production du bois de haute qualité d'épicéa en mettant en évidence la corrélation entre les caractéristiques liées à la station et à la sylviculture et les qualités des bois. Il s'agit de définir des critères pour distinguer les bois de qualité A en 3 catégories : *bois de résonance*, *bois de haute qualité* et *bois de menuiserie*. Les analyses dendrométriques permettent d'effectuer une première caractérisation des bois de qualité, avant que ces échantillons ne soient transmis à la Haute école spécialisée bernoise, architecture, bois et génie civil de Bienne pour des analyses physiques et mécaniques, ainsi qu'à l'École polytechnique fédérale de Zürich (cf. rapport E. Zürcher).

La prise d'échantillons d'épicéa potentiellement de haute qualité a débuté en automne 2016 et s'est terminée au printemps 2018. Elle a été réalisée sur la base d'une carte des zones potentielles, de coupes planifiées et de critères visuels (fig.1). Les épicéas ont été échantillonnés dans le Jura neuchâtelois et vaudois, mais la carte de référence, en fonction des données cantonales disponibles, ne concerne que le territoire neuchâtelois (cf. rapport S. Jacot). Ces échantillons sont représentatifs du potentiel de l'arc jurassien neuchâtelois avec des prélèvements effectués de part et d'autre du canton, de Biaufond aux Verrières.

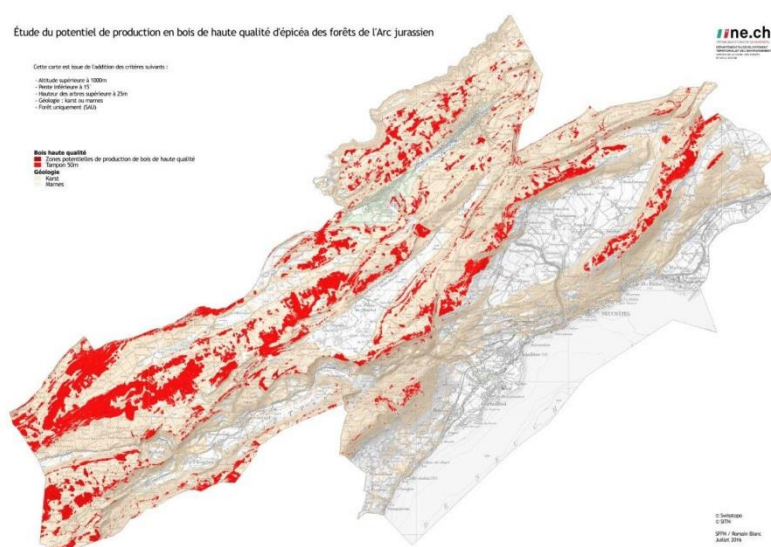


Fig. 1 Carte du canton de Neuchâtel avec la détermination des zones potentielles contenant du bois de résonance.

Pour le laboratoire de dendrochronologie, 25 prélèvements ont été analysés en 2016-2017 et 113 pendant l'hiver 2017-2018. Pour chaque arbre, une section complète de 10 cm d'épaisseur a été tronçonnée à cinq mètres de hauteur, quelques rares fois à dix mètres (fig. 2). Ces 138 sections ont été stockées dans le dépôt de l'OPAN à Colombier où les premières observations ont pu être réalisées par le laboratoire sur la surface de ces coupes transversales (fig. 3). Pour le Jura vaudois, seule la région du lac de Joux a été étudiée, mais les forêts du Risoux constituent déjà une référence reconnue en Suisse et à l'étranger pour la qualité de son bois de résonance. Ils permettront une comparaison de choix avec ceux prélevés dans les montagnes neuchâteloises. L'emplacement de chaque épicéa a été topographié (annexe 1).

Dans le cadre de cette étude, 21 sections provenant des épicéas du domaine des Cottards à la Brévine n'ont pas été amenées à Colombier et n'ont pas été analysées par l'auteur du rapport au laboratoire de

dendrochronologie de Neuchâtel. Elles ont été mesurées par Patrick Gassmann entre 2010 et 2017 et il m'a transmis un tableau avec ses résultats (annexe 5). Ainsi, un seul échantillon du domaine des Cottards, le n°20, a été mesuré au laboratoire en 2016 en même temps que les autres échantillons. En revanche, la section n'a pas été observée par l'auteur du rapport.



Fig. 2 Prélèvements de sections complètes dans les forêts de la Sagne.



Fig. 3 Stockage des sections dans le dépôt de l'OPAN à Colombier.

Les premières observations et mesures réalisées ont eu comme buts de définir le diamètre des arbres, la largeur de l'aubier, la présence ou non de bois de réaction et la position centrée ou excentrée de la moelle (annexe 2). Toutes les sections ont été photographiées (annexe 6).

Le diamètre des sections

Pour réaliser des composants pour instruments de musique, le diamètre minimum requis se situe entre 50 et 60 cm, éventuellement 45 cm pour les plus petites pièces produites par les luthiers. Dans cette récolte d'échantillons, la détermination de la qualité du bois a primé sur la taille et certains arbres qui n'entrent pas dans cette fourchette de grandeur ont malgré tout pris place dans cette étude. Seuls les prélèvements à 5m ont été intégrés dans l'histogramme des diamètres (fig. 4).

Il n'y a pas de corrélation précise entre le diamètre mesuré et l'âge des arbres. La vitesse de croissance est trop différente d'un individu à l'autre surtout lorsqu'ils sont situés dans deux divisions différentes. (fig. 5).

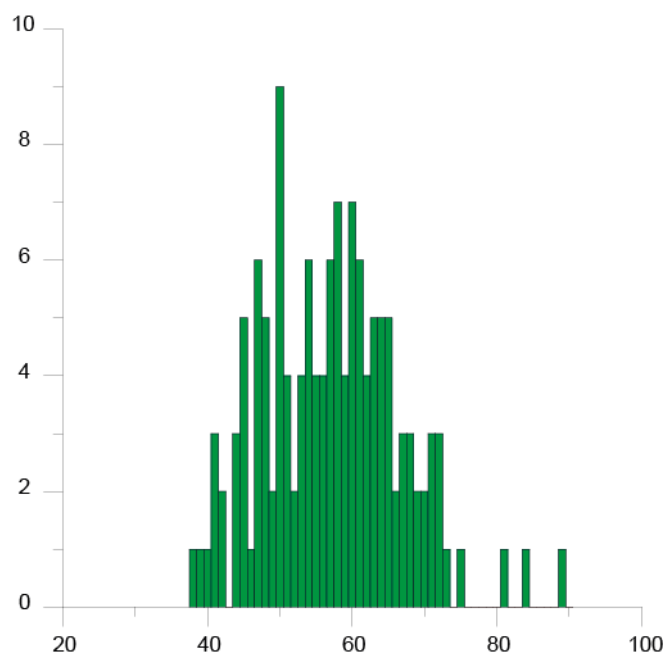


Fig. 4 Diamètre des sections prélevées à 5m (sans l'écorce).

canton	Commune	Divisions	nb de cernes mesurés à 5m	largeur du cerne moyen [mm] à 5m	diamètre en cm
NE	Saint-Blaise	CNX27	144	230	70
NE	Val-de-Travers	LBY18	187	166	70
NE	Le Locle	LLO10	100	309	71
NE	Les Ponts-de-Martel	PC	151	230	71
NE	Val-de-Ruz	SAV32	130	254	71
NE	Val-de-Ruz	DOM05	169	186	72
NE	Les Ponts-de-Martel	LJX04	155	192	72
NE	Val-de-Travers	SSU03	146	212	72
NE	La Sagne	Sagne 1296	148	244	73
NE	Val-de-Ruz	LGF35	140	255	75.5
NE	Les Ponts-de-Martel	LJX35	133	292	81
NE	Enges	POU03	147	257	84.5
VD	Le Lieu	LI04	259	113	89

Fig. 5 Liste des épicéas de plus de 70 cm de diamètre avec leur âge et leur vitesse de croissance.

La largeur de l'aubier

L'aubier sur l'épicéa, comme sur le sapin, ne se différencie pas par la couleur comme sur d'autres essences notamment le mélèze. Cependant, il est possible de mesurer facilement sa largeur lorsque le bois est fraîchement scié. L'humidité le fait ressortir distinctement (fig. 6).



Fig. 6 Détermination de la largeur d'aubier sur les échantillons de l'épicéa TRA13.

Sa largeur se distingue fortement d'un individu à l'autre et peut contribuer à modifier certaines mesures physiques prises dans le bois. La largeur est comprise entre 2,5 et 9,5 cm (fig. 7). Mais la majorité des échantillons présente une largeur comprise entre 3,5 et 6,5 cm (76%).

La largeur semble propre à chaque individu, car il n'y pas de corrélation constatée entre la largeur de l'aubier, le diamètre ou l'âge de l'arbre. Dans une même division forestière, cette largeur peut différer fortement, mais elle évolue en fonction de la vitesse de croissance au moment où les cernes contenus dans l'aubier se forment (fig. 8).

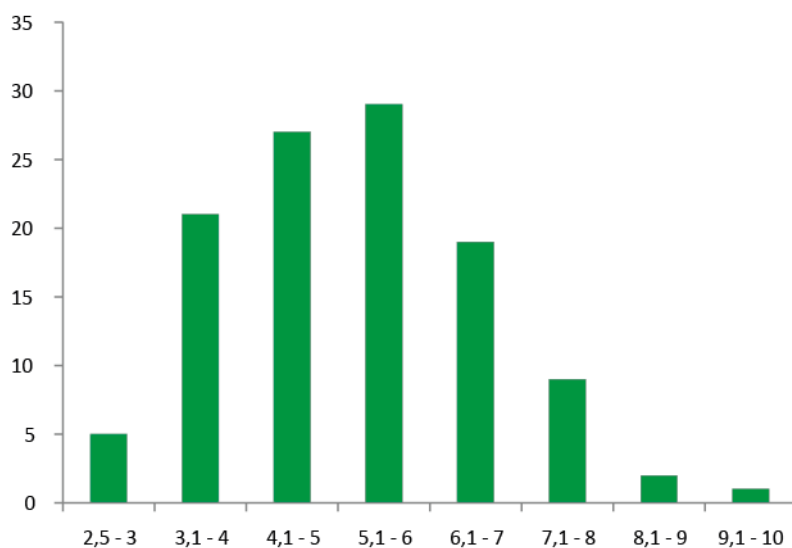


Fig. 7 Histogramme des mesures de largeur de l'aubier des épicéas

canton	Commune	Divisions	nb de cernes mesurés à 5m	largeur du cerne moyen [mm] à 5m	diamètre en cm	largeur d'aubier en cm
VD	Le Chenit	VD52	182	123	44	3.50
VD	Le Chenit	C140M06	187	98	38	3.80
VD	Le Chenit	C140M10	139	161	44.5	3.80
VD	Le Chenit	C140M11	336	70	56	4.00
VD	Le Chenit	C140M14	214	121	59	4.20
VD	Le Chenit	C140M13	194	118	47	5.00
VD	Le Chenit	VD46	147	142	48	5.10
VD	Le Chenit	C140M09	245	98	48	5.40
VD	Le Chenit	VD43	189	123	46.5	5.40
VD	Le Chenit	VD48	163	180	54.5	6.00
VD	Le Chenit	C140M07	169	139	49	7.30
VD	Le Chenit	C140M08	173	154	55	7.60

Fig. 8 Mesure de la largeur de l'aubier pour les échantillons provenant de la commune « Le Chenit ».

Le bois de réaction

Le « bois de réaction » se forme en réaction à certaines contraintes physiques ou mécaniques. Les propriétés de ce bois sont semblables à celle du bois final et sont donc un défaut pour du bois de résonance (fig. 9). Il résulte d'une réponse du tronc à une sollicitation extérieure qui a tendance à le faire dévier de sa position normale comme la pente, le vent dominant, l'affaissement du terrain...etc. Le bois de réaction permet à l'arbre de retrouver sa verticalité. A l'œil nu, il se marque par des cernes plus larges d'un côté de la section que de l'autre. Parmi les arbres qui présentent du bois de réaction, on trouve ceux situés en lisière de forêt soumis au vent dominant ou encore ceux situés dans une forte pente.

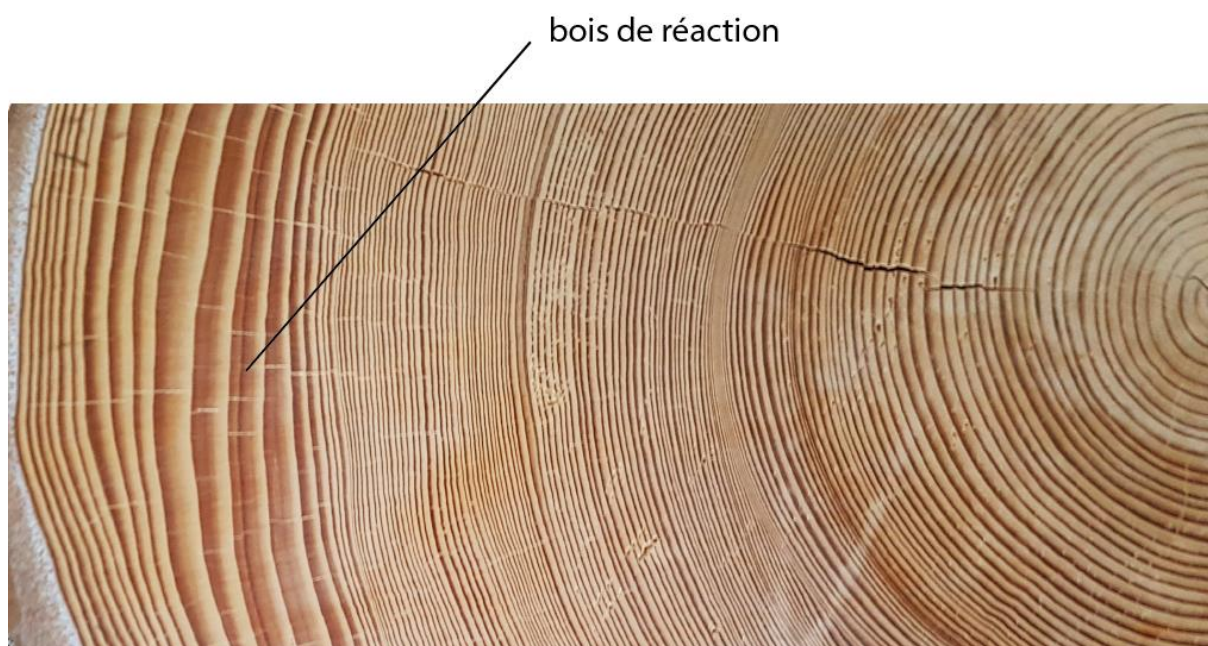


Fig. 9 Présence de bois de réaction sur une section transversale de conifère.

Sur la carte des zones potentielles, le critère de la pente inférieure à 15% a été retenu pour éviter notamment le bois de réaction. Néanmoins, parmi nos échantillons, le 46% en présente. Ce défaut pour du bois de résonance, lorsqu'il est présent, concerne uniquement une partie de la section (un quart environ), mais n'altère pas le reste. La possibilité de débiter des composants pour les instruments de musique reste intacte sur la majeure partie du tronc (fig. 10).

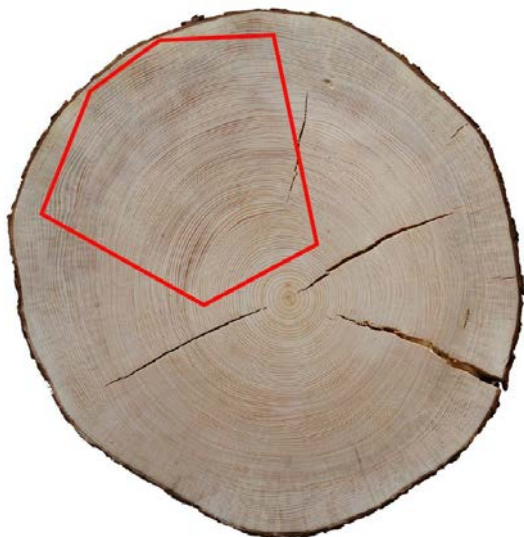


Fig. 10 En rouge, la partie d'une section transversale impactée par du bois de réaction (la Sagne 1591).

La position de la moelle

Un cœur décentré est considéré comme un défaut altérant la qualité du bois. Pour le dendrochronologue, les mesures effectuées sur un tel arbre devront, afin de définir l'accroissement annuel, se faire à partir d'une courbe moyenne regroupant plusieurs mesures effectuées de chaque côté du tronc. Sur les sections étudiées, 63% ne présente pas de moelle décentrée. Pour le reste, le décentrage est généralement peu prononcé et n'altère pas complètement la qualité du bois.

La préparation des échantillons

Les mesures dendrométriques sont effectuées de préférence sur les rayons moyens. Il s'agit d'obtenir des courbes de croissance les plus représentatives du développement de l'arbre. Pour ce faire, deux prélèvements sont effectués qui englobent la totalité des cernes de la moelle au cambium. Le choix de l'emplacement est dicté par les défauts du bois qui sont évités dans la mesure du possible.

Les nœuds : la zone à éviter est très limitée, car la largeur des cernes de croissance reste représentative à proximité des nœuds (fig. 12).



Fig. 11 Les nœuds sont à éviter lors du choix de l'emplacement du chemin de mesure.

Les tensions observées dans le bois : d'origines diverses, elles diminuent la qualité du bois et elles perturbent fortement la croissance avec des zones de compression ou d'extension du cerne. Les chemins de mesure sont placés à l'écart de ces perturbations, car les largeurs de cerne ne seraient pas représentatives de la vitesse de croissance annuelle (fig. 13).



Fig. 12 Des tensions dans le bois entraînent des zones d'extension ou de réduction de la largeur des cernes

Le bois de réaction : comme décrit plus haut, les propriétés du bois de réaction sont semblables au bois final. Il s'agit de ne pas effectuer des mesures dans cette partie.

Ainsi, chaque section est étudiée attentivement afin de choisir les emplacements les plus adéquats pour scier les deux tranches qui serviront à mesurer les cernes de croissance (fig. 14 et 15). Les deux chemins de mesure sont placés à l'écart des perturbations.

Fig. 13 Section analysée afin de scier les prélèvements à l'écart des défauts du bois.

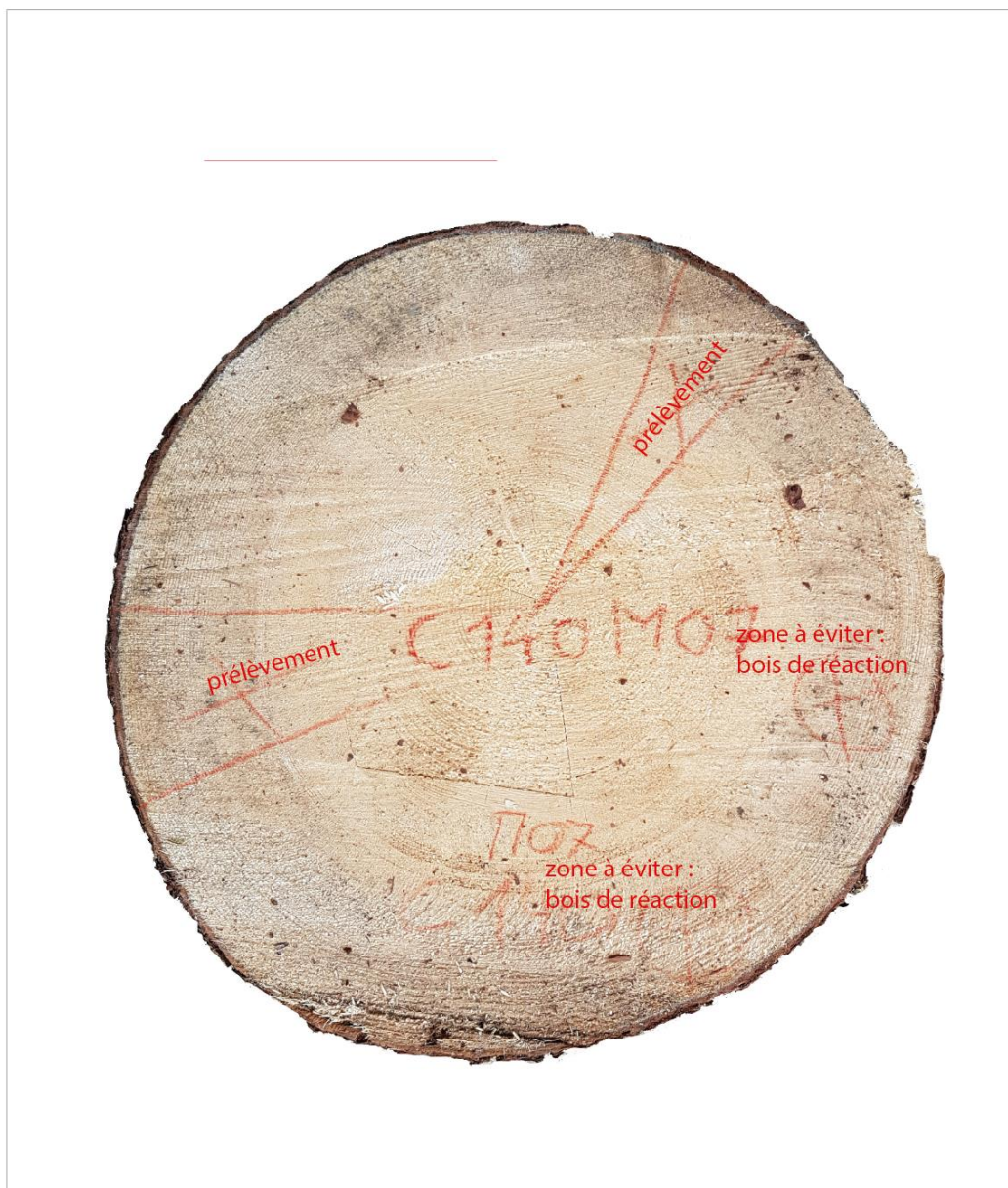


Fig. 14 Section analysée afin de scier les prélèvements à l'écart des défauts du bois.

Les prélèvements sont ensuite obtenus à l'aide d'une scie à ruban et la présence de la moelle et du cambium sur chaque échantillon doit être garanti. Les échantillons ont entre 2 et 3 cm d'épaisseur pour être mesurés sur une table micrométrique (fig. 16).



Fig. 15 Les prélèvements destinés aux mesures dendrométriques sont obtenus à l'aide d'une scie à ruban. Chaque section d'épicéa bénéficie de deux tranches permettant de définir la croissance moyenne.

D'autres prélèvements ont ensuite été sciés pour la suite des analyses physiques et mécaniques effectuées par la Haute école spécialisée bernoise, Architecture, bois et génie civil (cf, rapport Ernst Zürcher).

La mesure des échantillons

Les chemins de mesure sont réalisés à l'aide d'une lame de rasoir afin d'identifier les cellules du bois. La préparation doit être très propre pour arriver à observer la zone de resserrement des cellules et de déterminer précisément le départ du bois final (fig. 17).



Fig. 16 Un chemin de mesure réalisé à l'aide d'une lame de rasoir.

La mesure se fait au 1/100^e de mm (fig. 18). La largeur totale de chaque cerne de croissance est mesurée et une moyenne effectuée à partir des deux chemins de mesure est prise en compte. Des mesures supplémentaires sont nécessaires pour déterminer le pourcentage de bois final. En tout, plus de 84000 mesures sur la table électronique ont été réalisées sur ces 138 échantillons. Les résultats des valeurs moyennes sont présentés dans le tableau illustré en annexe 3.



Fig. 17 Mesure d'un échantillon au 1/100 mm sur une table micrométrique.

L'âge des arbres

L'année de la moelle donne l'âge de l'arbre à 5m de hauteur. Sachant que les cernes s'empilent les uns sur les autres tels des cônes, on peut ajouter environ une vingtaine d'années pour avoir la date exacte de la naissance de l'arbre (fig. 19).

L'épicéa de la commune du Chenit avec un âge estimé à 356 ans est né vers 1664 et précède de 80 ans les deux plus vieux épicéas du canton situés à la Côte-aux-Fées (AT2) et à La Brévine (Jordans 8654). Tous les deux ont poussé à partir de 1742. Neuf épicéas ont commencé leur croissance dans le canton de Neuchâtel dans la deuxième moitié du 18^e siècle (fig. 20). Cinq épicéas du canton de Vaud se sont également développés à la même période.

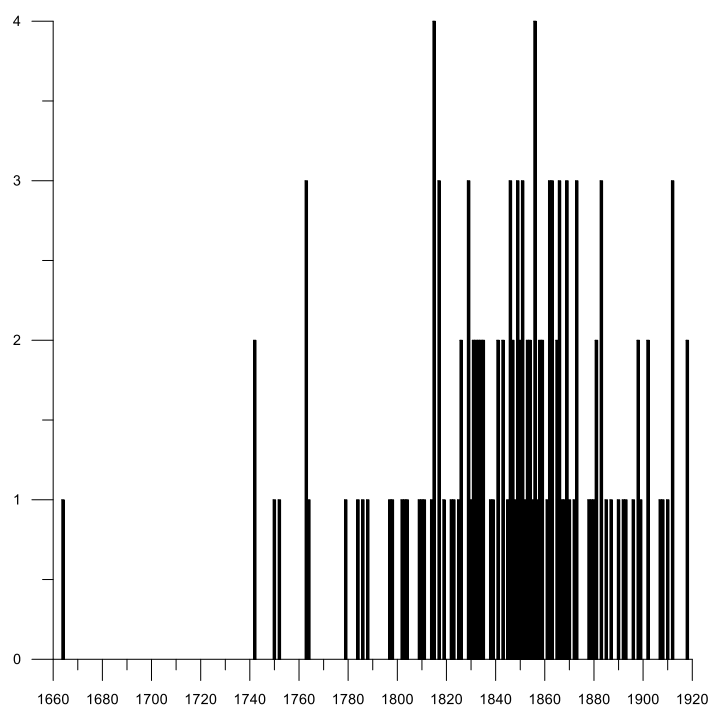


Fig. 19 Répartition des épicéas en fonction de leur date de pousse.

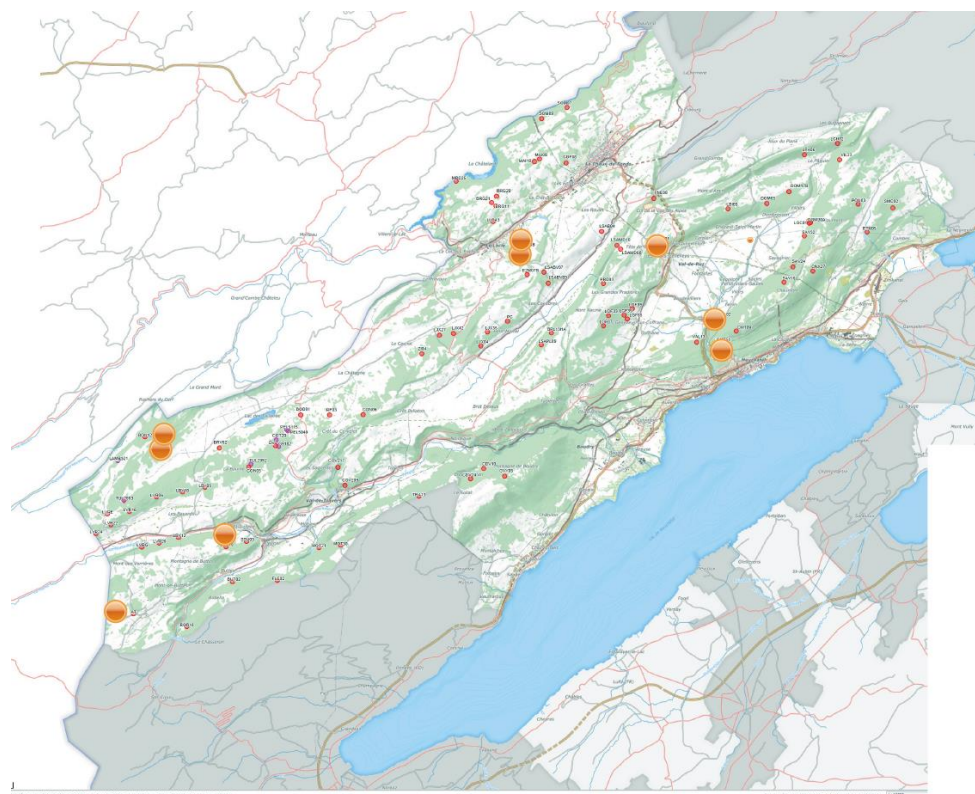


Fig. 18 Carte du canton de Neuchâtel avec l'emplacement (en orange) des arbres qui ont poussé déjà dès le 18^e siècle.

Les analyses dendrochronologiques

Les 138 échantillons ont été mesurés sur la table micrométrique et tous les résultats dendrométriques sont accessibles à la fin du rapport (annexe 3).

Trois critères sont analysés par le laboratoire pour définir la qualité du bois :

- 1) La régularité de la croissance
- 2) La largeur du cerne moyen
- 3) La quantité de bois final

La régularité des courbes

Il s'agit d'avoir une croissance régulière avec une largeur de cernes annuels qui n'évolue pratiquement pas durant la vie de l'arbre (fig. 20). Ce critère va à l'encontre d'un principe de base de la croissance des arbres qui présentent généralement des cernes plus en moins larges en fonction des conditions climatiques. Les différences de largeur sont en général très importantes, ce qui permet au dendrochronologue de créer des référentiels pour dater des bois. Des épicéas ont été datés par le laboratoire en 2007 dans le Val-de-Ruz à Fontaines, Les Combes (fig. 21). Les courbes obtenues montrent une évolution de la croissance avec des disparités entre les années, mais on observe également la présence de cycles qui peuvent durer plus ou moins longtemps avec des baisses ou des augmentations de la croissance. L'intervention du forestier qui entreprend des coupes d'éclaircie va également favoriser ces cycles, qui dans ce cas précis, seront marqués par un accroissement de la vitesse de pousse.



Fig. 19 la régularité de la croissance est le premier critère étudié

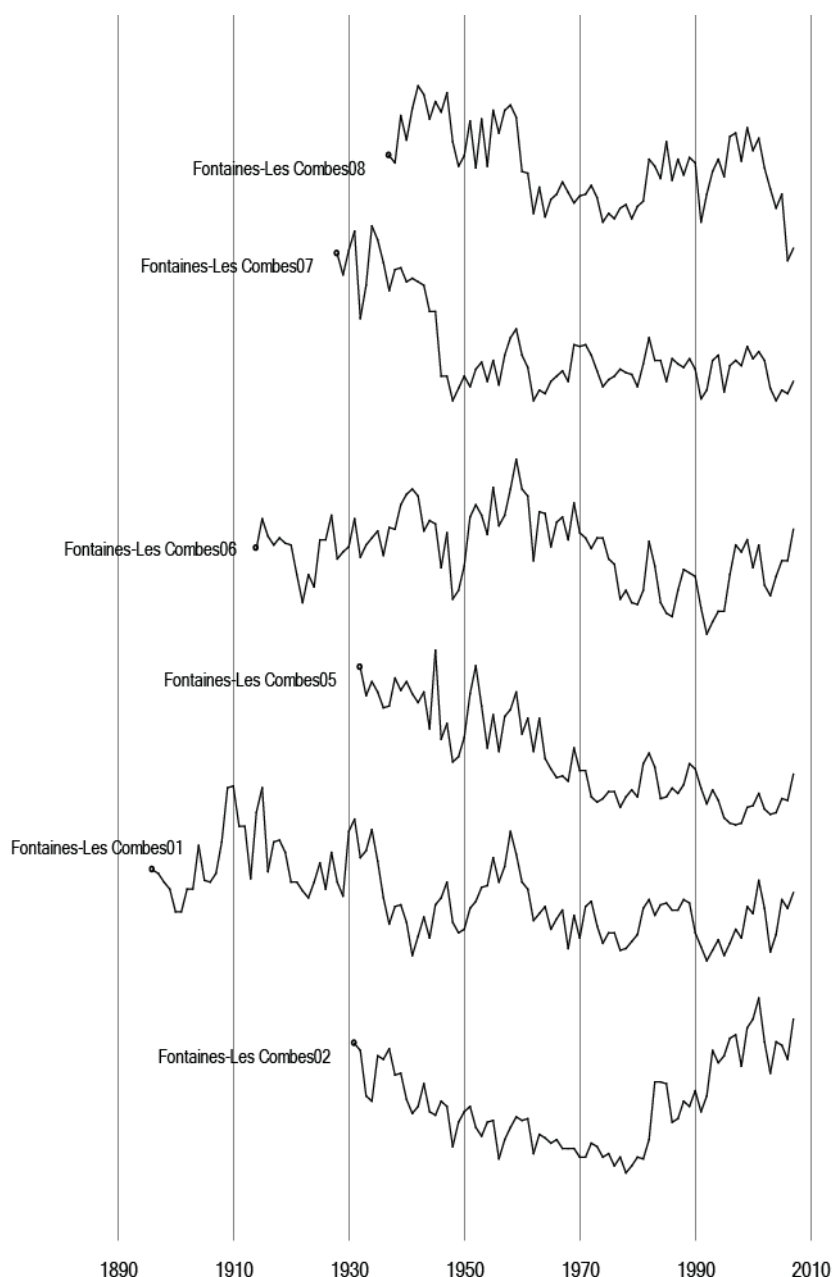


Fig. 20 Courbes de croissance d'épicéas situés au Val-de-Ruz

Dans le cadre de ce projet, pour obtenir du bois de résonance de qualité, il faut trouver des arbres qui ne réagissent pas ou peu aux conditions climatiques. Les arbres situés sur des lapiaz seront toujours en dette d'eau même si le climat est pluvieux. L'eau s'écoule entre les fentes du calcaire et ne profite pas longtemps aux épicéas. De même, les arbres situés sur des marnes auront les racines continuellement dans l'humidité. L'épicéa poussera très lentement car il n'apprécie pas ce type de sol, mais fera des cernes très réguliers. Dans les deux cas, l'évolution climatique n'influence pas vraiment la croissance de ces arbres qui reste très réduite, car ils sont situés sur des terrains qui vont les empêcher de bien se développer. L'épicéa grâce à sa forte faculté d'adaptation arrivera à se développer, mais poussera année après année très lentement et sa croissance sera régulière.

Lors de cette campagne pour définir le potentiel de bois de haute qualité, 19 épicéas ont été sélectionnés au Val-de-Ruz et mesurés au laboratoire. Cinq courbes présentent un écart-type par rapport à la largeur moyenne, particulièrement bas, en dessous de 75 (fig. 22).

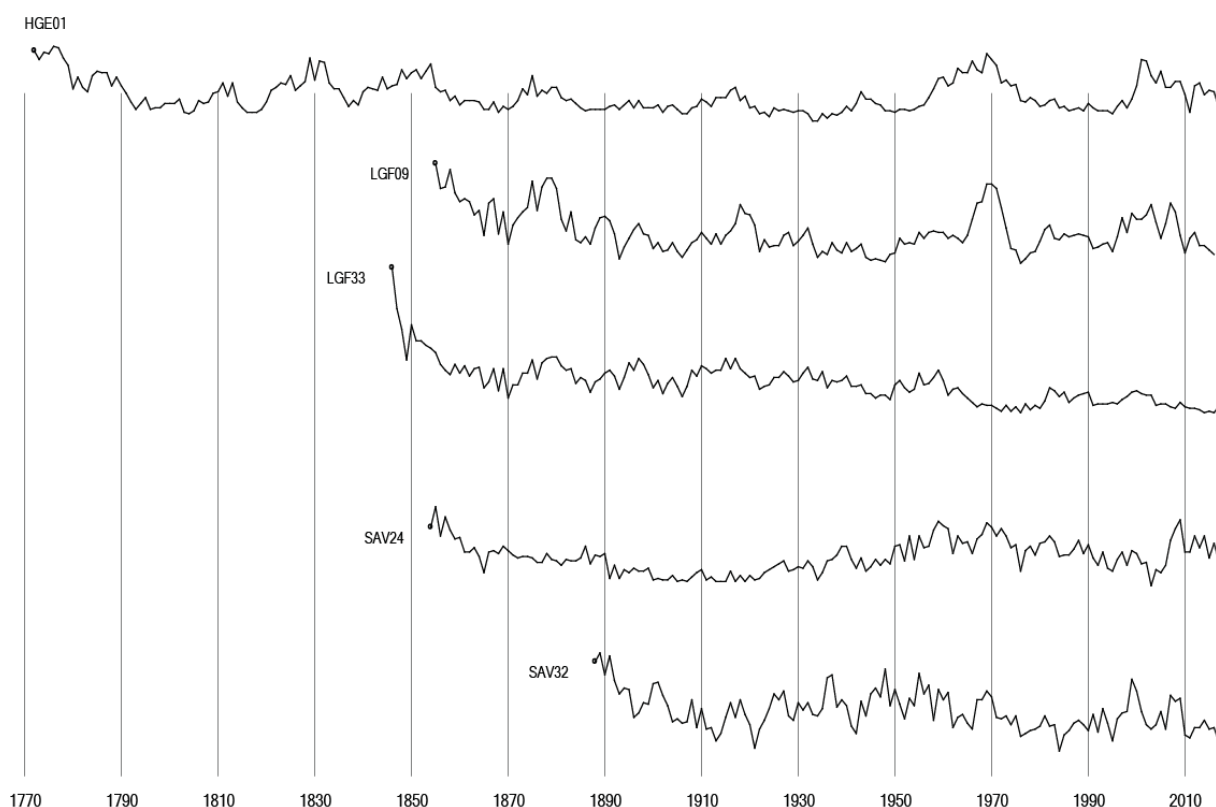


Fig. 21 Courbes du Val-de-Ruz qui présentent un écart-type en dessous de 75.

Ces courbes sont beaucoup plus plates que celles des épicéas des Combes avec une croissance qui ne présentent pas de fortes fluctuations. Elles correspondent au premier critère fixé pour faire partie de la classe de bois de résonance. Mais même avec une belle croissance, des irrégularités peuvent survenir dans la proportion de bois final, même s'il reste en moyenne en-dessous de 20%. Pour l'échantillon HGE01, l'évolution du bois final est le principal facteur des augmentations marquées de sa croissance surtout dans les 60 dernières années (fig. 23). Ce défaut du bois visible sur les courbes est également observable à l'œil nu.

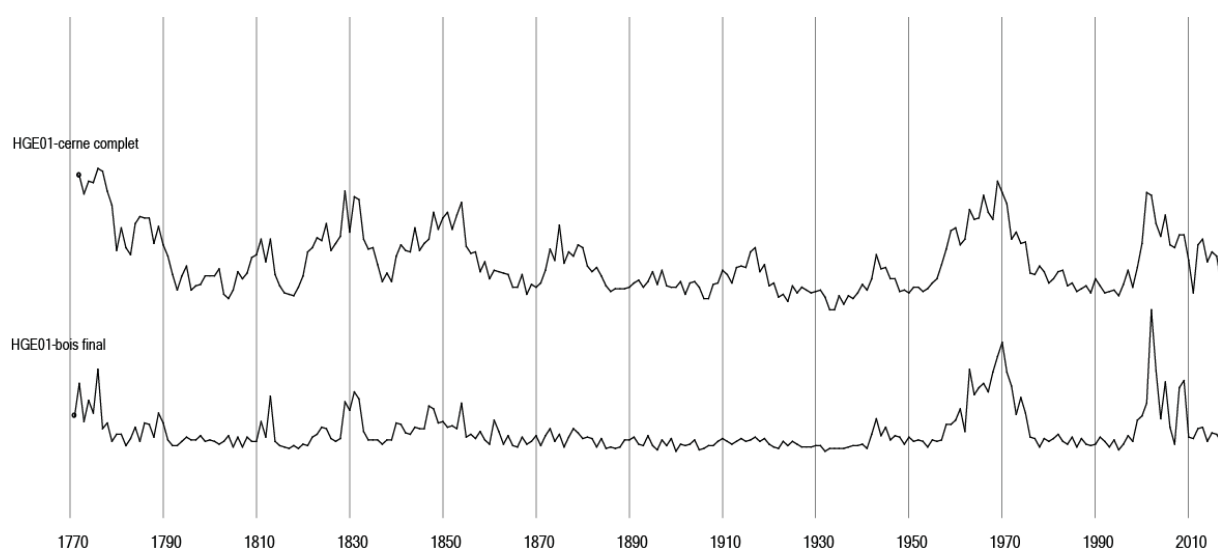


Fig. 22 Courbes de croissance de HGE01, cerne complet et bois final.

L'écart-type est un bon indice qui nous donne la variation des largeurs de cernes par rapport à la moyenne. Il nous permet de classer les échantillons en fonction de la régularité de la croissance, le premier critère à étudier (fig. 24). La première phase de la croissance d'un arbre, « la période juvénile » peut fortement influencer les valeurs obtenues pour l'écart-type. En dessous de 75, on peut considérer que la croissance est régulière et que l'échantillon peut entrer dans la classe des bois de résonance. Le 54% entre directement dans cette classe de bois de résonance selon le critère de la régularité de la croissance. En revanche pour les autres échantillons, il faut vérifier visuellement les courbes pour s'assurer que la période juvénile ne fausse pas les valeurs. En fait, il faut enlever les 20 premières années de chaque arbre pour avoir un résultat plus représentatif.

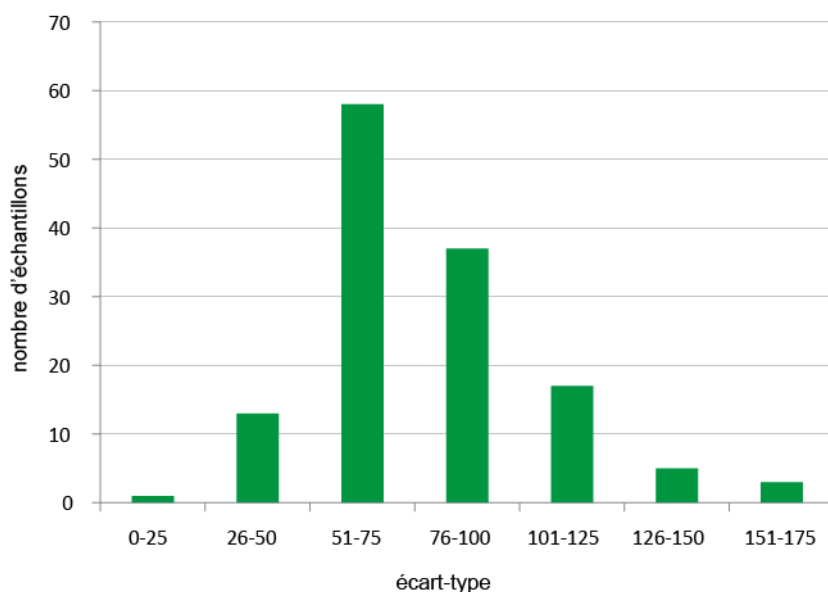


Fig. 23 Répartition en 7 classes des résultats de l'écart-type par rapport au cerne moyen.

Treize échantillons présentent un écart-type en dessous de 50 (fig.25). La meilleure croissance est obtenue par l'échantillon RV de la Brévine avec un écart-type exceptionnel de 14,96 seulement. La courbe est parfaitement régulière du début à la fin. Mais cet échantillon a un pourcentage de bois final qui atteint une moyenne assez élevée de 19%.

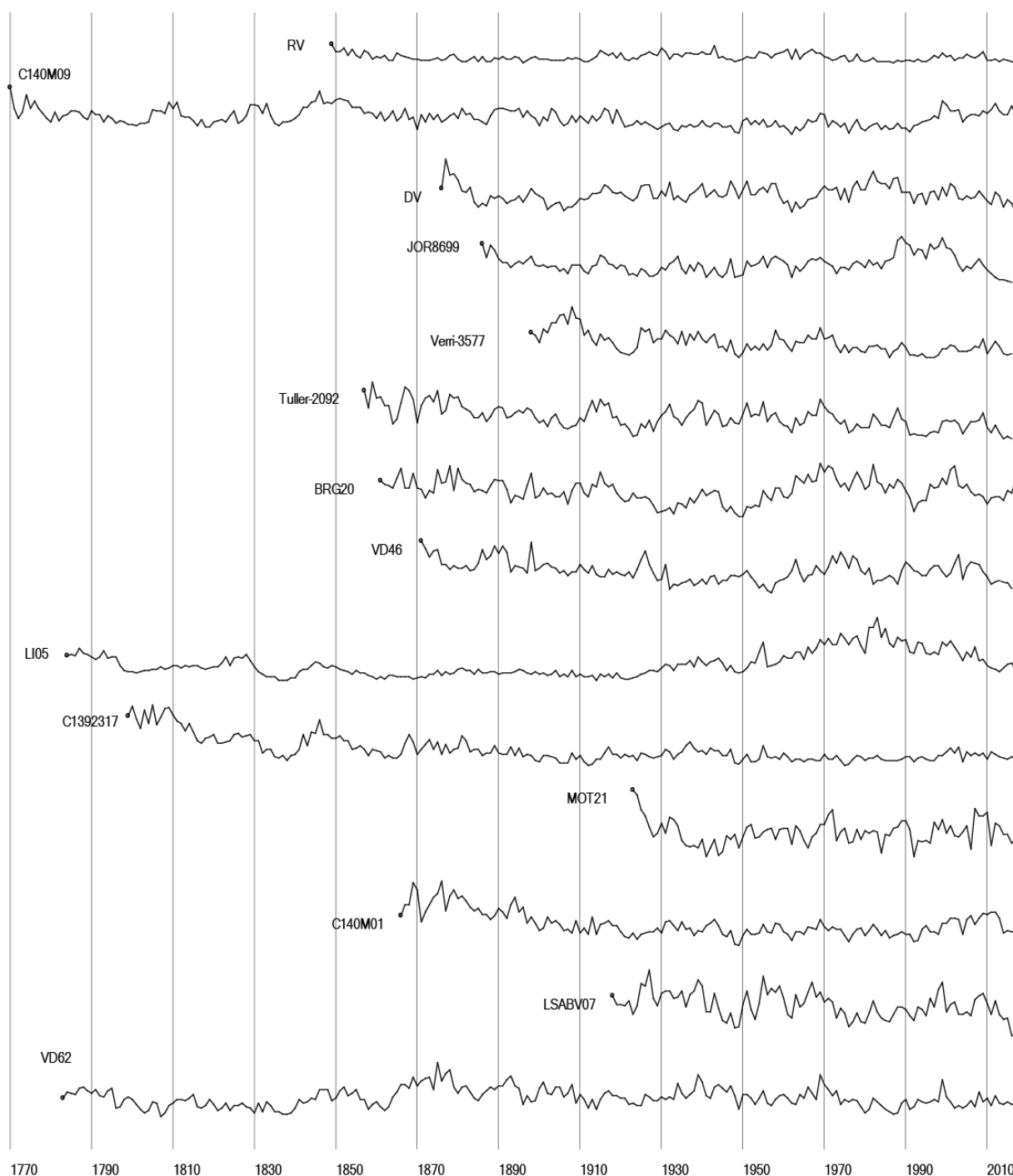


Fig. 24 Courbes de croissance avec un écart-type en dessous de 50.

La répartition sur le terrain des échantillons qui présentant un écart-type en dessous de 75 montrent que pour le canton de Vaud, 78% des épicéas abattus ont une croissance qui entre dans cette classe de régularité. La meilleure croissance est obtenue par l'épicéa C140M09 du Chenit avec une régularité pendant toute sa croissance. Selon l'écart-type, l'épicéa du lieu LI11 est exclu des meilleurs bois avec une valeur de 94,93. Cependant, cet épicéa de près de 200 ans est pénalisé par une croissance juvénile très forte pendant les trente premières années, mais le reste de la courbe est presque comparable à l'échantillon C140M09 (fig. 26). Parmi les épicéas qui dépassent une valeur de 75, il est nécessaire de contrôler la courbe visuellement pour déterminer si toute la croissance est irrégulière ou seulement une partie qui ne préterite pas au débitage de composants pour des instruments de musique. Dans la région

de la Vallée de Joux, ce pourcentage élevé de bois avec une faible valeur pour l'écart-type de la largeur moyenne du cerne vient peut-être d'une expérience de longue date pour la sélection d'épicéa de résonance.

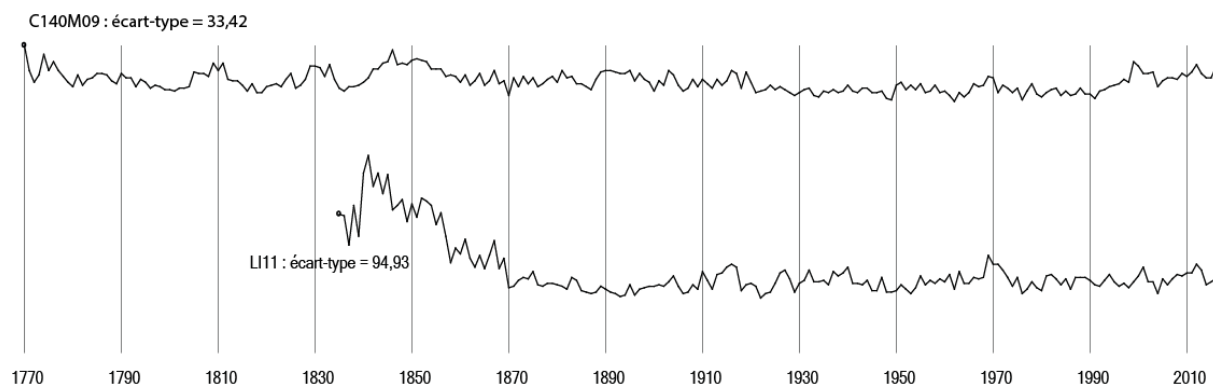


Fig. 25 Représentation de deux courbes de croissance avec la valeur obtenue pour l'écart-type.

Dans le canton de Neuchâtel, la sélection a été plus large pour pouvoir tenter de définir les meilleures zones pour rechercher du bois de résonance. Le 48% des échantillons entre directement dans la classe en-dessous de 75. En-dessous de 50, où l'on trouve des croissances exceptionnelles, qui peuvent faire de l'excellent bois de résonance, la répartition géographique de ces arbres montre clairement un potentiel plus important dans la région de la Brévine. Les trois meilleurs résultats proviennent de divisions forestières de cette commune (VR, DV, JOR8699). Mais du bois de la même qualité se trouve également dans la région des Verrières (VERRI3577), des Brenets (BRG20), du Val-de-Travers (MOT21) et de La Sagne (LSAB04). Parmi les communes qui ont fourni une dizaine d'échantillons pour cette étude, on remarque que la Brévine reste la région la mieux dotée (fig. 27).

écart-type	commune				
	La Brévine	La Sagne	Les Verrières	Val-de-Travers	Val-de-Ruz
< 51	21%	8%	11%	7%	0%
51-75	64%	25%	22%	47%	47%
> 75	14%	67%	67%	47%	53%

Fig. 26 Répartition en trois classes selon les valeurs de l'écart-type des échantillons provenant de cinq communes du canton de Neuchâtel

La proportion de bois final

Les épicéas propices à fournir du bois de haute qualité poussent sur des stations qui favorisent une croissance régulière et qui comprennent un minimum de bois final, cette partie du cerne annuel qui se forme en été et jusqu'à la fin de la période végétative (au début de l'automne). Un arbre situé à plus de 1000 m a sa croissance stoppée plus tôt qu'en basse altitude avec l'arrivée précoce de la baisse des températures. Un minimum de bois final assure une plus grande légèreté au bois et une meilleure résonance (fig. 29).



Fig. 27 La proportion de bois final ne doit pas dépasser 20% de la largeur totale du cerne de croissance.

Le 97% des sections étudiées présente un pourcentage de 20% ou moins de bois final (fig. 30). La proportion ne dépasse donc presque jamais la limite fixée au début de l'étude à 20% du cerne total au maximum. Quatre échantillons seulement présentent un taux légèrement supérieur dont 3 proviennent de la Vallée de Joux et un de la commune de Valangin, mais pour un épicéa situé en basse altitude à 711m.

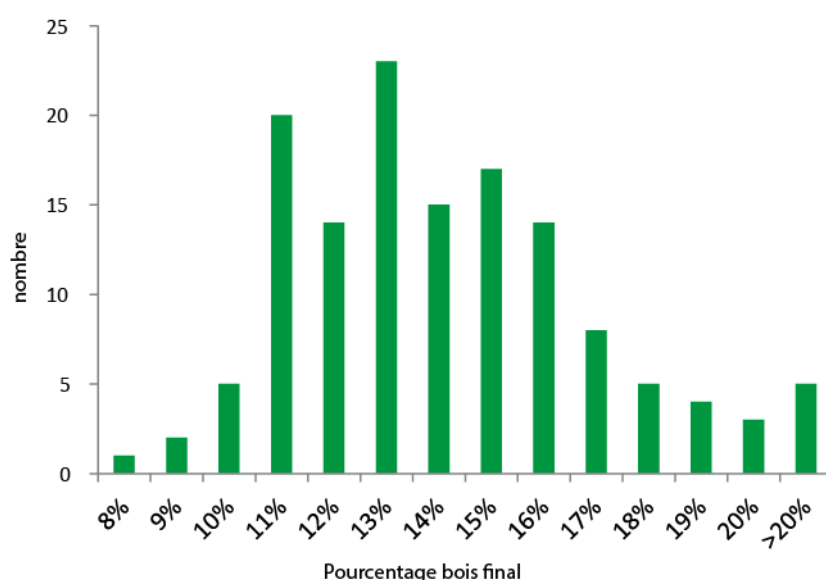


Fig. 28 Nombre d'échantillons mesurés par pourcentage de bois final

Parmi les échantillons mesurés, les taux obtenus varient entre 8 et 24%. Il semble que la possibilité de trouver des épicéas avec des taux très bas de bois final (8% à 11%) soit plus élevée dans la moitié-est du Jura neuchâtelois que dans la moitié-ouest (fig. 30)

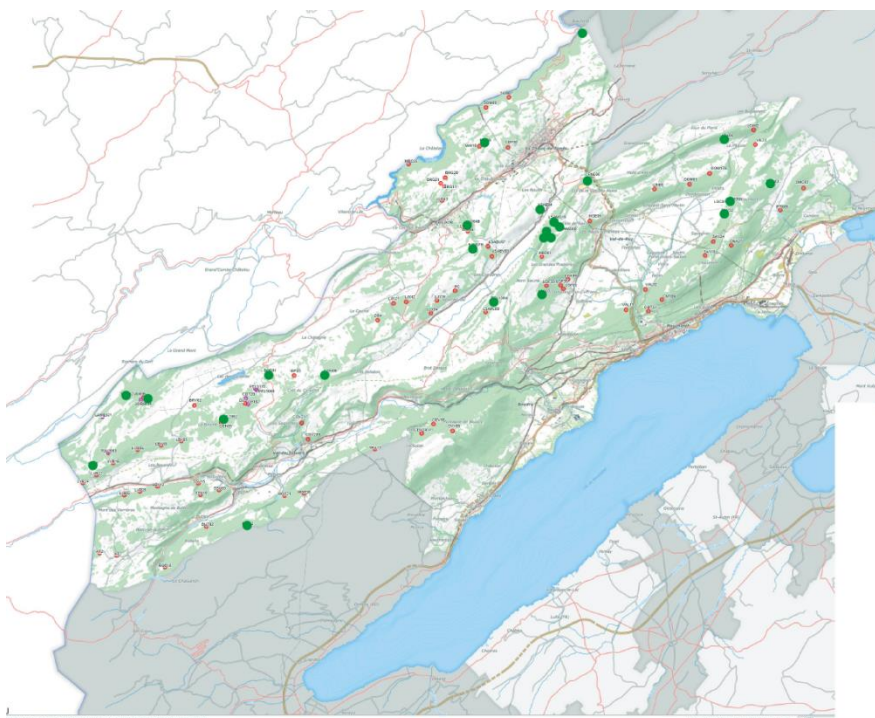


Fig. 29 Carte de répartition des épicéas avec un pourcentage de bois final compris entre 8 et 11% (points verts).

Hormis ce premier constat, la différence de proportion constatée est propre à chaque individu et n'est pas liée à une division forestière ou à une région. Pour le domaine des Cottards à la Brévine, 23 épicéas ont été étudiés et le taux de bois final évolue de 11% à 18% (fig.32).

NE	La Brévine	Cottards11	11%
NE	La Brévine	Cottards16	11%
NE	La Brévine	Cottards03	11%
NE	La Brévine	Cottards17	11%
NE	La Brévine	Cottards09	11%
NE	La Brévine	Cottards19	12%
NE	La Brévine	Cottards04	12%
NE	La Brévine	Cottards18	13%
NE	La Brévine	Cottards21	13%
NE	La Brévine	Cottards15	13%
NE	La Brévine	Cottards08	13%
NE	La Brévine	Cottards07	14%
NE	La Brévine	Cottards23	15%
NE	La Brévine	Cottards22	15%
NE	La Brévine	Cottards12	15%
NE	La Brévine	Cottards01	15%
NE	La Brévine	Cottards05	15%
NE	La Brévine	Cottards02	16%
NE	La Brévine	Cottards14	16%
NE	La Brévine	Cottards10	17%
NE	La Brévine	Cottards06	17%
NE	La Brévine	Cottards20	17%
NE	La Brévine	Cottards13	18%

Fig. 30 Proportion de bois final pour les épicéas des Cottards à la Brévine.

La largeur moyenne des cernes

Pour le bois de résonance, la largeur moyenne des cernes de croissance est importante et destine un épicéa à un certain type d'instruments de musique ; pour les violons, une largeur moyenne de 1 à 1,5 mm est recherchée. Une croissance plus importante de 1,5 mm à 2,5 mm est désirée par les facteurs de pianos et de harpes et 3 à 4 mm pour la fabrication d'un violoncelle. Dans la pratique, la possibilité d'offrir une large gamme de largeur de cernes est importante car les luthiers peuvent avoir des exigences différentes pour la fabrication d'un même type d'instrument.

Parmi les 138 épicéas analysés, la largeur moyenne évolue entre 0,7 mm et 3,16 mm (fig. 33). La largeur moyenne des cernes est fortement liée à l'âge de l'arbre. Quatre épicéas présentent une croissance moyenne en dessous du millimètre et ils viennent tous de la vallée de Joux. Plus la vitesse de croissance des arbres est élevée, moins la régularité est bonne. Avec une croissance moyenne de 2mm et plus, parmi 47 épicéas, seuls 8 présentent un écart-type en dessous de 75. Car pour avoir une meilleure croissance, l'épicéa doit bénéficier de conditions édaphiques plus favorables et dès lors, il sera plus réceptif aux évolutions des conditions climatiques.

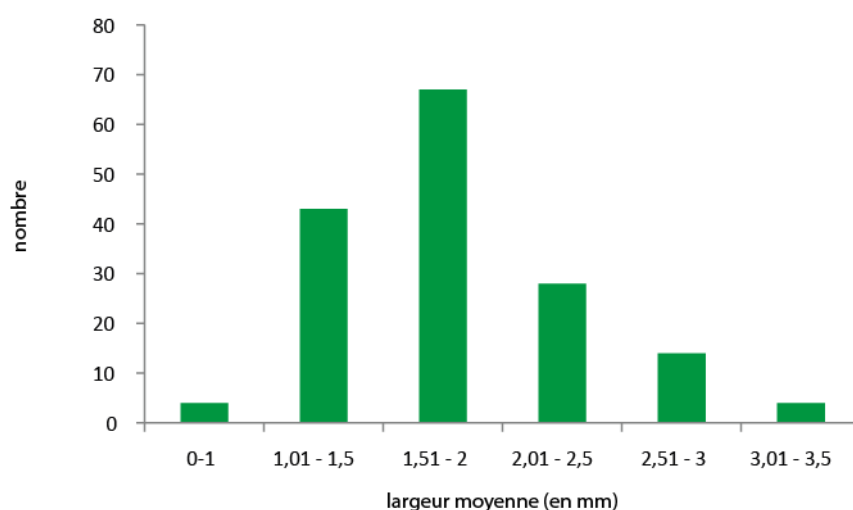


Fig. 31 Répartition en 5 classes des largeurs moyennes obtenues sur les épicéas.

Les mesures pour l'EPFZ

Des mesures ont été effectuées par l'EPFZ sur des barettes de 2 cm de côté (fig. 33). Le laboratoire de dendrochronologie a repris ces échantillons et remesuré les cernes de croissance contenus sur les sections transversales (annexe 4). Les résultats de cette étude sont à lire dans le rapport d'Ernst Zürcher.

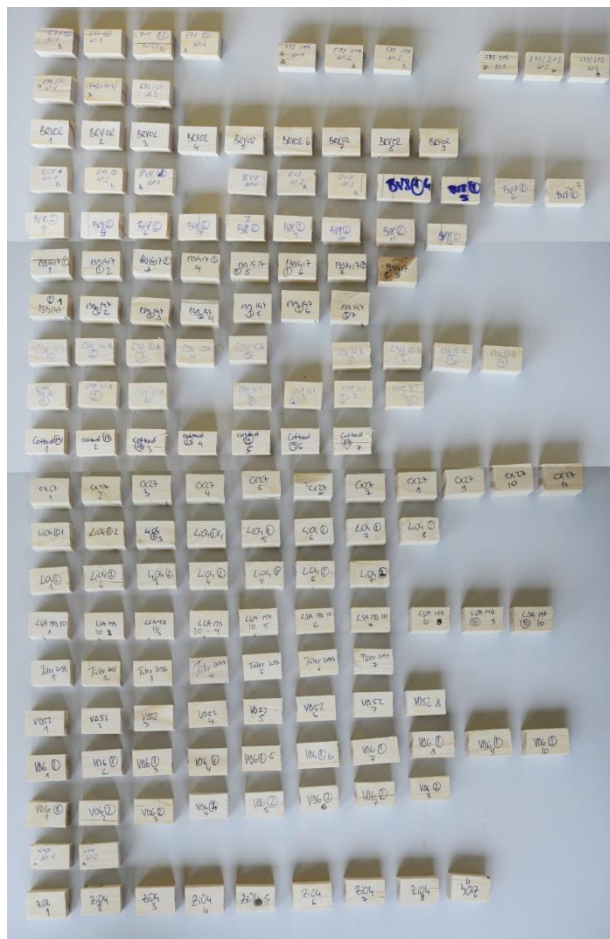
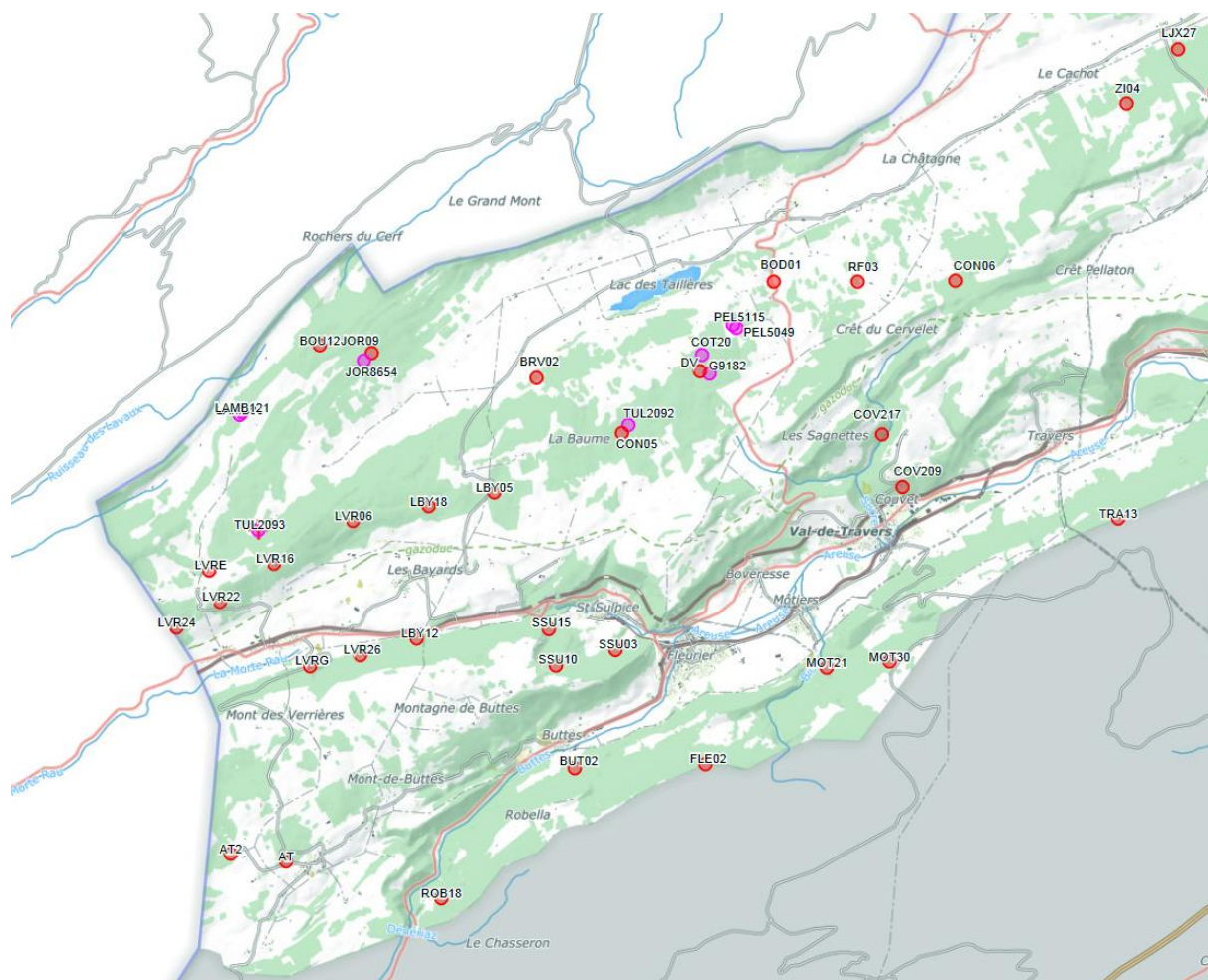


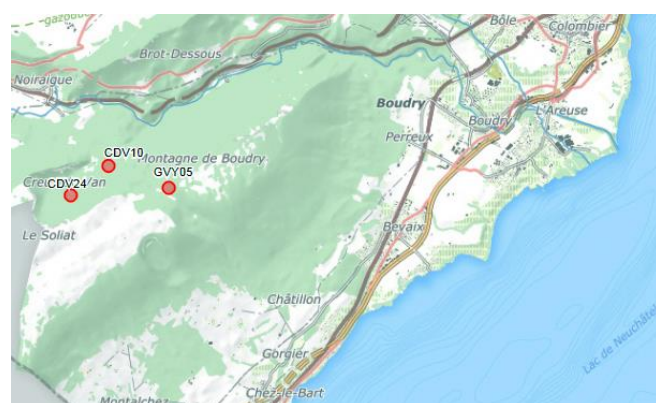
Fig. 32 Les 159 échantillons mesurés pour l'EPFZ

Annexe 1 : cartes avec la position des épicéas échantillonnés

Région : Val-de-Travers et La Brévine



Région : la Grande Béroche



Introduction

Les caractéristiques communes des bois résineux de haute qualité sont la régularité de structure, la finesse de cernes, la rectitude du fil, l'absence de nœuds, l'absence de bois de compression et la faible densité. Le stade ultime de classification selon ces critères est atteint par le bois de résonance.

Buts de ce volet d'étude

Le premier but de cette étude est de comparer les caractéristiques structurelles, physiques et mécaniques des bois collectés dans le cadre de ce projet avec les caractéristiques fournies par la littérature (en particulier pour les bois de résonance). Ceci permet de situer de la façon la plus objective possible le niveau de qualité des meilleures billes sélectionnées dans le cadre des exploitations forestières courantes des zones élevées de la chaîne jurassienne.

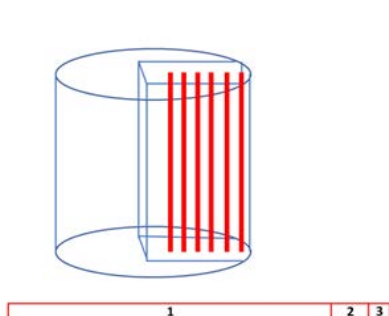
Un second but est de déterminer expérimentalement et statistiquement les critères structurels, physiques ou mécaniques les plus aptes à identifier des bois de résonance répondant aux exigences des utilisateurs.

Le troisième but est d'étudier le lien entre les qualités des bois décrites et les conditions de croissance des arbres en forêt : facteurs de la station, structure du peuplement, sylviculture. Cette partie est la plus originale de ce projet, dans la mesure où il n'existe à ce jour pratiquement aucune recherche scientifique précise allant au-delà de règles très générales formulées par des praticiens.

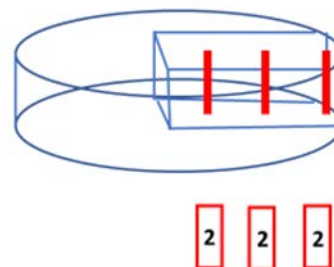
Matériel et Méthodologie

Le matériel consiste en éprouvettes tirées d'échantillons d'Epicéa (*Picea abies* Karst.) mis à disposition sous deux formes :

- 27 tronçons de billes mesurant 50 cm environ, dont furent tirés les éprouvettes longues (20 x 20 x 300 mm).
- 95 rondelles (tronçons courts) de 10 cm d'épaisseur, dont la plupart fournirent 3 éprouvettes courtes (20 x 20 x 60 mm).
- → Les éprouvettes longues constituent un total de 194 pièces
- → Le nombre total d'éprouvettes courtes testées est de 395.



Prélèvement des éprouvettes longues
et tests : 1 = t. acoustiques & flexion /
2 = compression / 3 = anal. de cernes



Prélèvement des éprouvettes courtes testées
en compression. La structure des cernes a été
au préalable analysée.

Les analyses et tests ont été exécutées selon les normes DIN en vigueur, hormis pour les échantillons longs testés acoustiquement, qui avaient une longueur de 300 mm au lieu des 400 mm recommandés. Au préalable, toutes les éprouvettes furent conditionnées au climat normé 20 °C / 65 % HR. Les tests acoustiques furent exécutés au moyen de l'Ultrasonic Tester BPV Steinkamp à l'Ecole Polytechnique de Zürich, selon la procédure appliquée par Sonderegger et Niemz (2008) (Fig. 1).

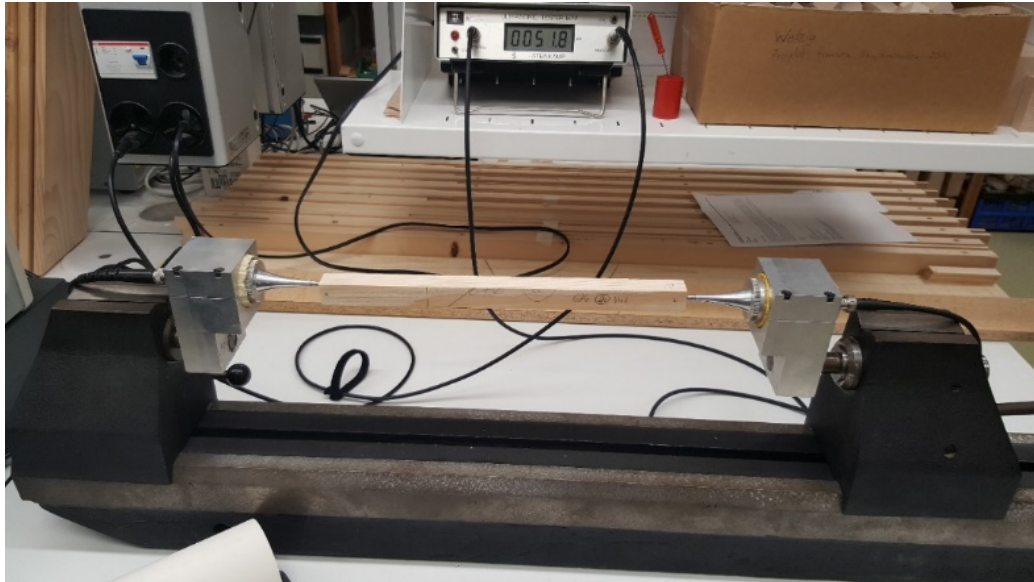


Figure 1 : Test acoustique d'éprouvettes longues (Ultrasonic Tester BPV Steinkamp)

Les critères physiques et mécaniques déterminés furent les suivants :

- Densité (kg / m^3) à l'état conditionné (sur la base du poids et des dimensions)
- Vitesse de propagation du son (m/s)
- Module d'élasticité (N / mm^2)
- Résistance à la flexion (N / mm^2)
- Résistance à la compression (N / mm^2)

Ces critères furent ensuite analysés d'une part en fonction des analyses de cernes (Laboratoire de dendrochronologie du Laténium à Hauterive NE), d'autre part en fonction de conditions de croissance des arbres et des mesures sur le terrain (données S. Jacot, Ingénieur forestier HES, La Sagne NE).

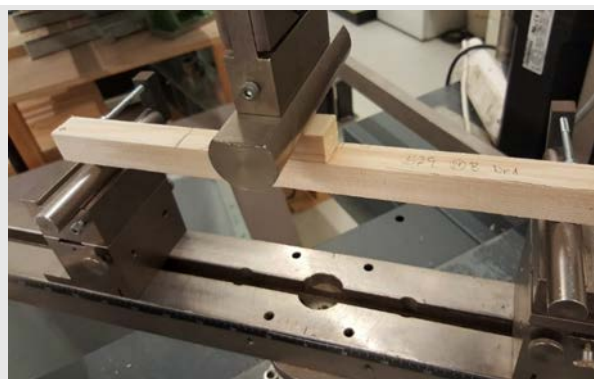


Figure 2: Test en flexion



Figure 3: Test en compression

Résultats et interprétations

Le tableau ci-dessous permet de visualiser de façon comparative les valeurs obtenues au moyen des tests physiques, mécaniques et acoustiques en laboratoire (HES bernoise / EPFZ). Le matériel en question n'étant pas de qualité « résonance » seule, alors que c'était le cas pour les recherches de références, nous comparons ici avant tout nos valeurs maximales avec les valeurs maximales indiquées par Buksnowitz et Teischinger (2007) pour 84 échantillons de bois de lutherie (violon) provenant de l'Autriche, de l'Allemagne, de l'Italie du Nord et de la Suisse. D'autres valeurs de référence complémentaires sont mises entre guillemets, car elles représentent des moyennes (Tab.1).

Comparaison des valeurs obtenues avec d'autres travaux de recherche sur des bois de résonance sélectionnés			
Critère	Valeur maximale Projet BHQ	Valeurs maximales (resp. moyennes) de référence	Sources
Vitesse de propagation du son (m/s)	6'302	6'897 (6'110) (5'736)	1 (2) (3)
Quotient de résonance (m ⁴ / s * kg)	17.2	- 14.5 (12.4)	- 2 (3)
Module d'élasticité en flexion (N/mm ²)	15'974	14'725 (12'200) (10'794)	1 (2) (3)
Résistance en flexion (N/mm ²)	104	100 (79) (90)	1 (2) (3)
Résistance en compression (N/mm ²)	50	45 - .	1 - -

Tableau 1 : comparaison des valeurs obtenues dans le Projer Bois de Haute Qualité avec d'autres travaux de recherche sur des bois de résonance sélectionnés.

Sources : 1 = Buksnowitz et Teischinger 2007 / 2 = Sonderegger, Alter et Niemz 2008 (valeurs moyennes, sauf max. pour le quotient de résonance) / 3 = Niemz 2018 (valeurs moyennes).

Il en ressort que la vitesse de propagation du son maximale est inférieure de 8.6 % par rapport au maximum indiqué par la littérature, mais clairement supérieure aux moyennes citées par les 2 autres sources. Quant au quotient de résonance, il est ici supérieur de 18.6 % par rapport à la valeur fournie par la publication de référence, le module d'élasticité en flexion à raison de 8.5 %, la résistance en flexion de 4 % et la résistance en compression de 11 %.

Structures anatomiques

Largeur des cernes

Pour toute la part de l'étude menée à la HESB / EPFZ, la largeur moyenne des cernes était de 1.86 mm. Les 3 classes regroupant les valeurs inférieures à 1.90 mm représentent 58% du tout.

Interprétation : Cette structure de cernes correspond donc pour 2/3 des cas aux valeurs indiquées dans les ouvrages de référence consacrés aux bois de résonance. Buksnowitz et al. (2006) indiquent à la fois 1 – 2 mm et simplement < 2 mm (ce qui est aussi le cas pour la norme TGL 15799/12). Dans leur étude portant sur des échantillons déjà sélectionnés et reconnus comme bois de lutherie, la largeur moyenne était de 1.25 mm. Sur un choix de bois de résonance provenant des Grisons, Sonderegger et al. (2008) mesurent des largeurs moyennes variant entre 1.22 mm et 1.58 mm. Selon Zieger, E. (1960), une largeur de 1 – 2mm est idéale, des cernes trop fins résonnant de façon trop dure.

Du point de vue du critère « largeur moyenne des cernes », les massifs forestiers des hauteurs jurassiennes représentent donc un potentiel considérable de bois de haute qualité, et en particulier de résonance. Les billes de l'étude classées visuellement comme « bois de résonance » ont une largeur moyenne de cernes de 1.41 mm, ce qui entre parfaitement dans la norme.

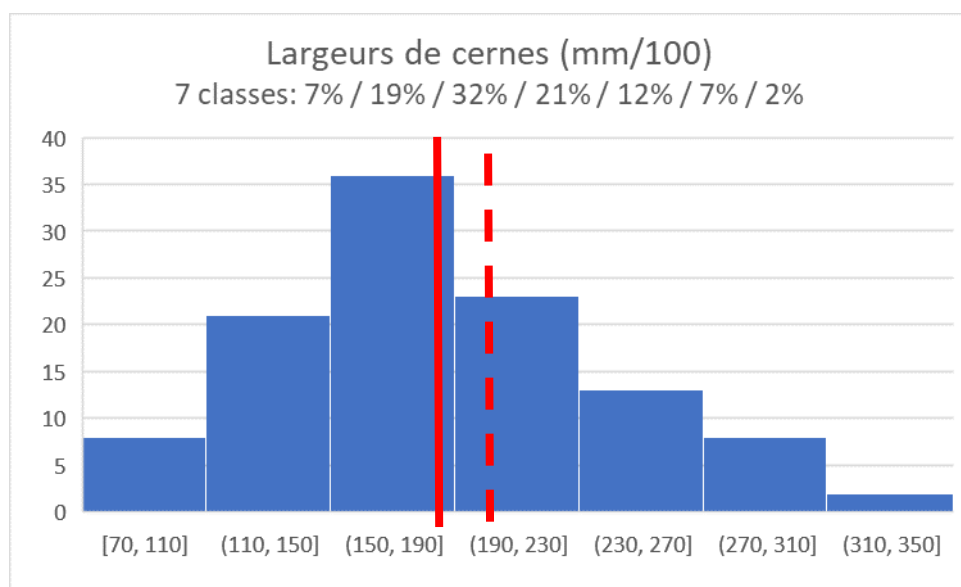


Figure 4 : Répartition des largeurs de cernes, avec indication de la valeur moyenne (1.86 mm). La valeur limite pour le bois de résonance (2 mm) est indiquée en traitillé,

Régularité des cernes

Ecart-types des largeurs de cernes : Pour chaque série de mesures en coupe transversale, l'écart-type sert d'indice de variabilité, resp. de régularité des cernes. Pour toute la part de l'étude menée à la HESB / EPFZ, l'écart-type moyen était de 80.6. Les 2 classes regroupant des valeurs inférieures à 71 représentent 41% du tout.

Interprétation : Cette variabilité des cernes correspond donc pour près de la moitié des cas à la valeur limite de 75 / 0.75 mm indiquée par Niemz et Sonderegger (2017).

Du point de vue du critère « régularité des cernes /écart-type » également, les massifs forestiers des hauteurs jurassiennes représentent donc un potentiel considérable de bois de haute qualité, et en particulier de résonance

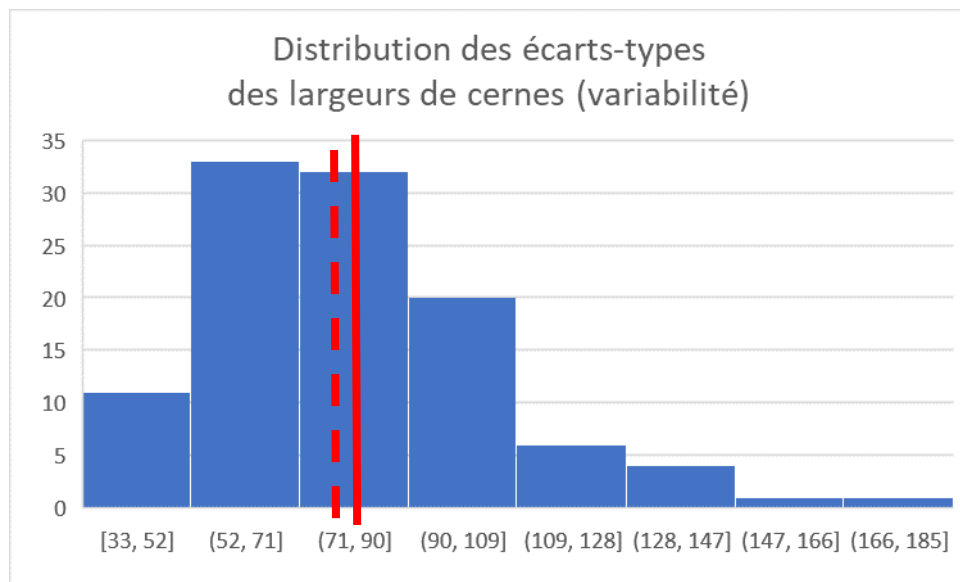


Figure 5 : Répartition des écarts-types des séries de cernes, avec indication de la valeur moyenne (80.6). La valeur limite pour du bois de résonance (0.75 mm) est indiqué en traitillé,

Part de bois final

Pour tout le volet de l'étude menée à la HESB / EPFZ, la part de bois final (%) était de 0.14 (14%). Les 5 classes regroupant les valeurs inférieures à 0.20 (20%) représentent 96% du tout, ou la totalité (100%), si l'on se réfère à la valeur limite de 0.25 (25%)..

Interprétation : Cette structure de cernes correspond donc pour plus de 9/10ème des cas aux valeurs indiquées dans les ouvrages de référence consacrés aux bois de résonance. Niemz et Sonderegger (2017) indiquent 20 – 33%. Buksnowitz et al. (2006) indiquent pour leur part à la fois 20 – 36%, et 20-25% selon les sources. Dans leur étude portant sur des échantillons déjà sélectionnés et reconnus comme bois de lutherie, la part moyenne de bois final était de 20.2%. Selon Zieger, E. (1960), une valeur de 20 – 25% est idéale. De ces indications, l'on retient que la valeur de 36% ne devrait en aucun cas être dépassée pour accéder à la catégorie 'bois de résonance'.

Du point de vue du critère « pourcentage ou part de bois final des cernes », les massifs forestiers des hauteurs jurassiennes représentent donc un potentiel tout à fait exceptionnel de bois de haute qualité, et en particulier de résonance. En effet, il n'existe dans la littérature scientifique aucune indication qu'une part de bois final clairement *inférieure* à 20 % puisse être préjudiciable. Les billes de l'étude classées visuellement comme « bois de résonance » ont une part de bois final moyenne de 0.16 (16%), ce qui se situe largement au-dessous des limites à ne pas dépasser selon les conventions.

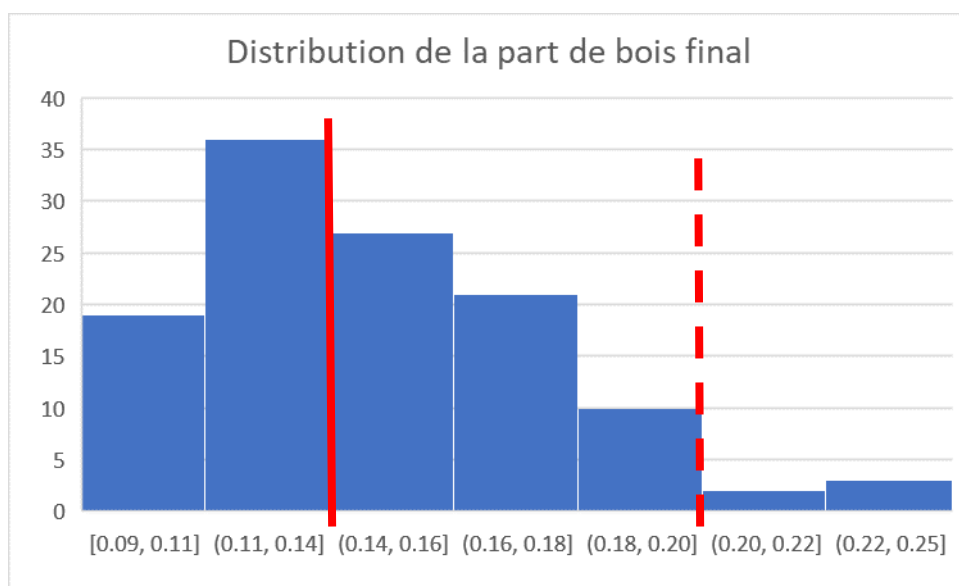


Figure 6 : Répartition des parts de bois final des séries de cernes, avec indication de la valeur moyenne (0.14). La valeur limite pour du bois de résonance (0.20 mm) est indiqué en traitillé,

Propriétés physiques et mécaniques

Densité du bois

Pour toute la part de l'étude menée à la HESB / EPFZ, la densité moyenne des échantillons était de 432 kg/m³. Les 5 classes regroupant les valeurs inférieures à 427 kg/m³ représentent 40% du tout. Les 7 classes regroupant les valeurs inférieures à 473 kg/m³ représentent 84% du tout.

Interprétation : Cette distribution des densités correspond donc pour près de la moitié ou même pour plus des 4/5èmes des cas aux valeurs indiquées dans les ouvrages de référence consacrés aux bois de résonance, qui doivent être légers. Buksnowitz et al. (2006) indiquent comme valeur limite à la fois 430 et 470 kg/m³, selon les sources. Dans leur étude portant sur des échantillons déjà sélectionnés et reconnus comme bois de lutherie, la densité moyenne était de 432 kg/m³, donc identique à la moyenne de nos bois jurassiens. Sur un choix de bois de résonance provenant des Grisons, Sonderegger et al. (2008) mesurent des densités moyennes variant entre 389 et 435 kg/m³. Dans une récente étude portant sur 4 billes de résonance provenant de La Brévine (NE), la densité moyenne était de 466 kg/m³ (Niemz 2018).

Du point de vue du critère « densité du bois », les massifs forestiers des hauteurs jurassiennes représentent donc également un potentiel remarquable de bois de haute qualité, et en particulier de résonance. Les billes de l'étude classées visuellement comme « bois de résonance » ont une densité moyenne de 456 kg/m³, ce qui se place à mi-chemin entre les deux valeurs limites mentionnées par la littérature.

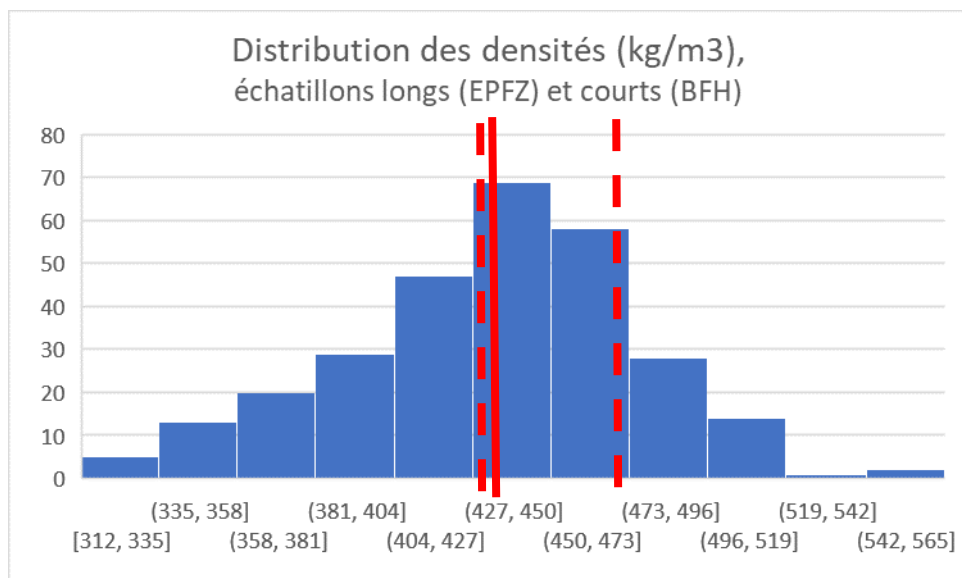


Figure 7 : Répartition des densités des échantillons longs (EPFZ) et courts (BFH), avec indication de la valeur moyenne (432 kg/m³). Deux des valeurs limite pour du bois de résonance figurant dans la littérature (430, resp. 470 kg/m³) sont indiquées en traitillé,

Vitesse de propagation du son

Pour toute la part de l'étude menée à la HESB / EPFZ, la vitesse moyenne de propagation du son était de 5729 m/s. Les 5 classes regroupant les valeurs supérieures à 5485 m/s représentent 83% du tout. Les 2 classes comprises entre 5675 et 6055 m/s regroupent 50% des échantillons.

Interprétation : Cette distribution des vitesses de propagation du son correspond donc pour plus des 4/5^{ème}, resp. pour la moitié des cas aux valeurs indiquées dans les ouvrages de référence consacrés aux bois de résonance. Buksnowitz et al. (2006) indiquent, selon les sources, à la fois le seuil inférieur de 5500 m/s et la fourchette de 5600 – 6000 m/s. Dans leur étude portant sur des échantillons déjà sélectionnés et reconnus comme bois de lutherie, la vitesse moyenne était de 6183 m/s. Sur un choix de bois de résonance provenant des Grisons, Sonderegger et al. (2008) mesurent des vitesses moyennes variant entre 5910 et 6550 m/s. Dans une récente étude portant sur 4 billes de résonance provenant de La Brévine (NE), la vitesse de propagation du son moyenne était de 5441 m/s (1^{ère} série), resp. 5736 m/s dans la 2^{ème} série (Niemz 2018). Du point de vue du critère « vitesse moyenne de propagation longitudinale du son », les massifs forestiers des hauteurs jurassiennes représentent donc un potentiel considérable de bois de haute qualité, et en particulier de résonance.

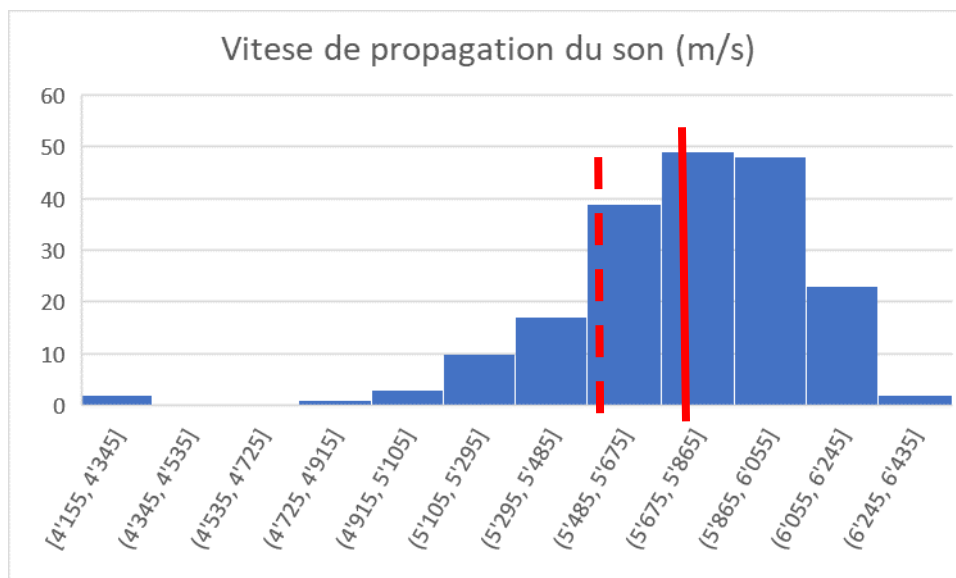


Figure 8 : Répartition des vitesses de propagation longitudinale du son dans les échantillons longs (EPFZ), avec indication de la valeur moyenne (5729 m/s). Une valeurs limite inférieure communément admise pour du bois de résonance (5500 m/s) est indiquée en traitillé,

Quotient de résonance

Le critère qualitatif principal pour du bois de résonance est le **Quotient de Résonance** $QR = c/r_{12}$. La figure 9 montre les valeurs obtenues pour 193 échantillons testés acoustiquement à l'EPFZ (c = vitesse de propagation du son longitudinale en m/s à l'état conditionné en laboratoire). La valeur maximale est ici de 17.2 .

Interprétation: Les valeurs (pour 193 échantillons) sont dans l'ensemble excellentes, la plupart étant supérieures à la valeur référence de 12. Ceci est équivalent, si ce n'est supérieur aux valeurs rapportées pour les Grisons et l'Italie (Paneveggio, max. 16). Dans une étude spécifiquement effectuée sur les bois des Cottards (La Brévine), les valeurs du QR se plaçaient majoritairement déjà au-dessus de 12, dépassant dans un cas la valeur de 15 (Lavarini 2018). Il s'agissait là du matériel à la base de la publication de P. Niemz (2018), indiquant pour le quotient de résonance une valeur moyenne de 12.38 (1^{ère} série), resp. 12.46 (2^{ème} série). Avec la valeur extrême de 17.2 obtenue dans la présente étude, nous nous trouvons donc parmi les valeurs maximales disponibles dans la littérature.

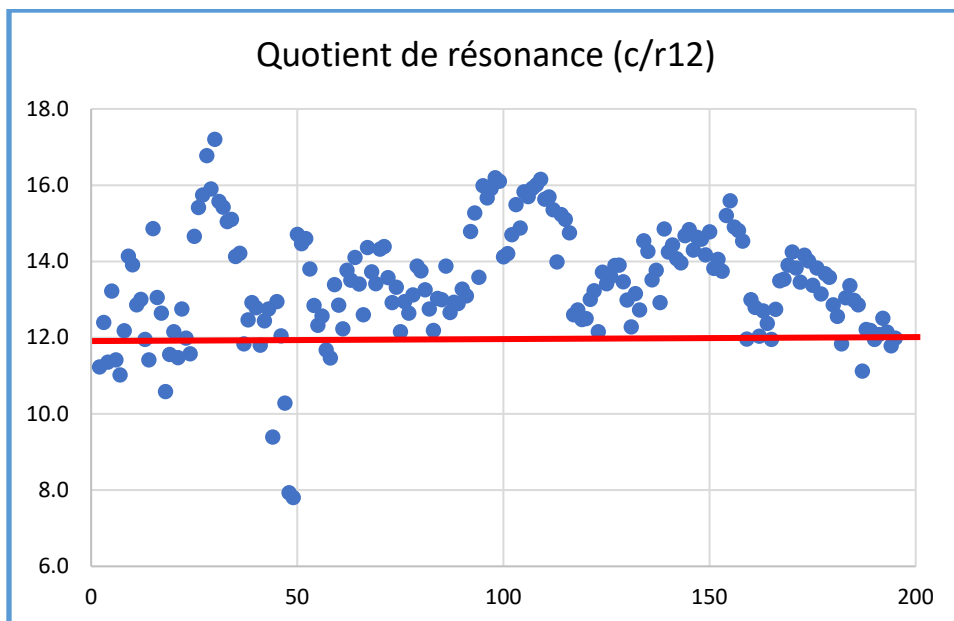


Figure 9 : Distribution des Coefficients de Résonance pour les 193 échantillons longs testés dans les laboratoires de l'EPFZ, avec indication du seuil de référence de 12, permettant des comparaisons.

La comparaison avec la répartition du Quotient de Résonance $QR = c/r_{12}$ dans l'analyse acoustique de 1200 tables d'harmonie de guitares (Ziegenhals 2001) confirme parfaitement l'excellente répartition des valeurs obtenues pour les bois de l'arc jurassien (voir fig. 10).

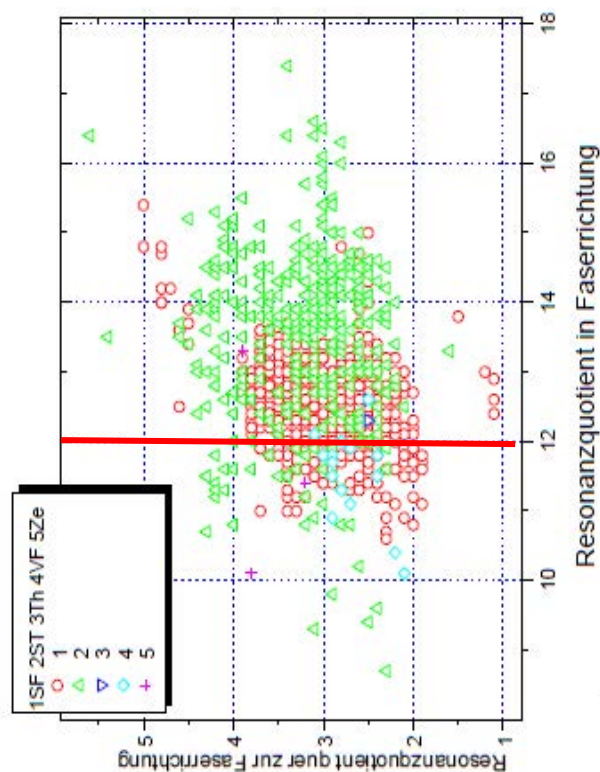


Figure 10 : Distribution des Quotients de Résonance pour 1200 tables d'harmonie de guitares (ziegenhals 2001), avec indication du seuil de référence de 12.

Remarque:

Le quotient de résonance longitudinal (ordonnée) est comparé dans cette étude de Ziegenhals (2001) au quotient de résonance transversal (abscisse). La ligne rouge indique la valeur 12 pour le quotient longitudinal, ce qui permet d'observer qu'il y a ici davantage de valeurs inférieures à 12, comparativement au Projet Bois de Haute Qualité.

Un autre critère qualitatif pour du bois de résonance est la distribution du Quotient de Résonance $QR = c/r12$ en fonction de la densité (193 échantillons).

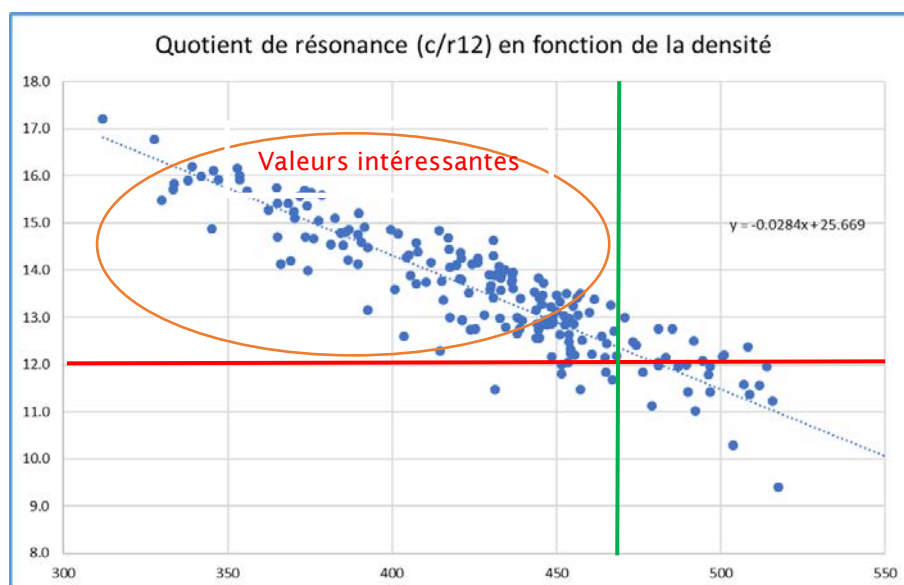


Figure 11 : Répartition du quotient de résonance e fonction de la densité

Remarque :

Les bois les plus appréciés possèdent à la fois une haute vitesse de propagation du son, tout en étant de faible densité, clairement en-dessous de la valeur moyenne pour l'Epicéa (470 kg/m³). Autant pour le critère Quotient de Résonance que pour le critère Basse densité, les valeurs obtenues dans le Projet Bois de Haute Qualité ont une distribution remarquable.

Une comparaison instructive peut être faite avec l'étude du Quotient de Résonance $QR = c/r12$ en fonction de la densité effectuée par Sonderegger, Alter et Niemz (2008) sur un ensemble de 160 échantillons sélectionnés comme caractéristiques pour du bois de résonance.

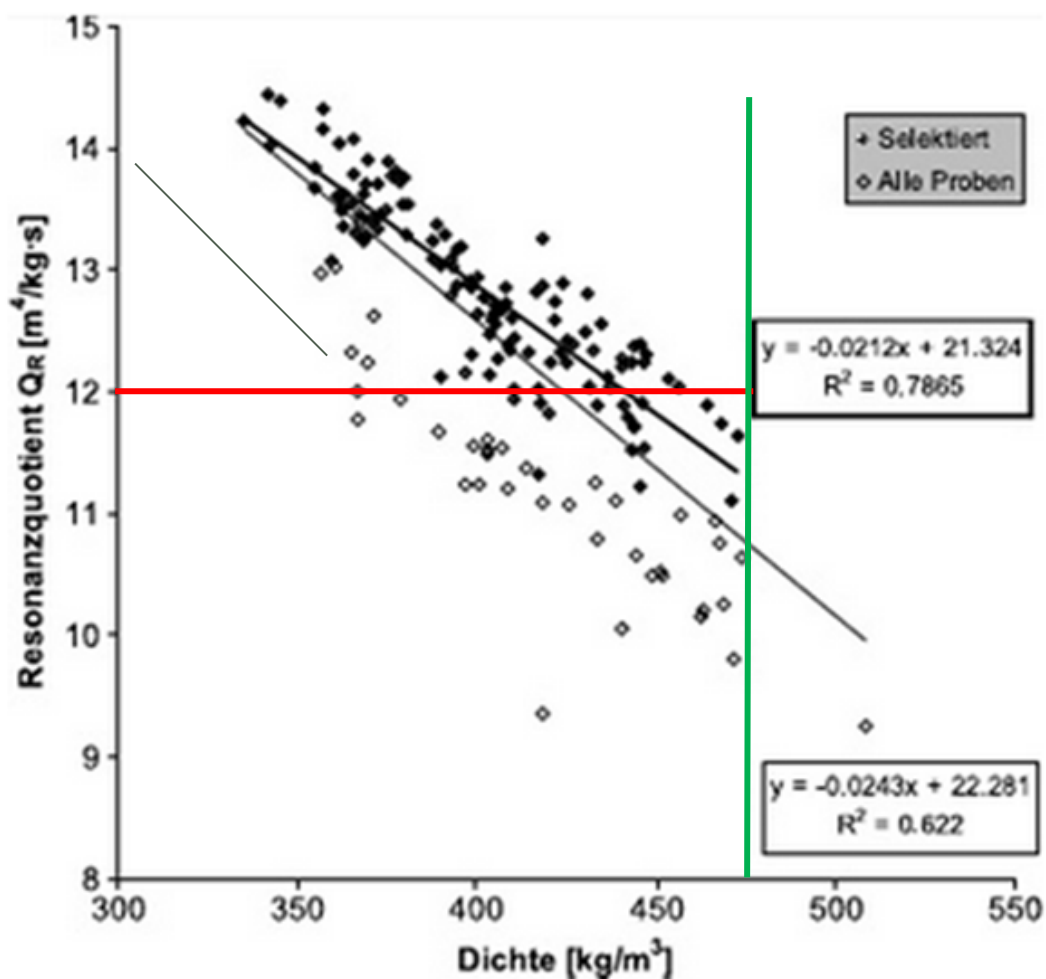


Figure 12 : Relation Quotient de résonance / Densité, telle que représentée dans Sonderegger et al. (2008). Les valeurs indiquées en foncé furent obtenues en éliminant un certain nombre d'arbres de classement inférieur. « Resonanzquotient » = quotient de résonance / « Dichte » = densité.

Remarque:

Ici encore, davantage de valeurs du Quotient de résonance sont proportionnellement inférieures à 12, comparativement à la distribution pour le Projet Bois de Haute Qualité. La limite supérieure pour la densité est ici environ 470 kg/m³.

Indicateurs (structuraux et physiques) des qualités acoustiques

Tests aux ultrasons sur le terrain

La comparaison de deux appareils mesurant la vitesse de propagation du son sur des billes plus ou moins directement après l'abattage montrent une corrélation presque parfaite ($R^2 = 0.98$) (voir Fig.13). Il s'agit du « Sylvatest » utilisé dans une étude précédente (Niemz 2018) et du « TreeSonic » acquis spécifiquement pour les besoins de cette étude.

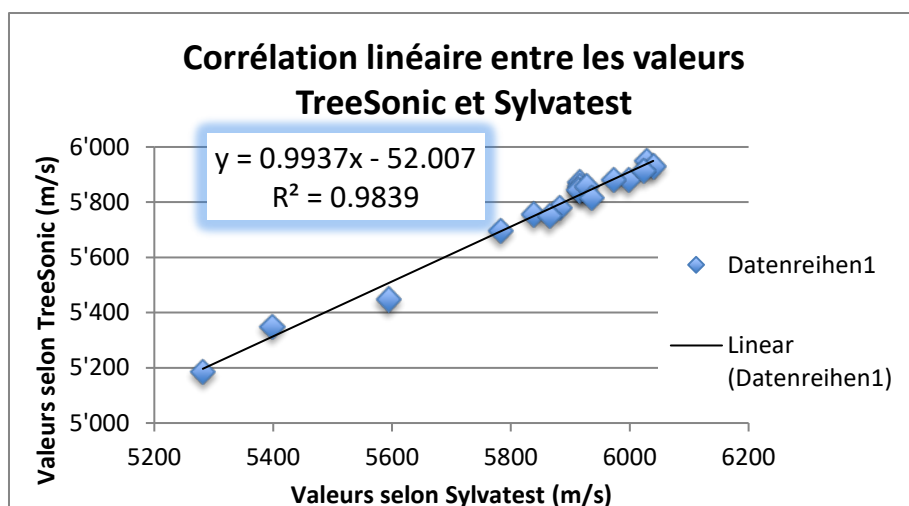


Figure 13 : Corrélation entre les vitesses de propagation du son dans les bille obtenues avec deux appareils de mesure (TreeSonic et Sylvatest).

Au moment de la mesure acoustique, l'hygrométrie (teneur en eau) avait été déterminée à l'aide d'une sonde électrique sur chacune des billes selon un protocole tenant compte de l'aubier et du bois parfait. Il s'est avéré que la teneur en eau moyenne (en %) n'a qu'une influence négligeable et imprécise ($R^2 = 0.21$) sur la vitesse du son dans les billes (Fig. 14).

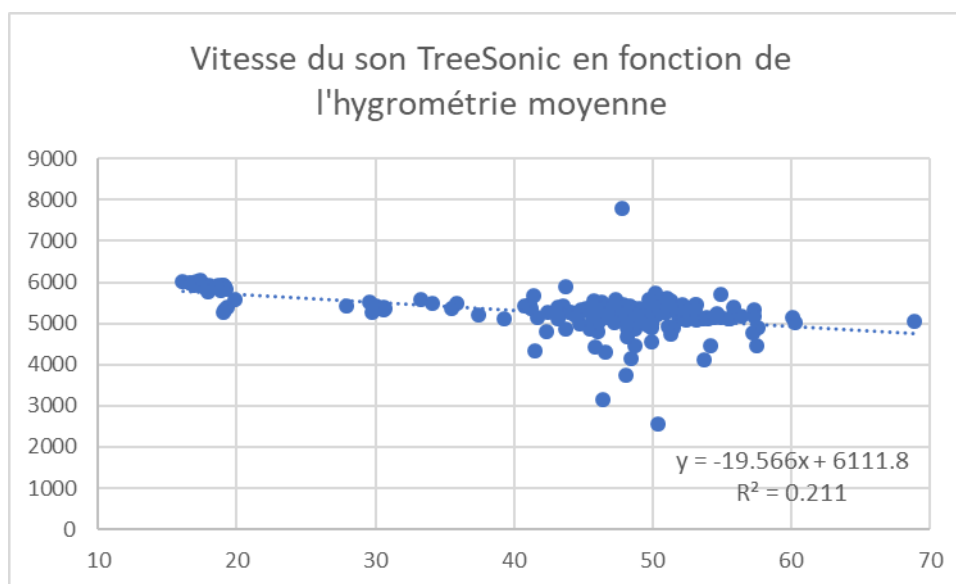


Figure 14 : Vitesse du son selon TreeSonic (m/s, en ordonnées) en fonction de la teneur en eau moyenne des billes en % (en abscisses).

Alors que les deux appareils utilisés sur le terrain donnent des résultats presque identiques, ils ne permettent pas de prédire les propriétés acoustiques effectives mesurées en laboratoire sur les échantillons présentant une structure de cernes fine tirés de ces arbres (Fig. 15). En effet, le coefficient de détermination reliant ces deux méthodes de mesure est très bas : valeur de $R^2 = 0.11$ seulement.

Vitesse du son dans échantillons de laboratoire en fonction de la valeur de terrain (TreeSonic)

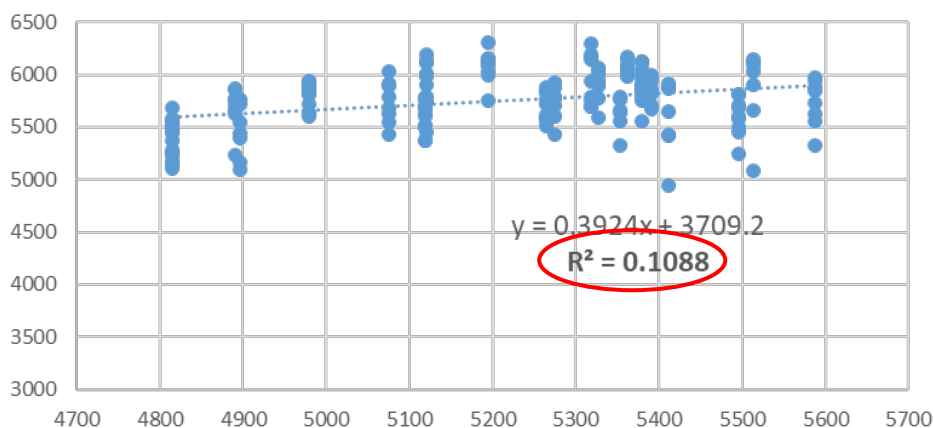


Figure 15 : Vitesse de propagation du son déterminée en laboratoire (Ultrasonic Tester BPV Steinkamp) en fonction des valeurs obtenues dans le terrain (TreeSonic).

% de Bois final, Densité et Quotient de Résonance

Le critère visuel « % de bois final » est un meilleur critère d'estimation du quotient de résonance que la largeur de cernes (Fig. 16). C'est surtout sa combinaison avec le critère physique « densité » qui permet d'estimer le quotient de résonance avec une fiabilité presque doublée (voir coefficients de détermination R^2) (Fig. 17).

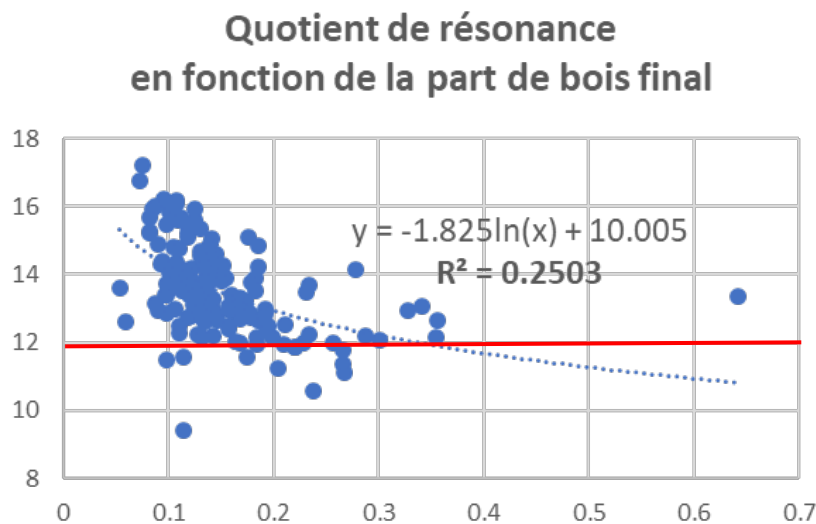


Figure 16 : Distribution du quotient de résonance en fonction de la part de bois final.

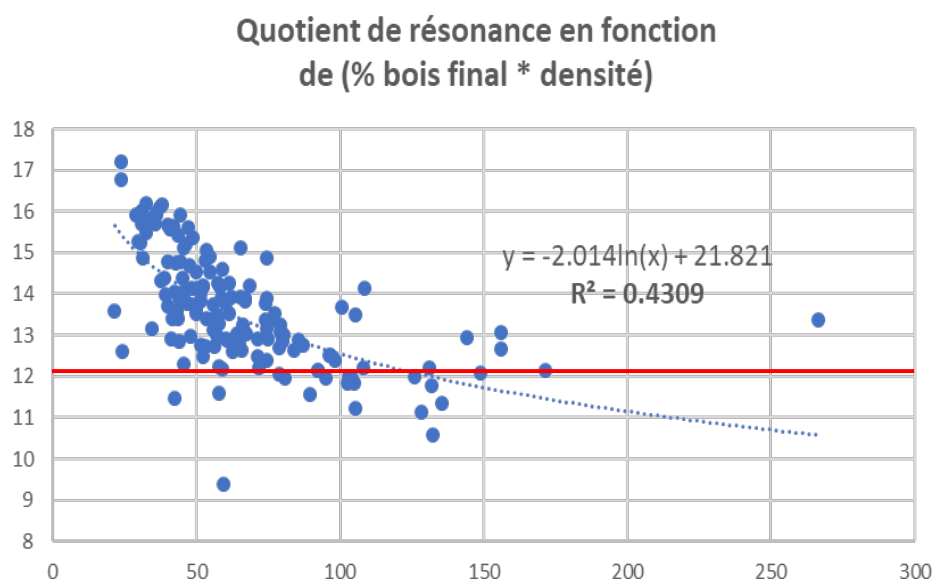


Figure 17 : Distribution du quotient de résonance en fonction de la part de bois final multipliée par la densité.

Un autre indicateur pour le quotient de résonance est le critère mécanique « résistance à la flexion » (Fig. 18). Le coefficient de détermination R^2 est ici inférieur au précédent (Fig. 17). Les échantillons présentant une résistance à la flexion inférieure à 75 N/mm² ont pratiquement tous un quotient de résonance supérieur à 12. Les valeurs de résistance à la flexion correspondent à celles présentées par Buksnowitz et Teischinger (2007) pour des bois de lutherie sélectionnés, oscillant entre 57.8 et 100.5 N/mm². Il faut relever que la détermination de la résistance à la flexion nécessite un échantillon de 30 cm de longueur et un équipement technique beaucoup plus lourd que pour l'analyse des cernes et la détermination de la densité.

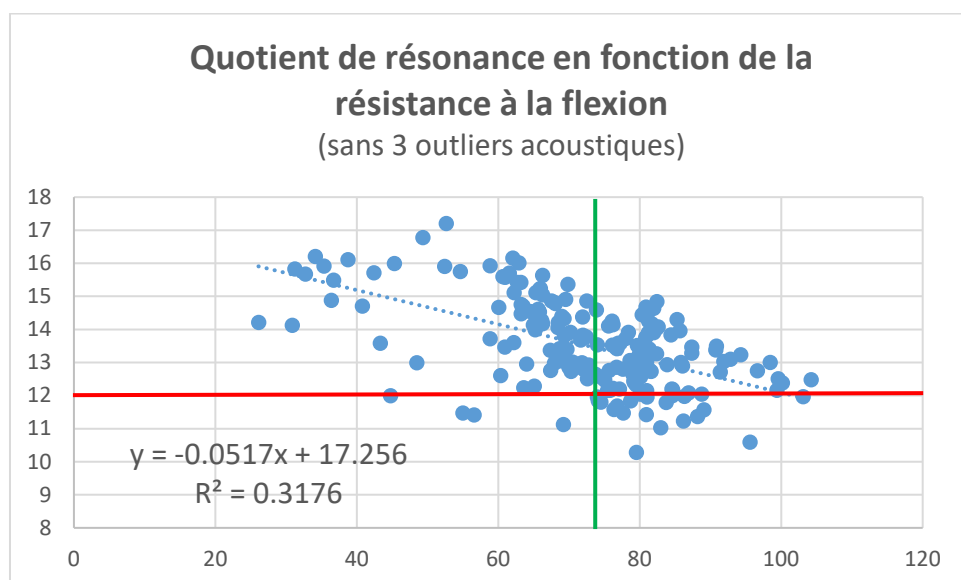


Figure 18 : Distribution du quotient de résonance en fonction de la résistance à la flexion (N/mm²). Le seuil de 75 N/mm² est marqué ici en vert.

Des quotients de résonance élevés (> 12) sont à observer dans toutes les catégories de classification de billes issus de zones aptes à fournir des bois de lutherie dans l'arc jurassien (Fig. 19).

Ceci justifie la pratique de l'élagage dans le but de réduire la nodosité de tiges susceptibles de fournir dans le futur des bois de haute qualité (BHQ) et de résonance (BR).

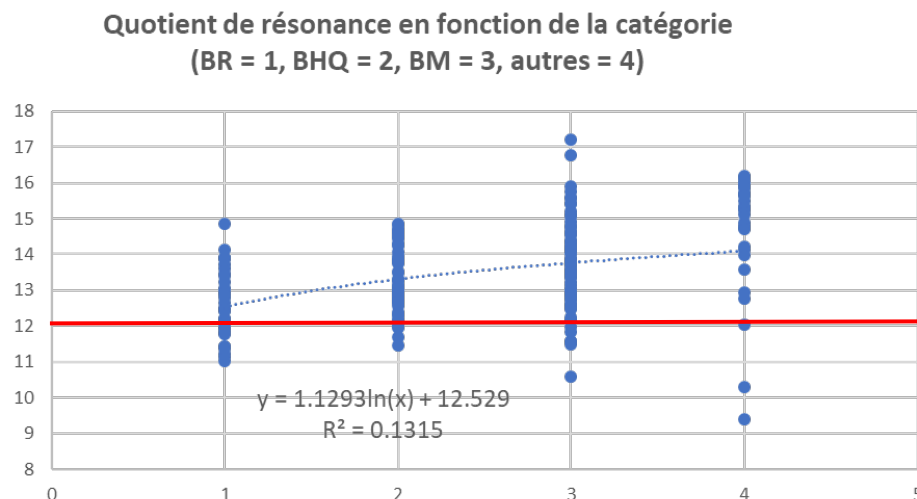


Figure 19 : Niveau du quotient de résonance selon les classements des bois dans le terrain.

Influence des conditions de croissance sur les propriétés du bois

Altitude

Pour l'ensemble des prélèvements d'échantillons, correspondant à la carte initiale ou hors-carte, l'altitude moyenne était de 1125 m (Fig.20). Les 2 classes centrales, de 1063 m à 1239 m, regroupent 58 % des cas. L'intervalle entre 975 m et 1327 m comprend, quant à lui, 76 % des cas. Il est à noter que la zone altitudinale de 799 m à 975 m a livré 14 % des arbres.

Interprétation : Cette distribution des altitudes où poussaient des candidats « Bois de haute qualité / bois de résonance » correspond donc plutôt aux indications formulées par Zieger (1960) pour les forêts de Bohême, de Haute-Bavière et des Carpathes, avec l'altitude de 700 m comme limite inférieure. Le choix de bois de résonance provenant des Grisons et analysés par Sonderegger et al. (2008) venait de zones sises entre 1000 et 1600 m. Dans leur étude, les auteurs formulent la règle générale que les bois de résonance ne se trouvent qu'à des altitudes dépassant les 1000 m, ce qui garantit des périodes de végétation courtes induisant des cernes étroits. Niemz (2018) cite également cette altitude inférieure limite de 1000 m.

Du point de vue du critère altitudinal, les massifs forestiers des hauteurs jurassiennes offrent leur potentiel de bois de haute qualité, et en particulier de résonance, déjà à partir de 800 m environ et ce jusqu'à une altitude de 1400 m. Des billes de l'étude classées visuellement comme « bois de résonance » avaient en effet été trouvées à partir de l'altitude de 850 m environ.

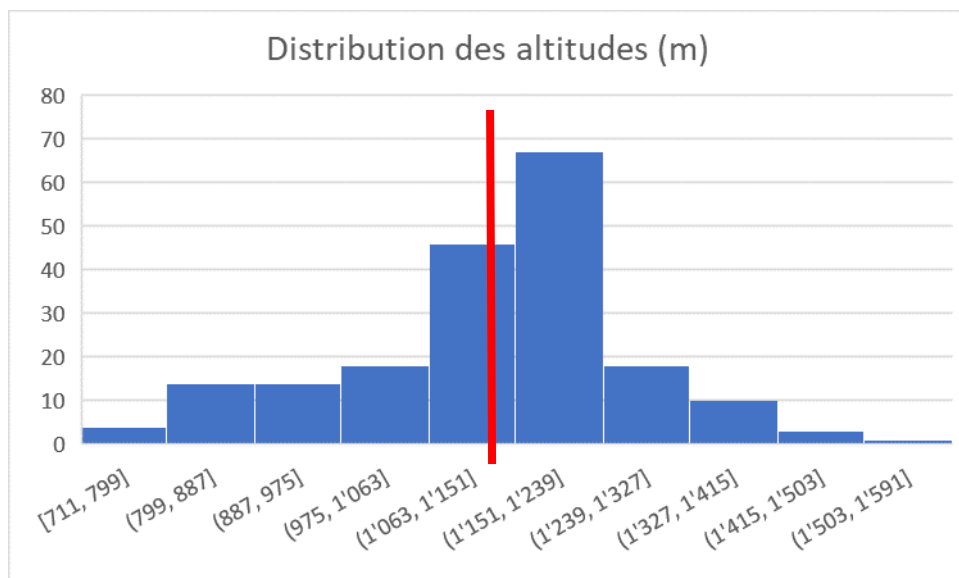


Figure 20 : Distribution des altitudes d'où proviennent les bois de cette étude

Pour le matériel testé dans cette étude, l'effet de l'altitude sur la densité n'est que faiblement décelable ($R^2 = 0.10$)

Influence de la position le long de l'axe Ouest (océanique) - Est (continental)

L'analyse de la largeur des cernes en fonction de l'emplacement des arbres selon un axe Ouest (océanique) - Est (continental) donne une très faible corrélation ($R^2 = 0.17$). Ceci est dû avant tout à la différence d'altitude. Les sites vaudois sont plus élevés que les neuchâtelois, les premiers ayant de ce fait des cernes légèrement plus étroits.

Exposition

Aucune tendance claire ne se dégage de l'étude de l'exposition (définition : voir Rapport S. Jacot) comme facteur d'influence sur les structures ou les propriétés des bois étudiés dans le cadre de cette étude.

Niveau thermique

Aucune tendance statistiquement significative ne se dégage de l'étude du Niveau thermique (définition : voir Rapport S. Jacot) comme facteur d'influence sur les structures ou les propriétés des bois étudiés dans le cadre de cette étude. Seule à mentionner est une légère augmentation de la densité en fonction d'un niveau thermique croissant ($R^2 = 0.10$) (Fig.21).

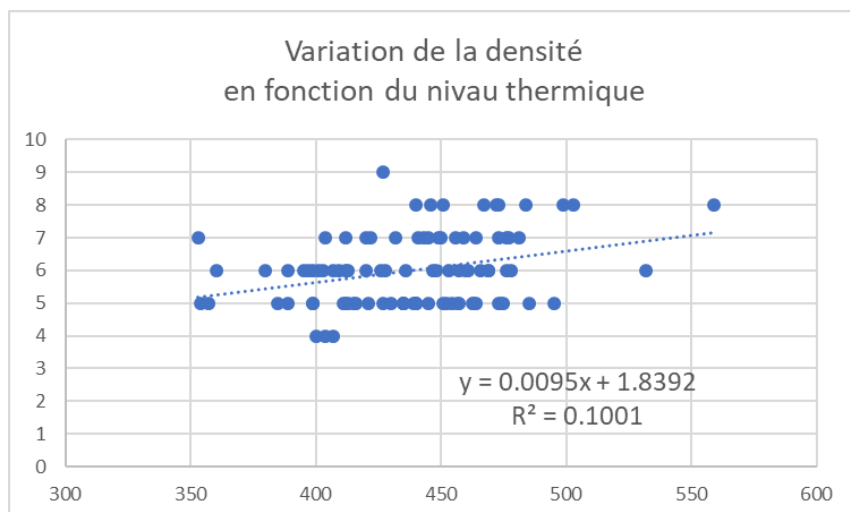


Figure 21 : Distribution des densités des bois en fonction du niveau thermique.

Topographie

Aucune tendance claire ne se dégage de l'étude de la topographie (définition : voir Rapport S. Jacot) comme facteur d'influence sur les structures ou les propriétés des bois étudiés dans le cadre de cette étude.

Pente

Les pentes locales (définition : voir Rapport S. Jacot) les plus fréquentes caractérisant l'emplacement des arbres choisis dans cette étude sont du type 1, 2 et 3, c'est-à-dire entre 10 et 40 %. Ceci relativise la règle que les bois de haute qualité (et en particulier de résonance) croîtraient en particulier sur des topographies localement planes.

Type de sol

Aucune tendance claire ne se dégage de l'étude du type de sol (définition : voir Rapport S. Jacot) comme facteur d'influence sur les structures ou les propriétés des bois étudiés dans le cadre de cette étude.

Profondeur du sol

Aucune tendance claire ne se dégage de l'étude de la profondeur du sol (définition : voir Rapport S. Jacot) comme facteur d'influence sur les structures ou les propriétés des bois étudiés dans le cadre de cette étude.

Association végétale

Aucune tendance claire ne se dégage de l'étude de l'association végétale (définition : voir Rapport S. Jacot) comme facteur d'influence sur les structures ou les propriétés des bois étudiés dans le cadre de cette étude.

Hauteur de l'arbre

La hauteur moyenne des arbres à la base de cette étude est de 35.4 m. Une part importante de 78% est comprise entre les valeurs de 31 m et 42 m. Ceci permet de déduire que des bois de haute qualité sont fournis par des arbres de taille relativement importante (Fig. 22). La taille de l'arbre n'a dans cette étude pratiquement aucune influence sur la largeur des cernes.

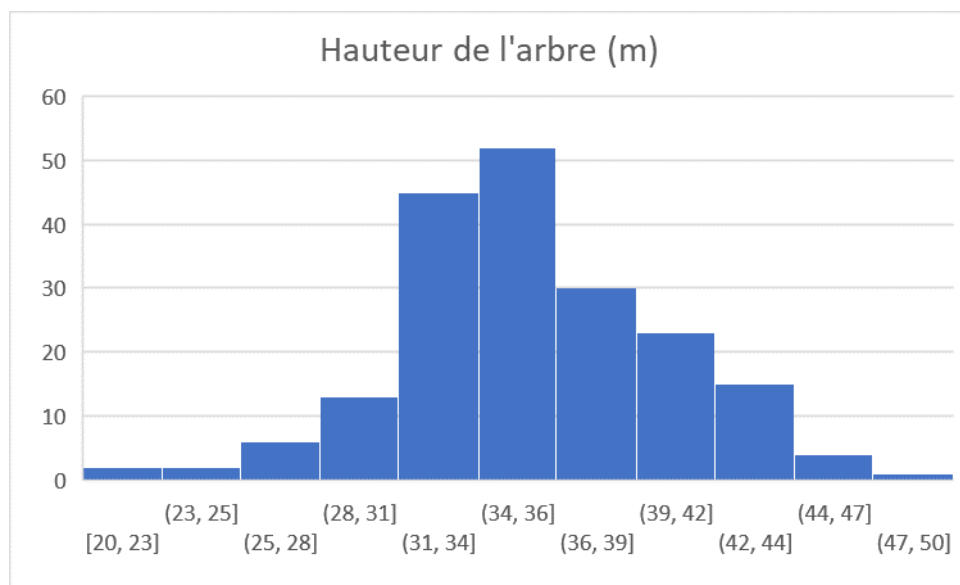


Figure 22 : Distribution des hauteurs d'arbres d'où proviennent les bois de cette étude.

Niveau bas de la couronne

76 % des arbres de cette étude ont le bas de la couronne placé entre 7 m et 18 m. Aucun effet notable n'a été trouvé, ni sur la structure des cernes, ni sur la densité du bois.

Longueur de la couronne

65 % des arbres de cette étude ont une longueur de couronne entre 19 m et 26 m. Aucun effet notable n'a été trouvé, ni sur la structure des cernes, ni sur la densité du bois.

Surface terrière de la cellule d'influence

La valeur moyenne de la surface terrière selon Bitterlich est de 24.09 m²/ha. Une part de 54 % des arbres de cette étude provient de peuplements à surface terrière comprise entre 18 et 28 m²/ha. Aucun effet de ce critère n'a été décelé, ni sur la structure des cernes, ni sur la densité du bois.

Pour les cellules d'influence plus proches, la surface terrière moyenne est de 27.03 m²/ha, 78% des sites ayant des surfaces terrières sises entre 10 et 44 m²/ha. A ce niveau non plus, aucun effet de ce critère n'a été décelé, ni sur la structure des cernes, ni sur la densité du bois.

La Figure 23 illustre la distribution de la surface terrière totale de la cellule d'influence, ajoutant aux arbres vivants ceux dont la souche est encore visible, ce qui caractérise la densité du peuplement lors de la décennie (éventuellement plus) précédent le moment présent, influençant la dynamique de croissance des arbres. La surface terrière totale moyenne est alors de 39.04 m²/ha, 77% des sites ayant des surfaces terrières totales sises entre 22 et 66 m²/ha. Par ce critère plus global non plus, aucun effet n'a été décelé, ni sur la structure des cernes, ni sur la densité du bois. Le point d'inflexion correspond à une structure normale en futaie jardinée ; une surface terrière de 55 m²/ha est un premier indice de fermeture du peuplement, alors qu'au-delà de 66 m² / ha, nous avons à faire à une forêt fermée.

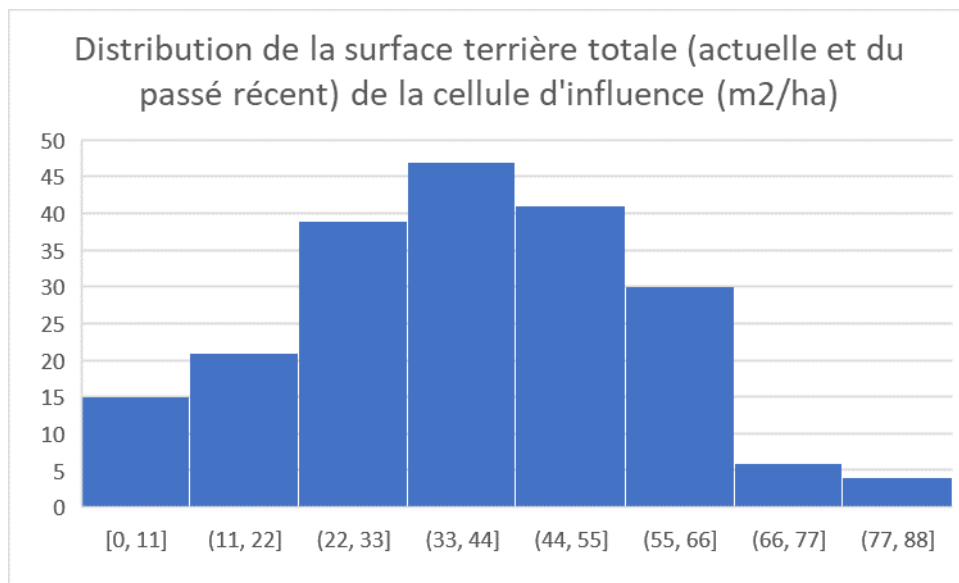


Figure 23 : Distribution des surfaces terrières totales (actuelles et du passé récent ayant laissé des souches visibles) d'où proviennent les bois de cette étude.

Nombre de tiges de la cellule d'influence

Le nombre de tiges (actuel et du passé récent dont il reste des souches) par cellule d'influence le plus fréquent est situé entre 440 et 550 tiges par hectare (Fig. 24). Une part de 77 % des arbres de cette étude provient de peuplements à nombre de tiges situé entre 220 et 660 tiges par hectare. Aucun effet de ce critère n'a été décelé, ni sur la structure des cernes, ni sur la densité du bois.

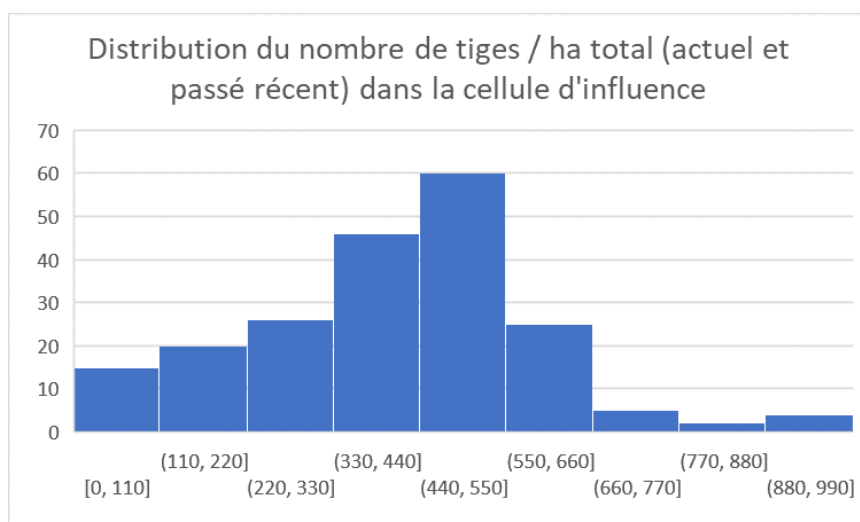


Figure 24 : Distribution du nombre de tiges par hectare total (actuel et du passé récent ayant laissé des souches visibles) d'où proviennent les bois de cette étude.

Volume de la cellule d'influence

Le volume sur pied (actuel et du passé récent dont il reste des souches) par cellule d'influence le plus fréquent est situé entre 429 et 549 sylves par hectare (Fig. 25). Une part importante de 90 % des arbres de cette étude provient de peuplements à nombre de tiges situé entre 189 et 789 sylves par hectare, et ceci de façon presque équivalente. Aucun effet de ce critère n'a été décelé, ni sur la structure des cernes, ni sur la densité du bois.

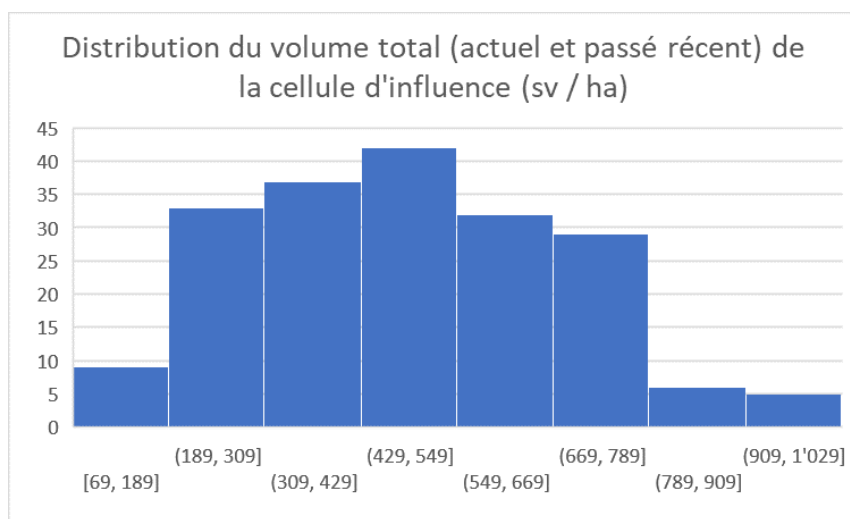


Figure 25 : Distribution du volume total (actuel et du passé récent ayant laissé des souches visibles) d'où proviennent les bois de cette étude.

Coefficient de concurrence pour la lumière (Sfac 55)

Comme l'illustre la Figure 26, la grande majorité (76 %) des arbres de cette étude ont une couronne non influencée par les arbres voisins selon le critère « Sfac 55 » (voir Rapport S. Jacot). Dans 22 % des cas, 1 arbre seulement est situé dans le cône d'influence. Seuls 2 % des cas y comptent 2 arbres. Ceci illustre que les arbres

sélectionnés pour cette étude en raison de leurs critères visuels du bois font clairement partie de la strate dominante.

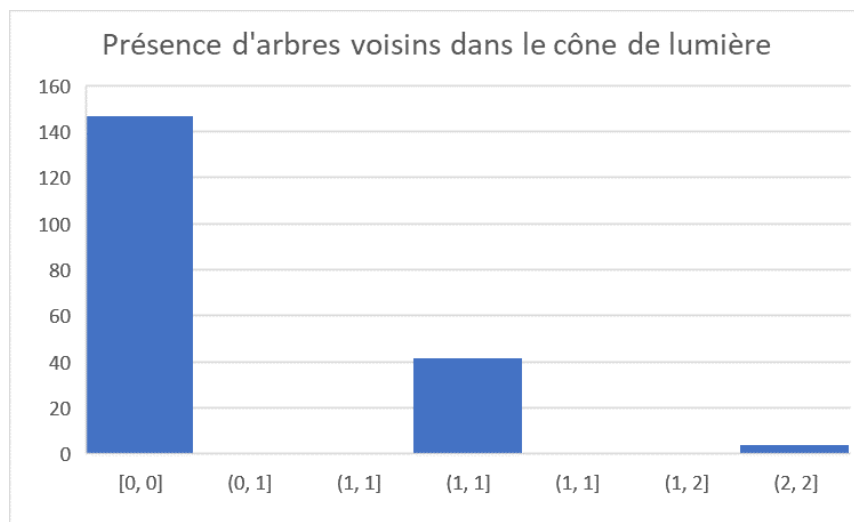


Figure 26 : Situation de concurrence des arbres d'où proviennent les bois de cette étude. 0 = aucun arbre dans le cône d'influence / 1 = 1 arbre / 2 = 2 arbres.

Forme des branches

Aucune tendance claire ne se dégage de la distinction entre branches étalées (97 %) et branches tombantes et recourbées à leurs extrémités (3 %). Ceci ne confirme ni n'infirme néanmoins pas l'observation souvent faite selon laquelle les bois de résonance les meilleurs proviendraient d'arbres aux couronnes tombantes, enveloppant le fût.

Composition de peuplement

La composition du peuplement exprimée par la part de résineux (majoritairement l'épicéa) par rapport aux feuillus n'exerce pas d'influence sur les structures ou propriétés des bois d'épicéa étudiés.

Quelques conclusions essentielles

- Les valeurs du quotient de résonance (critère qualitatif principal pour les bois de lutherie, pianos, harpes, etc) sont dans l'ensemble excellentes, la plupart étant supérieures à 12 (pour 193 échantillons). Ceci est équivalent, si ce n'est supérieur aux valeurs rapportées pour les Grisons et l'Italie (Paneveggio).
- Les bois les plus appréciés possèdent à la fois une haute vitesse de propagation du son, tout en étant de faible densité, clairement en-dessous de la valeur moyenne pour l'Epicéa (470 kg/m³). Autant pour le critère Quotient de Résonance que pour le critère Basse densité, les valeurs obtenues dans le Projet Bois de Haute Qualité ont une distribution remarquable.
- Alors que les deux appareils utilisés sur le terrain donnent des résultats presque identiques, ils ne permettent pas de prédire les propriétés acous-

tiques effectives mesurées en laboratoire sur les échantillons présentant une structure de cernes fine tirés de ces arbres (valeur R^2 très basse).

- Par contre, le critère visuel « % de bois final » permet de prédire de manière relativement fiable le quotient de résonance. C'est surtout sa combinaison avec le critère physique « densité » qui permet d'estimer ce quotient de résonance avec une fiabilité presque doublée (voir coeff. de détermination R^2).
- Des quotients de résonance élevés (> 12) sont à observer dans toutes les catégories de classification de billes issus de zones aptes à fournir des bois de lutherie dans l'arc jurassien. Ceci justifie la pratique de l'élagage dans le but de réduire la nodosité de tiges susceptibles de fournir dans le futur des bois de haute qualité (BHQ) et de résonance (BR).
- L'analyse de la structure et de la composition des peuplements laisse apparaître une grande plasticité pour ce qui est de l'obtention de bois de haute qualité, resp. de résonance. Cette analyse, effectuée critère par critère, ne montra que peu ou pas d'effet sur les structures et propriétés des bois pré-sélectionnés dans les parterres de coupe. Il est peu probable qu'une analyse multifactorielle n'apporte plus de clarté.
- La règle souvent énoncée selon laquelle les bois de résonance ne se trouveraient que dans des forêts sises à une altitude supérieure à 1000 m est clairement invalidée ici. En effet, des billes de qualité « bois de résonance » ont pu être récoltées dès 850 m déjà.

Bibliographie

Buksnowitz, C., Teischinger, A., Müller, U., Pahler, A. et Evans R. (2006): Resonance wood [Picea abies (L.) Karst.]--evaluation and prediction of violin makers' quality-grading. J Acoust Soc Am. 2007 Apr;121(4):2384-95.

Lavarini, B. (2018): L'avis du laboratoire sur la qualité des bois de résonance du Domaine. Dans : Chronique du Domaine des Cottards. Edition à compte d'auteur.

Niemz, P. (2018): Fichten-Klangholz aus dem Schweizer Jura. Holz-Zentralblatt Nr. 33 (17.August 2018).

Niemz, P., Sonderegger, W. (2017) : Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Hanser-Verlag, Leipzig.

Sonderegger, W., Alter, P., Niemz, P. (2008): Untersuchungen zu ausgewählten Eigenschaften von Fichtenklangholz aus Graubünden. Holz als Roh- und Werkstoff (European journal of wood and wood products), 66(5): 345 – 354.

TGL 15799/12, (1982): "Fachbereichstandard der DDR. Rohholz, Bootsbaumholz, Zündwarenholz," ("Standard of the DDR").

Ziegenhals, G. (2001): "Resonanzholzmerkmale von Gitarrendecken," ("Resonance wood properties"), Fachausschuss Musikalische Akustik in der DEGA, Sept. 2001, 20-23.

Zieger, E. (1960) : Untersuchungen über äussere Merkmale, Holzeigenschaften und forstgeographische Vorkommen der Resonanzqualitätsorten bei Fichte und einigen anderen Holzarten. Mitteilungen aus der Staatsforstverwaltung Bayerns 31, p. 285-298 (selon note sur l'article rédigée par M. J.-Ph. Schütz).