

Impact des éclaircies tardives sur le risque de roulures dans les taillis de châtaignier

TELECHARGEMENT GRATUIT SUR LE SITE

www.foretpriveefrancaise.com

Cousseau Guillaume

Etudiant FIF-ENGREF 2003-2006 (14^{ème} promotion)



Stage encadré par le FOGEFOR de référence de l'Aisne, le SUF-IDF, le Groupe de Travail National Châtaignier

Projet réalisé en 2006 avec la collaboration de

Tables des matières

Introduction.....	5
-------------------	---

Partie A – Le Châtaignier : une essence singulière

1- L'histoire du châtaignier	7
2- L'autécologie du châtaignier	8
3- Les propriétés du bois	9
4- La sylviculture du châtaignier.....	9
5- La ressource actuelle en châtaignier	10
6- Les utilisations du bois	11
7- L'évolution du prix moyen du bois sur pied depuis les années 1990	11
8- Le marché du châtaignier	12
9- Conclusion	12

Partie B – La roulure du châtaignier – Etat de l'art

1- Qu'est-ce que la roulure ?.....	14
1.1- Les roulures traumatiques.....	14
1.2- Les roulures saines	15
2- La distribution de la roulure	16
2.1- La répartition géographique de la roulure	16
2.2- La répartition de la roulure au sein des peuplements	16
2.3- La répartition de la roulure au sein de l'arbre	19
2.4- La répartition de la roulure en fonction des propriétés physiques et de la structure anatomique des cernes.....	21
2.5- La distribution de la roulure en fonction de la station.....	23
3- Pourquoi observe-t-on autant de roulures chez le châtaignier ?	23
3.1- Principes généraux.....	23
3.2- Une faible cohésion mécanique.....	24
3.3- Les contraintes internes	28
4- Conclusion	30

Partie C – Compléments de bibliographie

1- L'étude de la roulure en Limousin de C. Riboulet et de l'IDF.....	33
2- L'étude de la roulure en Bretagne de G. Pichard.....	34
3- La roulure et les propriétés mécaniques	35
4- Bilan	36



Partie D – Problématique et méthodologie

1- Problématique et objectifs de l'étude	41
2- La stratégie d'échantillonnage	42
2.1- La zone d'étude	43
2.2- Les peuplements retenus : 14 couples et 5 placettes	43
2.3- Description des placettes étudiées	44
2.4- Validité de l'échantillonnage.....	45
2.5- Les limites de l'échantillonnage	46
3- La protocole	47
3.1- Principes généraux.....	47
3.2- Les mesures avant abattage	47
3.3- Désignation et abattage des tiges.....	47
3.4- Cubage et purge	48
3.5- Mesures des rondelles.....	48
3.6- Les limites du protocole	49
4- Jeu de données disponibles	50
5- Traitement des données	51
5.1 -Détermination de l'indice trophique et hydrique de la station	51
5.2- Traitements statistiques	51
5.3- Evaluation financière.....	52
5.4- Présentation des résultats.....	52

Partie E – Les résultats

1- Les facteurs pré-disposants la roulure	54
1.1- Les facteurs stationnels.....	54
1.2- L'influence des paramètres dendrométriques.....	56
2- Quelle est l'influence de la sylviculture ?	59
2.1- Description du jeu de données.....	59
2.2- L'impact des éclaircies sur le risque de roulure	60
2.3- L'impact des éclaircies sur le risque de roulure par catégorie d'âge et de fertilité.....	61
2.4- Conclusion et discussion	62

3. En quoi l'éclaircie peut elle engendrer une augmentation du risque de roulure ?.....	63
3.1- L'accroissement courant avant l'éclaircie et la roulure.....	63
3.2- L'accroissement courant après éclairci et la roulure	64
3.3- L'à-coup de croissance et la roulure.....	65
3.4- Conclusions et discussion.....	66
4- La distribution de la roulure	69
4.1- La répartition de la roulure en fonction du statut social de l'arbre	69
4.2- Distribution de la roulure dans le sens longitudinal	70
4.3- La distribution de la roulure dans le sens axial-tangentiel	73
4.4- Discussion.....	77
5- Les outils d'évaluation de la roulure	82
5.1- Modèle de prévision de la roulure	82
5.2- Les outils d'évaluation de perte financière.....	85
5.3- Bilan	87
5.4- Conclusions et discussion.....	89
6- Quelle(s) sylviculture(s) pour éviter l'augmentation du risque de roulure ?.....	91
6.1- Comment éviter l'augmentation du taux de roulure après l'éclaircie ?.....	91
6.2- La surface terrière : un indicateur sylvicole permettant de mesurer la concurrence	92
6.3- Quelle est la densité maximale à ne pas dépasser pour une circonférence donnée	92
6.4- Après l'éclaircie, de combien de temps dispose-t-on avant que le couvert se referme ?	93
6.5- Une éclaircie ? mais pour quels types de produits ?.....	95
6.6- Bilan	96
7- La rentabilité de la sylviculture.....	97
7.1- Les préalables à l'évaluation de la rentabilité	97
7.2- Rentabilité financière d'un peuplement non éclairci.....	99
7.3- Rentabilité financière d'un peuplement éclairci.....	99
7.4- Bilan	103

Partie F – Existe-t-il des outils permettant d'évaluer le risque de roulure dans l'arbre sur pied ?

1- Contexte et problématique.....	105
2- Les connaissances acquises	105
3- Existe-t-il d'autres outils ?	106
4- Stratégie d'échantillonnage	107
5- Tests des outils : le marteau à impulsion.....	108
5.1- Principes de la méthode.....	108
5.2- Méthodologie.....	109
5.3- Résultats et discussion	110
5.4- Les autres usages expérimentaux du marteau	117
5.5- Conclusions et prolongement	118
6- Le diagnostic à l'oreille	119
6.1- Avant propos	119
6.2- Résultats	119
6.3- Conclusion et discussion	121
7- Le résistographe.....	122
7.1- Principe de l'appareil.....	122
7.2- Problématique.....	123
7.3- Méthodologie.....	123
7.4- Lecture des profils résistographiques	123
7.5- Etalonnage de l'appareil	124
7.6- Résultats : Etude de cas	126
7.7- Les limites de l'appareil	129
7.8- Conclusions et discussion.....	130
Conclusion	131
Bibliographie	133
Listes des figures et des tableaux.....	139

Introduction

Le châtaignier... nous connaissons tous cet arbre pour le plaisir que nous offre ses fruits en automne. Seulement, on ignore que, loin d'être anecdotique, cette essence recouvre plus de 900 000 ha de nos forêts et constitue la **troisième essence feuillue française**. Après avoir atteint son apogée au milieu du 18^{ème} siècle pour son fruit, le châtaignier tomba dans l'obsolescence et l'oubli durant le 20^{ème} siècle.

Cet arbre connaît un formidable **essor depuis deux décennies**. Cette fois-ci, **c'est à son bois que l'on s'intéresse**. Comme une revanche au mépris parfois porté à son égard, on en vient aujourd'hui à le **qualifier de feuillus précieux**. La durabilité du bois, la vitesse de croissance, une sylviculture simple... sont ses principaux atouts. Bref, c'est une essence **prometteuse** et, sans conteste, **d'avenir**.

Seulement, le châtaignier se fait aussi remarquer pour sa sensibilité à la **roulure**. La roulure est une fente tangentielle se propageant dans le bois à une hauteur plus ou moins variable le rendant bien souvent inutilisable. La perte induite par ce défaut peut être parfois substantielle.

A ce jour, malgré l'avancée de nos connaissances à son sujet grâce à un programme de recherches lancé en 1980, les réponses sont partielles. C'est un phénomène variable et multifactoriel. **Il est difficile d'intégrer le risque de roulure à la sylviculture**.

L'objet de la présente étude est de tenter de combler ce manque : **Quel est l'impact des éclaircies sur le risque de roulure ?**

Afin d'apporter une réponse argumentée et cohérente à cette problématique, le présent rapport s'articule de la façon suivante :

- **Partie A – Le Châtaignier, une essence singulière** : les principales caractéristiques du châtaignier sont présentées.
- **Partie B – La roulure du châtaignier – Etat de l'art** : Un bilan critique des connaissances acquises à son sujet est réalisé.
- **Partie C – Compléments de bibliographie** : Le présent rapport synthétise les résultats des trois nouvelles études auxquelles nous avons pris part.
- **Partie D – Problématique et méthodologie**
- **Partie E – Les résultats** : les principales réponses apportées à la problématique sont présentées et discutées.
- **Partie F – Existe-t-il des outils permettant d'évaluer le risque de roulure dans l'arbre sur pied ?** C'est un prolongement méthodologique aux résultats surprenants.

Ce travail est piloté depuis juin 2005 par le groupe de travail châtaignier présidé par M. René Lempire. Jean Lemaire, ingénieur forestier au SUF-IDF, a assuré le suivi et l'appui technique de l'étude.

Partie A

Le Châtaignier

une essence singulière

Le châtaignier est la troisième essence feuillue française. Il occupe près de 920 000 ha, dont 900 000 en forêts privées, et recouvre environ deux millions d'hectares en Europe, répartis entre l'Italie, l'Espagne ou bien encore le Portugal. En plus de disposer de la moitié de la ressource européenne, la France bénéficie des stations les plus favorables à la production de bois de châtaignier de qualité. Qualités...elles sont nombreuses chez cette essence... notons seulement ses propriétés technologiques, sa durabilité, son aspect esthétique ou bien encore sa vitesse de croissance Dans de nombreuses régions, cette essence constitue aussi une richesse patrimoniale et est le symbole d'une identité culturelle.

Fort de ces atouts, le châtaignier est sans conteste un feuillu précieux et d'avenir.

Longtemps considéré comme l'arbre du pauvre, le châtaignier est réhabilité depuis la fin des années 70. En effet de l'"arbre à pain" le châtaignier est également devenu l'"arbre à bois". Destiné à la production fruitière, on découvre et on invente aujourd'hui sa sylviculture.

1- L'histoire du châtaignier

Le pollen de notre châtaignier actuel, *Catanea sativa* Mill., fut retrouvé dans les dépôts sédimentaires de l'ère tertiaire. Lors des glaciations, il disparut des régions du nord de l'Europe et migra vers le sud. Le climat redevenant favorable à la fin du quaternaire, il regagna progressivement une partie de son aire potentielle (Bourgeois, 1992).

Mais, tout nous laisse à penser que le châtaignier, comme les fruitiers, était dispersé. Le développement des activités anthropiques dès l'antiquité expliquerait sa large distribution actuelle.

La culture du châtaignier fut transmise très certainement du Proche-Orient par les grecs et les romains. Il est probable que ces derniers l'apportèrent en Gaule en même tant que la culture viticole.

Mais, c'est au Moyen-Age, grâce aux moines, que le châtaignier connaît une première phase d'extension à la faveur à nouveau de l'extension de la vigne.

Une seconde phase de plantation se fit sur d'importantes surfaces au 16^{ème} et 17^{ème} siècles. Ces vergers ont permis d'assurer la subsistance de la population rurale en attendant les progrès décisifs du 19^{ème} et du 20^{ème} siècle (cf. Figure n°1).

Les vergers de châtaignier déclinent à partir du 18^{ème} siècle dans les différentes régions castanéicoles (cf. Figure n°2). En 150 ans, les vergers de châtaigniers, occupant alors une place majeure dans le paysage et dans l'économie locale, sont devenus anecdotiques (environ 10 000 ha). Les causes de cette régression sont multiples : l'arrivée de nouvelles cultures vivrières, le développement des voies de communication permettant le négoce de la chaux, le développement de cultures commerciales (l'olivier par exemple).

La diminution de la surface de vergers destinés à la production fruitière se poursuit par l'avènement de l'industrie au milieu du 18^{ème} siècle. L'industrie minière en plein développement réclame des bois de petit calibre. L'approvisionnement de nombreuses forges nécessite d'énormes quantités de bois de chauffage. Enfin, en 1860, un teinturier lyonnais met au point un procédé breveté pour extraire le tannin du bois de châtaignier.



Figure n°1 : Récolte de châtaignes en Italie en 1390-1400 (BNF)



Figure n°2 : Vergers de châtaigniers greffés, à Pouzauges en Vendée (85)

Au début du 20^{ème} siècle, le déclin du châtaignier s'accroît. La maladie de l'encre affecte une grande surface de châtaignier. Puis, à l'issue de la seconde guerre mondiale, les industries du tannin qui en 1954 consommaient encore 700 000 tonnes de châtaignier ont fermé tour à tour (Bourgeois et al, 2004).

Depuis le début des années 1980, le châtaignier connaît un **regain d'intérêt**. Cette fois-ci, c'est sa capacité à produire du bois d'œuvre qui intéresse. Sa sylviculture est inventée. Nombreux sont ceux qui travaillent aujourd'hui à sa reconnaissance comme essence noble.

2- L'autécologie du châtaignier

L'aire de répartition naturelle de *Castanea sativa* Mill. est difficile à connaître car les activités humaines ont profondément modifié sa distribution potentielle. Ainsi, il est parfois bien éloigné de son optimum écologique. Cette essence longtemps considérée comme frugale s'avère être exigeante pour assurer une croissance soutenue et la production de bois de qualité.

Sa répartition est circonscrite par l'hydromorphie et le calcaire présent dans la terre fine. En effet, le châtaignier est une essence calcifuge. Il ne supporte pas la présence d'hydromorphie à moins de 50 cm de profondeur. Bien qu'il puisse se développer sur une large gamme de sols, il est en situation optimale sur un sol brun d'au moins 50 cm prospectable, à texture limono-sableuse (LS), sablo-limoneuse (SL), dont le pH est compris entre 4,6 et 6.

Le châtaignier se répartit le long de la frange océanique et méditerranéenne. Le froid et la sécheresse estivale sont les principaux facteurs climatiques limitant son implantation. Il est intéressant de noter que sa distribution est inversement corrélée à celle du hêtre (*Fagus sylvatica*).

Le bilan hydrique est fondamental. Outre la valeur de la pluviométrie annuelle, c'est sa répartition durant la saison de végétation qui est déterminante sur le niveau de productivité du peuplement. Une période de sub-sécheresse (P=3T) diminue considérablement ses potentialités. La figure suivante fait état des besoins en eau en fonction des températures moyennes annuelles (cf. Figure n°3).

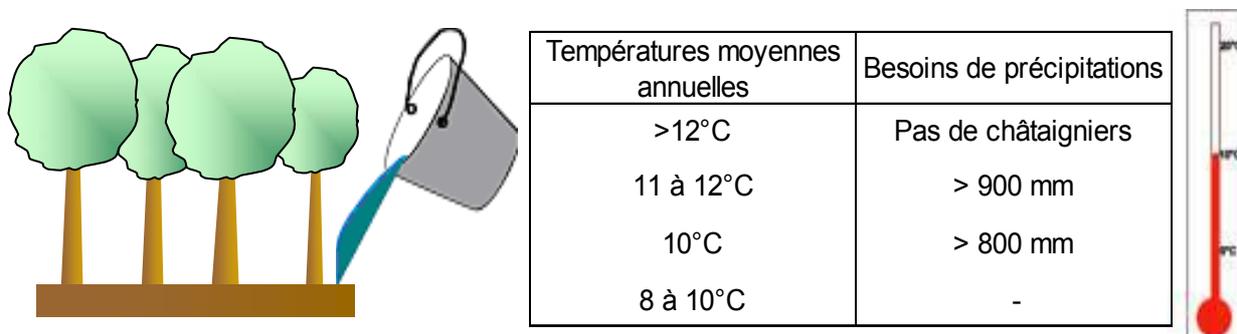


Figure n°3 : L'exigence autécologique de *Castanea sativa* (Lemaire, 2006, Communication personnelle)

La topographie (en mi-pente) ou bien encore l'exposition (nord) peuvent être des facteurs compensateurs.

Ces conditions sont nécessaires pour produire un châtaignier de qualité.

3- Les propriétés du bois

Les caractéristiques macroscopiques du châtaignier se rapprochent de celles du chêne.

Le châtaignier est une essence à **zone initiale poreuse**. La densité moyenne est comprise entre **600 et 700 kg/m³**.

Son principal atout réside dans sa **durabilité**. La forte concentration en **tannins** contenus dans le bois et la faible proportion d'aubier (3 à 7 cernes) le rendent résistant aux attaques biotiques (cf. Figure n°4).

Le châtaignier est une **essence fissile**. Sa résistance au fendage est deux fois inférieure à celle du chêne. Contrairement au chêne, **la maille¹ n'est pas visible**.

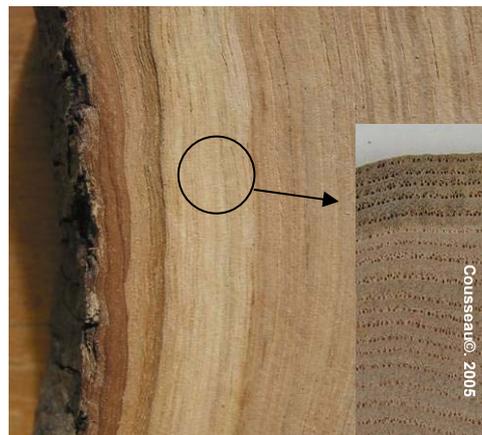


Figure n°4 : Une faible proportion d'aubier

4- La sylviculture du châtaignier

Sa **culture sylvicole est récente**. La sylviculture du châtaignier était quasi-inexistante avant 1980. Sous l'impulsion d'une poignée de propriétaires et de professionnels, le groupe de travail national châtaignier a vu le jour et œuvre depuis pour l'élaboration d'itinéraires sylvicoles pertinents à l'égard des exigences autoécologiques et économiques.

Le choix d'un scénario sylvicole est prédéterminé par les potentialités stationnelles évaluées à l'aide des indices de fertilité valides dans toute la France (cf. Figure n°5). Les peuplements dont la hauteur dominante² n'atteint pas 8 m à l'âge de 12 ans ne sont pas améliorables.

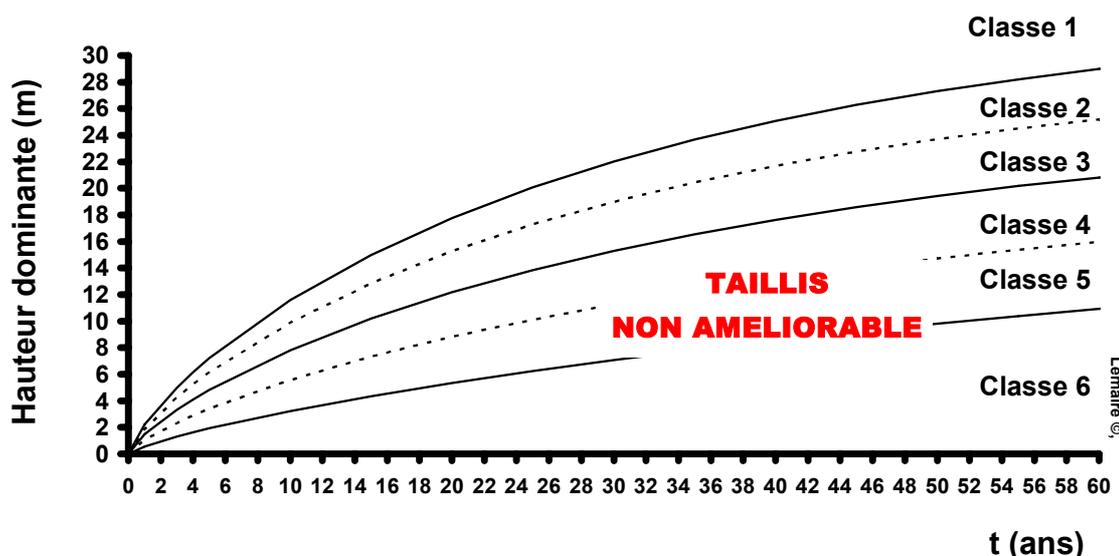


Figure n°5 : Les courbes de fertilité du châtaignier en France. (SUF-IDF, J. Lemaire, 2005, Stage Châtaignier, « le châtaignier dans tous ses états »)

¹ La maille : Terme utilisé pour désigner le figuré formé par les rayons ligneux orientés dans le sens radial.

² Hauteur dominante : Hauteur totale moyenne des 100 plus gros arbres à l'hectare.

Une fois les potentialités de croissance vérifiées, l'objectif assigné à la parcelle peut être défini : objectif "petits bois", objectif "bille", objectif "petite grume", objectif "grume". Les itinéraires sylvicoles sont quasi-semblables, seule la densité finale change.

Le châtaignier est une essence feuillue à **croissance rapide**. Suivant les régions et les usages, l'**âge optimal d'exploitabilité varie de 20 à 50 ans**. Pour les objectifs "petite grume" et objectif "grume", **deux ou trois passages en éclaircies sont conseillés**. Le premier passage, entre 8 et 15 ans, permet de réduire la densité entre 600 de 1000 tiges/ha. Le second entre 15 et 25 ans ramène le peuplement à densité finale : 500 à 800 tiges/ha pour l'objectif "petit bois", 200 à 400 tiges/ha pour l'objectif "grume".

5- La ressource actuelle en châtaignier

Le châtaignier occupe environ 2 millions d'hectares en Europe (cf. Figure n°6). La France et l'Italie constituent environ 85% du réservoir en châtaignier. Seule, **la France, en situation de monopole, possède 55% de la ressource**.

Le châtaignier couvre une surface **de 920 000 ha dont la moitié est conduite en taillis pur**. Les autres 450 000 ha correspondent au taillis des TSF. Il constitue la troisième essence feuillue. Plus de 60% de la châtaigneraie française se situe au sud de la France. L'Aquitaine, la région Midi-Pyrénées, la région Rhône-Alpes sont les premières régions castanéicoles.

Au-delà de cette ressource de près d'un million d'hectare, il est important d'évaluer son potentiel de production (cf. Figure n°6).

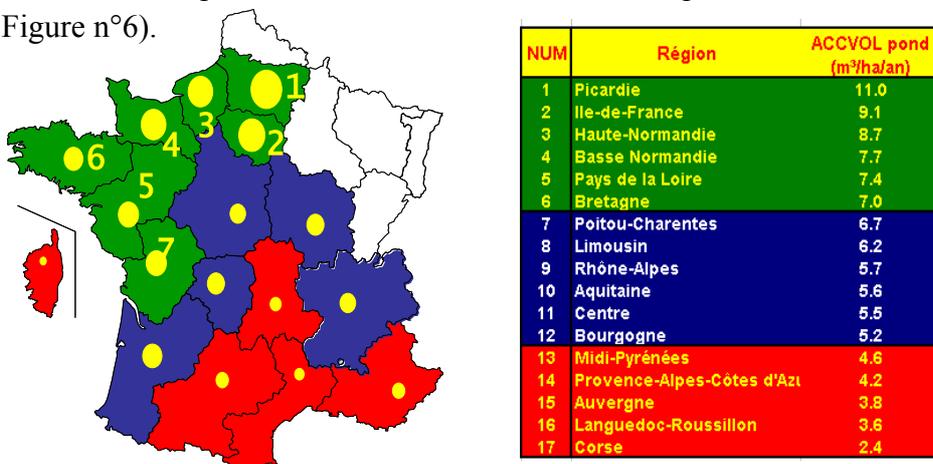


Figure n°6 : Le potentiel de production estimé en France : l'accroissement moyen annuel par m³/ha/an (Lemaire, 2005, Stage Châtaignier, « Le châtaignier dans tous ses états »)

Les régions dont les potentialités de production du châtaignier sont les plus importantes sont situées au nord de la France où la surface actuelle de châtaignier est faible. **Il n'y a pas d'adéquation entre la ressource et les potentialités de croissance**. L'histoire du châtaignier et l'usage des hommes expliquent ce fait.

Parmi la surface actuelle de châtaignier, **200 000 ha, environ, est améliorable** afin de produire un bois de qualité et "étouffé" (Lemaire, 2006, communication personnelle). En évaluant l'accroissement moyen annuel à 6 m³/ha/an, le prélèvement annuel pourrait, sans dommage pour le capital sur pied, atteindre environ **2,7 millions de m³**.

6- Les utilisations du bois

Le châtaignier est sans doute l'une des essences à laquelle on peut attribuer **le plus d'usages**. A chaque étape du développement de l'arbre correspond un produit : le rejet de 3 ans utilisé par le canetier, celui de 3 à 10 ans utilisé par les feuillardiers ou bien encore les perches destinées à la production de piquets et d'échalas, le billon transformé en parquets ou lambris, la grume utilisée en menuiserie ou plus rarement tranchée... .

Les produits récoltés varient suivant les régions. Au-delà des potentialités écologiques, ce sont les besoins régionaux et les usages humains qui expliquent la diversité des produits. Ainsi, la production de billes et billons est économiquement satisfaisante dans le sud ouest au regard de la filière en place alors que cette dernière est obsolète en Ile-de-France et en Picardie où seule la production de grume est économiquement viable.

7- L'évolution du prix moyen du bois sur pied depuis les années 1990 : comment le bois du pauvre est devenu feuillus précieux

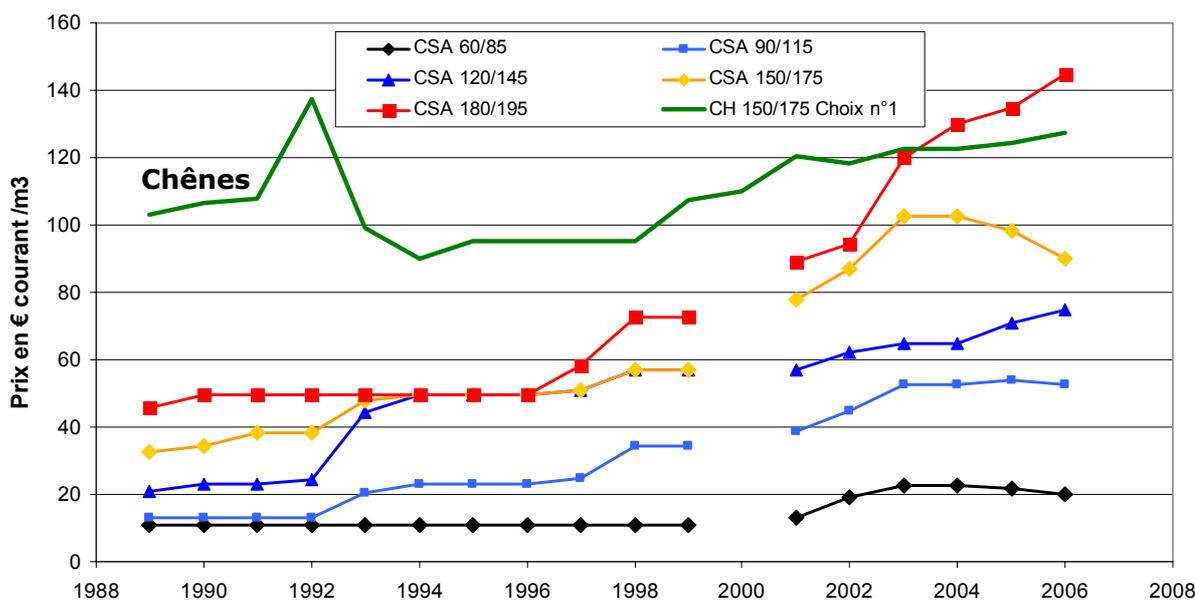


Figure n°7 : Evolution du prix du châtaignier sur pied suivant les catégories de circonférence depuis 1988 (données extraites de la revue Forêt Privée Française)

Le châtaignier fut longtemps considéré comme le « bois du pauvre ». L'évolution du marché du bois et les prix l'accompagnant depuis 1995 démentent cet *a priori* (cf. Figure n°7). On en vient même aujourd'hui à le qualifier de feuillus précieux.

De 1988 à 1995, le marché du bois était constant et modestement rémunérateur. Depuis 1995, on assiste à une augmentation constante des prix du bois. Le prix unitaire a au moins été multiplié par deux depuis 10 ans quelque soit les catégories de circonférence.

Comme le montre la figure ci-dessus (cf. Figure n°7), le prix unitaire du châtaignier (classe de circonférence 120/145) équivalait en 1989 au quart du prix du chêne de choix n°1. Aujourd'hui, le châtaignier de qualité se vend sur pied au même prix que le chêne de qualité supérieure.

Cette augmentation du prix explique en grande partie le regain d'intérêt que l'on connaît pour cette essence en Europe.

8- Les marchés du châtaignier

Plus de **35% du bois d'œuvre récolté** au niveau national **est exporté** vers nos voisins européens. La **Picardie, l'Île-de-France et la Normandie**, principaux producteurs de grumes exportent **la quasi totalité de leur bois**. Les unités de sciage en France sont (très) peu nombreuses. La valeur ajoutée générée par le sciage est réalisée par le pays importateur.

Les principaux pays importateurs et transformateurs de châtaignier sont l'Italie (43 000 tonnes/an de bois d'œuvre, Bourgeois et al, 2004), le Portugal et l'Espagne. L'Italie demande et transforme des bois de gros diamètres alors que le Portugal et l'Espagne privilégient les bois de petits diamètres.

Le châtaignier est profondément inscrit dans la tradition et la culture italienne. Les bois étoffés exportés vers l'Italie sont utilisés dans la construction et la rénovation d'habitations traditionnelles. Les bois sont aussi destinés à la production de panneaux massifs et de meubles de cuisines.

Le Portugal et l'Espagne utilisent le châtaignier en ameublement principalement.

9- Conclusion

Après de longues années de dédain, le châtaignier bénéficie à juste titre d'un formidable regain d'intérêt. C'est une essence à **croissance rapide** qui peut produire grâce à une **sylviculture dynamique** et simple du bois d'œuvre en moins de 45 ans. Ces **propriétés technologiques** et sa **durabilité** font de lui une **essence polyvalente** et multi-usage. Enfin, les marchés du bois que l'on connaît depuis quelques années lui sont favorables.

Au-delà du tableau positif décrit ci-dessus, le châtaignier est sous surveillance sanitaire. Après l'encre au début du siècle, le chancre se propage progressivement en France du sud vers le nord. Les dégâts occasionnés par ce champignon sont parfois considérables. Une période de 20 ans environ s'écoule avant la résilience des peuplements et l'installation de l'hypovirulence³.

Le châtaignier est aussi tristement réputé par un défaut du bois que l'on rencontre fréquemment et qui le rend bien souvent inutilisable : la roulure.

La roulure peut annihiler tous les efforts entrepris et investis par les propriétaires dans l'amélioration des peuplements.

³ Hypovirulence : Souche du champignon dont la virulence est réduite et pouvant se recombinaison aux souches agressives.

Partie B

La roulure du châtaignier

ETAT DE L'Art

Comme pour toute essence, le châtaignier connaît aussi ses limites. L'un des défauts le plus fréquemment observé est la roulure. La roulure est une fente tangentielle rendant bien souvent le bois inutilisable. Sa fréquence et ses conséquences sur l'usage du bois ont conduit, à la fin des années 1980, à l'élaboration d'un programme de recherche destiné à mieux la comprendre (Thibaut, 1982) :

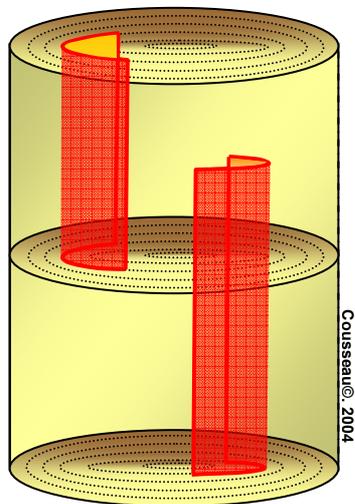
- Etude du processus de formation de la roulure ;
- Etude des facteurs à l'origine de ce défaut ;
- Etude des moyens de lutte contre les conséquences de la roulure.

Partant d'un état de connaissances quasi nul, les avancées sur la compréhension de la roulure ont été considérables lors des 20 dernières années. Elles ont permis de la décrire, d'en expliquer les mécanismes et de discuter de l'influence de certains facteurs supposés "déclenchants". Mais la roulure est un phénomène complexe et les réponses apportées aux sylviculteurs sont partielles.

En effet, outre la connaissance empirique, il est difficile pour le sylviculteur d'appréhender le risque de roulure au sein d'un peuplement de châtaignier. Pour le propriétaire, ce facteur supplémentaire de risque peut inhiber son engagement dans l'amélioration du peuplement ou bien encore annihiler tous les efforts déjà investis.

1- Qu'est-ce que la roulure ?

On retrouve de nombreuses définitions de la roulure dans la littérature "ancienne" et contemporaine. Celle-ci est considérée tantôt comme une maladie tantôt comme une anomalie du bois. C'est seulement au début des années 1980 qu'une définition sans équivoque est admise.



Ainsi, d'après Chanson *et al* (1990), « *la roulure est une fente tangentielle (qui suit la direction d'un cerne), séparant, sur une longueur et une profondeur très variables, deux portions du bois d'une même tige ou d'une même planche* » (cf. Figure n°8). Cette fente tangentielle démarre toujours du pied de l'arbre.

Figure n°8: La fente tangentielle

Comme le laissait suggérer la richesse des définitions, la roulure est un **terme générique** qui regroupe des phénomènes très différents. On distingue alors les "**roulures traumatiques**" et les "**roulures saines**".

1.1- Les roulures traumatiques

On les appelle ainsi car elles sont provoquées par un **traumatisme du cambium** (blessures d'exploitation, dégâts de gibiers...). Il s'agit d'un décollement **d'origine biologique** entre deux cernes servant d'amorce à une fissuration plus importante.

Fonti (2002) précise la définition en identifiant deux types de roulures traumatiques :

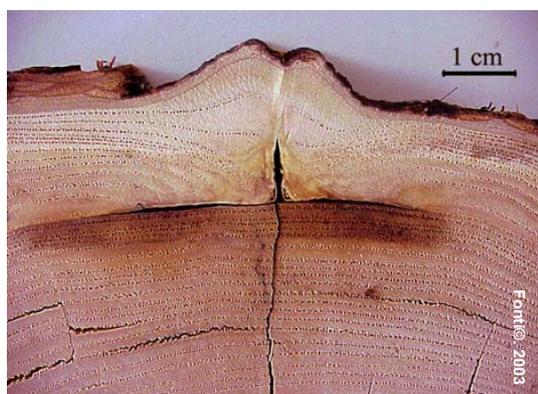


Figure n°9 : "Overlay" : Cicatrisation des tissus après un traumatisme (FONTI P., MACCHIONI N, 2003) Réf. [30]

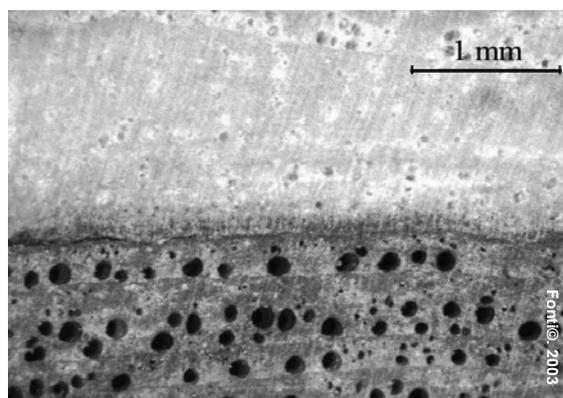


Figure n°10 : "Discoloured detachment" : Compartimentation et décoloration après un traumatisme (FONTI P., MACCHIONI N, THIBAUT B., 2002) Réf. [30]

Fonti et al (2002) distinguent les roulures issues de la cicatrization des tissus après un **traumatisme** ("Overlay") et les roulures provoquées par une **compartmentation** ("Discoloured detachment") (cf. Figure n°9 et n°10). Cette dernière provoque un détachement et une décoloration des cellules situées à la limite entre les cellules du bois final de l'année n et du bois initial de l'année n+1.

Les **roulures traumatiques sont présentes dans l'arbre sur pied et bien visibles à l'abattage**. Elles représentent **6 à 18%** des roulures d'après les observations de Chanson (1990). **On peut prévenir la roulure traumatique** en s'attachant, par exemple, à réaliser des exploitation soigneuses.

1.2- Les roulures saines

A l'inverse, les roulures saines ne sont liées à **aucune pathologie ou anomalie de structure du bois**. Il s'agit d'une fissuration d'**origine mécanique** dans un matériau soumis à des contraintes. Malgré des controverses, ce type de roulure ne semble **pas être présent dans l'arbre sur pied** (Chanson et al, 1990). La fissuration peut se produire à l'abattage ou beaucoup plus tard lors des processus de transformation du bois (sciage, séchage, mise en œuvre...).

On identifie deux types de fissuration s'exerçant respectivement dans deux compartiments différents du bois (Fonti et al, 2003) :

- un "détachement" ou le "décollement" (cf. Figure n°11) : C'est **une séparation qui se produit en limite de cernes**, au niveau des parois communes (la lamelle moyenne) aux cellules du bois final de l'année n et du bois initial de l'année n+1. Les cellules ne sont pas cassées, seulement "décollées" (cf. Figure n°11). Ainsi, la surface de rupture est lisse. Le décollement s'observe dans environ **15% des cas** (Fonti et al, 2003) **après le séchage** des bois notamment (Fonti et al, 2002).
- la "cassure" ou le "crack" en anglo-saxon (cf. Figure n°12) : Cette dernière se développe le long de la première et de la seconde ligne des vaisseaux du bois de printemps. La surface de rupture est rugueuse en raison de la "cassure" des fibres et des vaisseaux (cf. Figure n°12). Celle-ci s'observe en revanche dans le **"bois frais"**. C'est la **forme la plus répandue** de roulure saine. Le séchage provoque l'augmentation de la proportion de ce type de rupture.

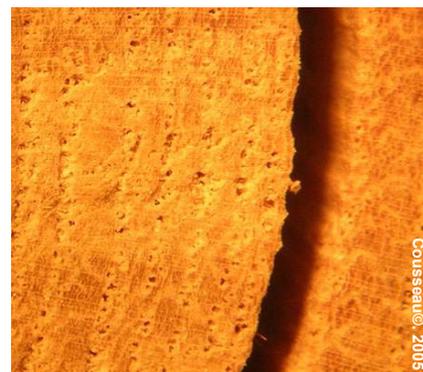


Figure n°11 : Le décollement ou le "detachment"



Figure n°12 : La cassure ou "crack"

Ces deux types de roulure laissent suggérer des mécanismes différents d'apparition de la fissuration. Fonti (2003) apporte quelques hypothèses pour expliquer cette différenciation (discutées ultérieurement).

La simple observation des différents types de roulure laisse présager un mécanisme complexe.

Dans la suite de cette synthèse, nous discuterons uniquement des roulures saines.

2- La distribution de la roulure

2.1- La répartition géographique de la roulure

Certaines études mettent en évidence la présence d'une **sensibilité régionale à la roulure**. Les résultats sont à interpréter avec prudence car l'échantillonnage est souvent insuffisant. La variabilité de la roulure est souvent telle que les différences observées ne sont pas significatives. C'est avec un regard critique que la figure suivante doit être examinée :

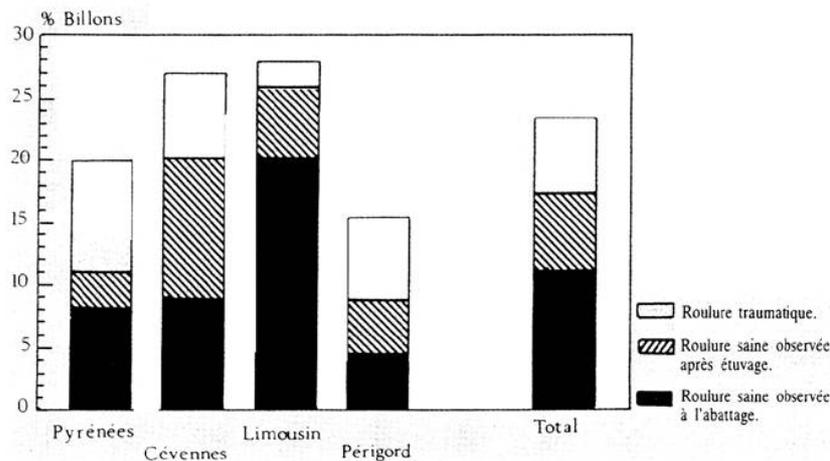


Figure n°13 : Répartition de la fréquence et des types de roulures par région (CHANSON B., LEBAN J.M, THIBAUT B., 1989). Réf. [12]

Ainsi, en France, Chanson (1988), étudiant 36 peuplements répartis dans 4 régions différentes, montre **une nette tendance géographique** (cf. Figure n°13). Par exemple, le Limousin est la région où la proportion de billons roulés après l'abattage est la plus forte. En revanche, le Périgord, région limitrophe du Limousin, est la zone d'étude la moins roulée. La proportion respective de roulure saine présente à l'abattage et après l'étuvage varie fortement entre les régions. Cette observation laisse suggérer **des causes différentes** d'apparition de roulure suivant la région considérée (Fonti, 2003).

2.2- La répartition de la roulure au sein des peuplements

Certains ont essayé d'identifier des caractéristiques dendrométriques propres aux peuplements roulés. Mais les résultats ne sont **pas équivoques et bien souvent incomplets**. Nous pouvons en revanche citer les principaux résultats.

2.2.1- L'âge du peuplement

C'est sans doute le seul facteur dont l'effet sur la roulure est reconnu, vérifié et non controversé. Dans une même gamme de fertilité, **la proportion d'arbres roulés augmente de manière très significative avec l'âge.**

Bonenfant (1985) le démontre très nettement dans son étude menée sur 24 peuplements en Bretagne (cf. Figure n°14). Ce dernier établit même un modèle de prévision de la roulure : **% d'arbres roulés = 1,46 x Age - 45,05**

L'histoire et la sylviculture de ces 24 peuplements sont inconnues. La gestion fut vraisemblablement hétérogène. L'extrapolation du modèle doit être faite en connaissant cette limite.

Auparavant, Réveillaud (1979) identifiait aussi clairement l'effet de l'âge sur la roulure. D'après ses relevés, 50 % des peuplements de plus de 40 ans sont roulés alors que la proportion de brins roulés n'excède pas 20% dans les peuplements moins âgés.

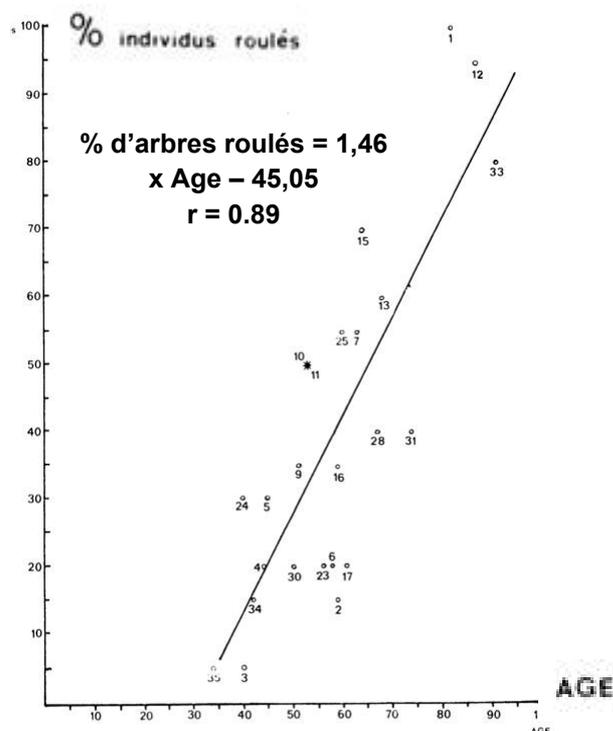


Figure n°14 : Evolution de la fréquence absolue de roulures en fonction de l'âge du peuplement (Bonenfant M., 1985). Réf. [4]

2.2.2- L'origine des tiges

L'origine des tiges est le second facteur reconnu malgré quelques controverses.

Ferrand (1980) observe que les seules tiges non roulées d'un taillis (situé en Lozère) étaient de franc-pieds. Chanson et al (1990) confirme les observations de Ferrand en affirmant que pour **un même âge, la proportion d'individus roulés est plus élevée s'il s'agit de rejets que d'arbres de franc-pied.** Enfin, **Bonenfant (1985) valide les observations précédentes** (cf. Tableau n°1).

Tableau n°1 : Evolution de la fréquence absolue de roulure en fonction de l'âge du peuplement et de l'origine des tiges (Bonenfant M., 1985). Réf. [4]

Catégories d'âge	Origine		
	Franc pied	Rejets	Indéfinie
35-40	5,50%	17,50%	
45-50		14%	35%
55-60	29%	34%	24%
65 et +	41%	80%	63%

En revanche, les résultats obtenus par Macchioni et al (1996) sont contradictoires. En effet, d'après l'étude exhaustive d'un taillis de châtaignier du nord de l'Italie (n=264 tiges), seulement 38% des rejets sont roulés alors que 96% des arbres de francs pieds (n=26) sont roulés.

2.2.3- Le diamètre et l'accroissement moyen du peuplement

Le diamètre et l'accroissement moyen sont des indicateurs sylvicoles. Ils permettent d'évaluer indirectement les effets de la sylviculture sur le risque de roulerie.

A partir de l'étude pré-citée, Macchioni et al (1996) met en évidence une corrélation entre le **diamètre de la tige, l'accroissement moyen et la roulerie** (cf. Tableau n°2). Au sein d'un taillis de châtaignier non éclairci, les tiges roulées se caractérisent à la fois par un diamètre et un accroissement moyen plus important. Les différences sont statistiquement significatives mais de très faibles amplitudes. Dans le cas présent, également, l'extrapolation doit être prudente.

Tableau n°2 : Valeurs moyennes des différents paramètres des rejets (n=264) et des arbres de francs pieds (n=26) selon les différentes classes de roulerie. (MACCHIONI N., PIVIDORI M., 1996). Réf. [55].

Taux de roulerie	0 0-33%	1 33-66%	2 >66%	Mean	Standards
Mean diameter (cm)	16.7	18.5	18.9	17.5	24
Mean height (m)	17.2	18.8	18.5	17.7	17.8
Mean incr (mm)	2.8	3	3.2	2.9	2.3
CV of mean incr (%)	44.9	42.4	44.7	44.6	58.4
Sweep (sagitta/height)	0.23	0.19	0.16	0.2	0.16
Verticality (m)	0.51	0.45	0.49	0.5	0.36
Ovality of stem	1.06	1.05	1.06	1.06	1.06
Crown development along the stem (%)	34.4	39.2	36.1	35.4	40.9
Mean diameter of crown (m)	4.5	4.8	4.7	4.6	5.9

Nota : "0" : 0-33% d'arbres roulés" : Pas de rouleries, "1" : 33-66% d'arbres roulés, "2" : >66% d'arbres roulés

L'auteur pré-cité explique cette corrélation par **l'irrégularité de la croissance** (cf. Paragraphe Partie B, n°2.4.1 et 2.4.2).

En revanche, d'après Chanson et al (1990), parmi des **arbres de futaie d'âge égal, la proportion d'individus roulés est plus faible pour les bois de gros diamètre que pour ceux de petits diamètres**. L'histoire sylvicole des peuplements n'est pas connue.

Bonenfant (1985) étaye ces observations et met en évidence que **l'accroissement moyen des arbres non roulés est significativement supérieur à celui des arbres roulés**. L'accroissement moyen en circonférence est respectivement de 0,62 et 0,75 cm/an pour les arbres roulés et les arbres sains.

2.2.4- Les caractéristiques de l'ensouchement

Il est souvent admis que l'ensouchement joue un rôle majeur dans la répartition de la roulure. Empiriquement, l'âge de la souche semble être un facteur prédisposant à la roulure. Les tiges installées sur les vieilles souches seraient plus sensibles à la roulure. Seulement peu d'observations objectives sont rapportées dans la littérature.

Concernant la densité de l'ensouchement, Réveillaud (1979) constate que la proportion de roulure diminue lorsque le nombre de cépées à l'hectare augmente.

2.2.5- Localisation des brins roulés sur les cépées

L'analyse de la fréquence de la roulure à l'intérieur d'un taillis simple de châtaignier indique que le phénomène n'est **pas distribué aléatoirement** dans le peuplement mais, au contraire, se concentre sur quelques cépées (Macchioni et al, 1996). La sensibilité à la fissuration pour chacune des tiges d'une même cépée semble être identique. En d'autre terme, la probabilité d'observer une roulure sur un rejet est d'autant plus forte que les autres rejets de cette même souche sont affectés. Cette observation laisse envisager un **déterminisme génétique**.

2.3- La répartition de la roulure au sein de l'arbre

2.3.1- La hauteur de fissuration

C'est incontestablement le critère le moins étudié mais pourtant le plus important quant à l'évaluation de **la perte économique** résultant d'une telle fissuration.

La roulure apparaît **toujours à la base de la tige**. Elle se propage dans la tige à une hauteur plus ou moins variable.

La fréquence d'apparition de la roulure est en moyenne deux fois plus élevée dans la bille de pied (1,3 m) que dans les sur-billes (au-delà de 1,3 m) (Chanson et al, 1988). La fréquence d'apparition diminue de la base au sommet (cf. Figure n°15).

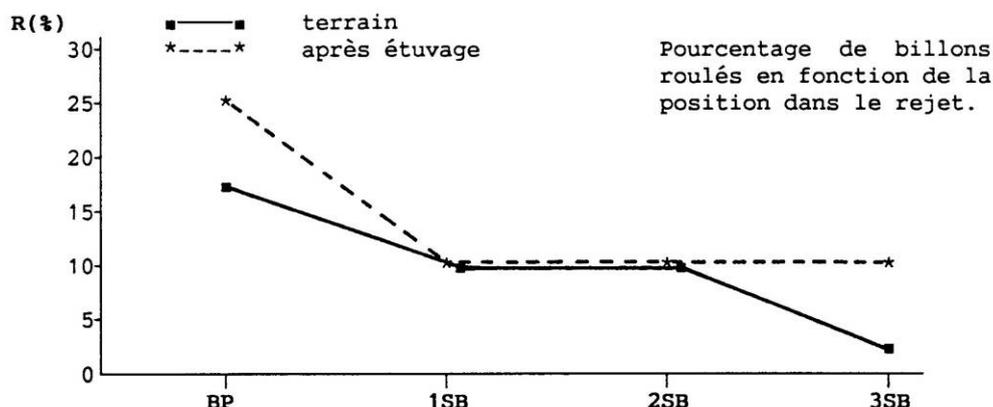


Figure n°15 : Pourcentage de billons roulés (R%) en fonction de la position du billon. (CHANSON B., 1988). Réf. [11]. Nota : "BP" : Bille de pied (<1,3 m), "1SB" : Première surbille (1,3 à 2,6 m), "2SB" : Seconde surbille (1,3 à 2,6 m), "3SB" : Troisième surbille (2,6 à 3,9 m)

La roulure est absente des racines et ce n'est que rarement que l'on observe des branches roulées.

2.3.2- Répartition de la roulure le long du rayon

La fréquence d'apparition de la roulure est faible mais non nulle vers le cœur, passe vers un maximum vers 40-50% du rayon de l'arbre et décroît alors brutalement pour être nulle au voisinage de l'écorce (cf. Figure n°16) (Chanson et al, 1990, Macchioni et al, 1996). L'explication est mécanique. Aucune fissure n'est décelée dans les cernes les plus récents.

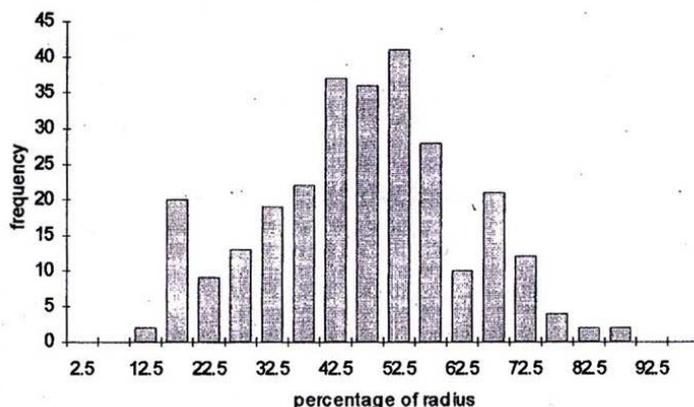


Figure n°16 : Fréquence de la distribution de la roulure suivant le pourcentage du rayon de l'arbre (n=264). (MACCHIONI N., PIVIDORI M., 1996). Réf. [55].

2.3.3- Distribution de la roulure en fonction de l'âge relatif de l'arbre

La probabilité d'observer un cerne roulé augmente avec l'âge de l'arbre (Chanson et al, 1990). (cf. Figure n°17)

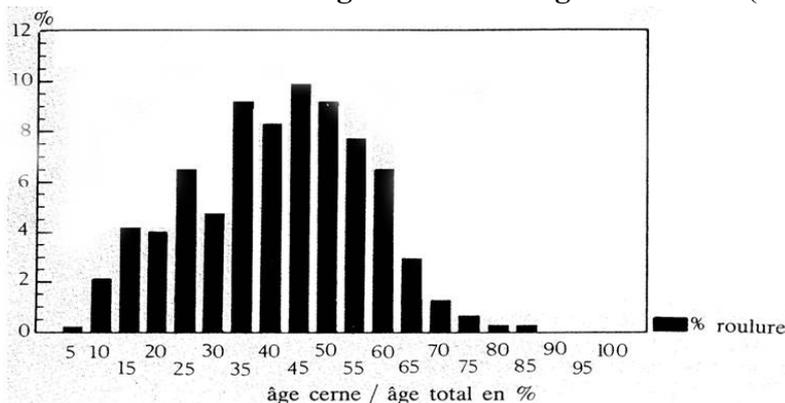


Figure n°17 : Pourcentage d'apparition d'un cerne roulé par tranche « d'âge relatif » du cerne dans l'arbre. Etude de Bonenfant (1985). (cité dans CHANSON B., THIBAUT B., BOURGEOIS C., 1990). Réf. [13]

La distribution de la roulure par rapport à l'âge relatif est identique à la distribution de la roulure par rapport au rayon. La roulure n'est pas distribuée aléatoirement. Elle suit une distribution normale. La fréquence d'apparition de la roulure passe par un maximum à la moitié de l'âge de l'arbre. Il n'y a quasiment jamais de roulures dans les 10 cernes les plus récents.

2.4- La répartition de la roulure en fonction des propriétés physiques et de la structure anatomique des cernes

2.4.1- Les années caractéristiques de la roulure

Il ne semble pas avoir d'années privilégiées ou d'années à risque. Bien qu'une augmentation brutale de la fréquence de roulure soit observée pour certaines dates, aucune relation claire entre la roulure et la croissance moyenne annuelle radiale n'a été mise en évidence. Contrairement à ce que l'on aurait pu croire les gels de 1956 et 1985 ne sont pas marqués par un plus grand nombre de roulures saines en limite de cernes de ces années-là.

En revanche, dans quelques cas, on observe l'augmentation de la proportion de la roulure sur certain cerne consécutivement à une **intervention sylvicole** (cf. Figure n°18) (Fonti, 2002).

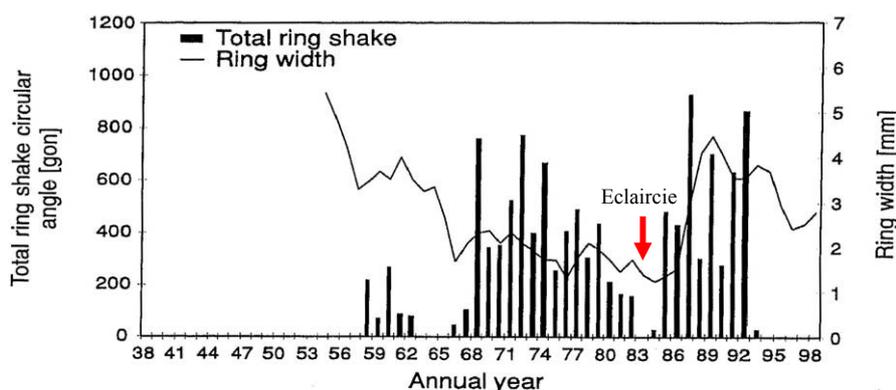


Figure n°18 : Incidence de la roulure exprimée en angle circulaire en comparaison avec la croissance annuelle radiale (FONTI P., BRAKER O-U., GIUDICI F., 2002). Réf. [26].

Plusieurs auteurs observent ce phénomène (Fonti, 2002). **L'irrégularité de la croissance est là aussi mise en cause** (cf. Figure n°18). La sylviculture pourrait avoir un effet sur le risque de roulure.

2.4.2- L'accroissement radial et la roulure

Réveillaud (1979) met en avant l'évolution de la largeur de cernes après et avant le cerne roulé. Deux cas sont distingués. On observe soit un épaissement soit un rétrécissement des cernes après le cerne roulé (cf. Figure n°19).

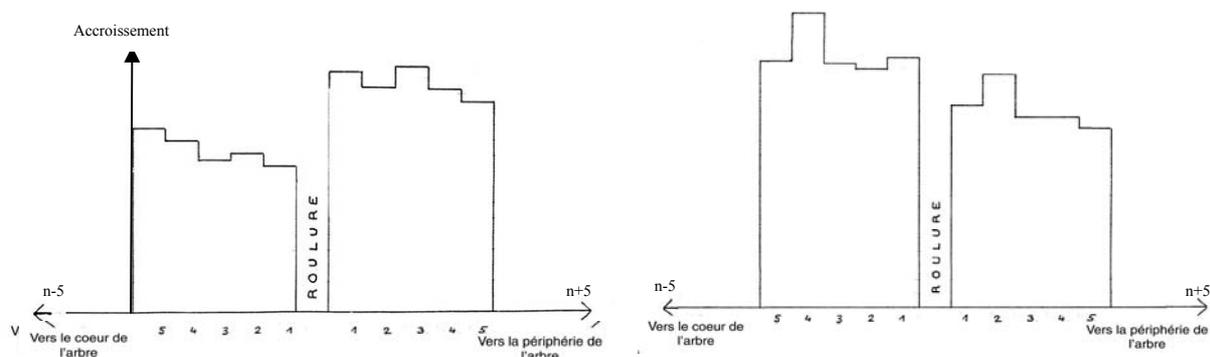


Figure n°19 : Evolution de la largeur de cernes les cinq années précédentes et succédant à un cerne roulé. Région d'étude : Languedoc-Roussillon. (REVEILLAUD, 1979). Réf. [65].

Dans les deux cas de figure, la roulure se localise entre deux zones d'accroissements différents. A nouveau, l'effet de l'irrégularité de croissance sur le risque de roulure est discuté.

2.4.3- La densité des cernes roulés

Leban (1985) étudie la densité des cernes roulés et des cernes adjacents sur quatre rayons. Il met en évidence les éléments suivants :

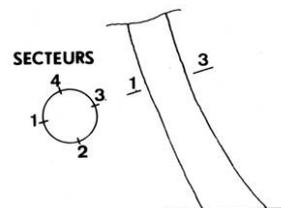


Tableau n°3 : Données microdensimétriques du cerne roulé et des cernes adjacents suivant le secteur considéré. (LEBAN, 1985). Réf. [50].

	Densité maximum			Densité minimum			Densité moyenne			Largeur de cerne en mm x 10		
	n-1	n	n+1	n-1	n	n+1	n-1	n	n+1	n-1	n	n+1
Secteur I	863	873	871	327	315	322	601	592	596	37	35	35
Secteur II	846	862	848	346	339	331	591	601	598	38	34	36
Secteur III	818	851	844	326	327	303	586	569	571	37	35	36
Secteur IV	837	845	841	337	326	321	581	583	584	40	36	38

Le cerne roulé a une densité maximum supérieure aux autres cernes sur tous les secteurs. La largeur du cerne roulé est inférieure à la largeur de cernes adjacents (cf. Tableau n° 3).

Le cerne n-1 se distingue nettement des deux autres cernes. Il a la plus faible densité maximum ; la plus forte densité minimum et la largeur de cerne la plus importante. Il est important de noter que les différences observées entre le cerne roulé et les cernes adjacents sont très faibles, notamment en ce qui concerne la largeur de cerne.

Ces résultats sont en partie cohérents avec ceux de Ferrand (1980) observant une densité moyenne et minimale plus élevée chez les cernes roulés.

Contrairement au chêne, il n'y a pas de relation entre la **densité et la vitesse de croissance (largeur de cernes)** (Arnold, Sell, 1997)

2.4.4- Le retrait des cernes roulés

D'après cette même étude, Leban observe que **le cerne précédent le cerne roulé a un retrait tangentiel supérieur au cerne roulé** dans environ 80% des cas.

Pour les retraits radial et longitudinal, il y a aussi une différence entre les retraits des cernes roulés et les retraits des cernes non roulés (plus de la moitié des cernes roulés ont un retrait radial qui est le double du retrait radial moyen).

L'hypothèse est qu'un fort retrait lors de l'année n-1 favorise l'apparition de la roulure lors de l'année n par la création de contraintes dues à la différence de retraits entre les deux cernes.

2.5- La distribution de la roulure en fonction de la station

Les facteurs stationnelles semblent être aussi des **facteurs discriminants**. Il est bien souvent reconnu empiriquement que la station est prépondérante dans le déterminisme de la roulure.

Seulement, aujourd'hui aucun facteur n'a pu être objectivement identifié. On évoque tour à tour la profondeur du sol, la texture, la géologie, l'exposition... . L'influence du calcium est aussi souvent évoquée. Nous en discuterons dans un prochain paragraphe.

Conclusion : Les éléments cités ci-dessus décrivent la répartition de la roulure à différentes échelles, le peuplement, l'arbre, les cernes ou bien celle de la station. Les connaissances acquises sont controversées et les lacunes nombreuses.

Les variables citées précédemment n'expliquent pas le fait que le châtaigner est une essence chez laquelle on observe une forte proportion de roulure.

3- Pourquoi observe-t-on autant de roulures chez le châtaigner ? Explication des mécanismes en jeu

3.1- Principes généraux

La roulure est un **phénomène complexe**. On peut seulement dégager les principales caractéristiques du mécanisme de fissuration.

D'après Chanson (1988), « *la roulure résulte d'un état de contraintes, qui appliqué à une structure donnée provoque une fissure dans les zones de plus faible résistance* ».

Ainsi, la fissuration se réalise quand la résistance mécanique de l'arbre ne permet pas d'assumer les contraintes emmagasinées et subies par ce dernier. La fragilité de la structure est fondamentale pour favoriser la fissuration car l'ordre de grandeur des contraintes de croissance est insuffisant pour déclencher la roulure.

La notion de seuil et de déséquilibre entre la résistance du matériau et la force appliquée est aussi fondamentale. L'apparition de roulure saine est toujours un phénomène qui se déclenche lorsque le seuil de résistance est franchi localement. La fracture apparaît dans le bois à un instant donné quand la résistance tangentielle est plus faible que le stress agissant dans cette direction.

Ainsi, deux facteurs interagissent dans le mécanisme d'apparition de la roulure :

- **la faible cohésion mécanique prédisposant la roulure** ;
- **les contraintes internes**, terme générique regroupant dans notre cas l'ensemble de contraintes variant au cours du temps et de l'histoire de l'arbre, sont les **facteurs déclenchants**.

3.2- Une faible cohésion mécanique

On évalue la cohésion mécanique à partir de deux caractéristiques :

- la **résistance à un effort de traction** qui se traduit localement par une contrainte maximum au-delà de laquelle il y a rupture ;
- la **résistance à la propagation** d'une fissure existante (fissilité du bois).

3.2.1- La fissilité du bois de châtaignier

Tableau n°4 : Tableau des caractéristiques mécaniques comparées du chêne et du châtaignier (CTBA, 1972, d'après Bourgeois et al, 2004)

Le châtaignier est un bois dont **l'aptitude à fendre est très importante**. Le seuil de rupture en traction perpendiculaire (au sens de la fibre) est deux fois inférieur à celui enregistré pour le chêne par exemple (cf. Tableau n°4). Par ailleurs, ces fentes risquent de se propager plus facilement et plus loin en raison de la grande rectitude des fibres.

Caractéristiques mécaniques du bois	Châtaignier	Chêne
Densité D12	0,60	0,70
Compression		
Contrainte de rupture C12 (kg/cm ²)	460	400 / 500
Flexion statique		
Chiffre caractéristique de rupture F12 (kg/cm ²)	1 000	900 / 1 000
Module d'élasticité E (kg/cm ²)	105 000	90 000
Flexion dynamique		
Energie absorbée à la rupture W (kgm)	2,5	2,5
Coefficient de résilience K	0,4	0,4
Traction perpendiculaire		
Contrainte de rupture Tpp (kg/cm ²)	20	40
Tpp = en traction perpendiculaire		
Fendage		
Contrainte de rupture (kg/cm ²)	13	25

3.2.2- Quels sont les facteurs susceptibles d'altérer la cohésion mécanique ?

Les fentes dans une rondelle de bois suivent presque toujours une direction radiale ou tangentielle. Dans la très grande majorité des espèces, **la direction radiale est hégémonique**. En revanche, toutes les observations faites sur le châtaignier montrent que **la prééminence de la fissuration radiale est faible pour ce bois**.

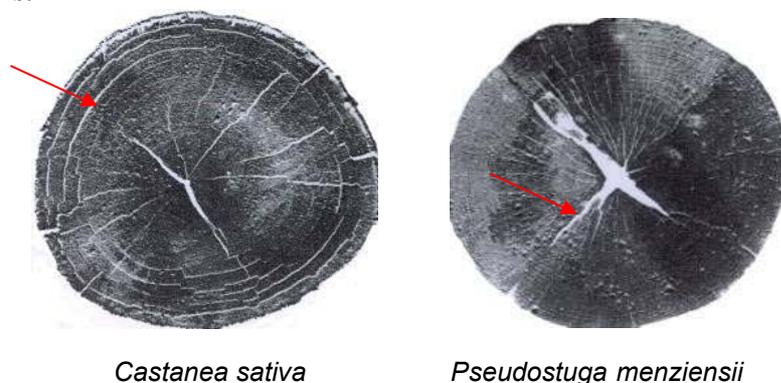


Figure n°20 : Répartition des fentes tangentielles et radiales pour le châtaignier et le douglas (*Pseudotsuga menziensis* Mirb) traités à l'azote liquide. (CHANSON B., THIBAUT B., BOURGEOIS C., 1990). Réf. [13]

Deux rondelles, respectivement de douglas (*Pseudotsuga menziensis* Mirb) et de châtaignier, sont plongées dans l'azote liquide provoquant quasi immédiatement leur éclatement (cf. Figure n°20) (Chanson et al, 1990). La rondelle de douglas ne présente que des fissurations radiales alors que la rondelle de châtaignier développe des fissures importantes dans la partie centrale puis des fentes tangentiels en périphérie.

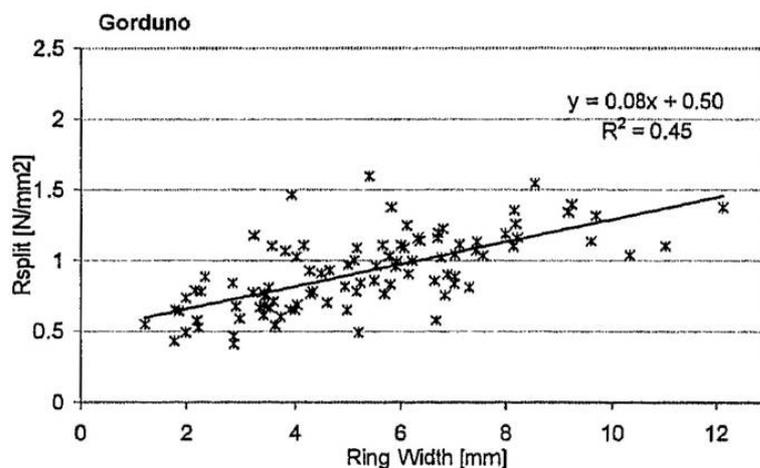
La **cohésion radiale** est assez constante d'un cerne à l'autre. Elle semble être caractéristique de l'arbre (Chanson et al, 1989).

3.2.2.1- Les caractéristiques anatomiques du bois

3.2.2.1.1- La croissance et la résistance à la fente radiale

Fonti et al (2003) montre qu'il existe une **corrélation positive entre la largeur des cernes et la résistance radiale** (cf. Figure n°21).

Figure n°21 : Relation entre la largeur de cerne et la résistance radiale. (FONTI P., SELL J., 2003). Réf. [31]



Une augmentation de la croissance radiale correspond à une amélioration de la résistance à la fente radiale, qui pourrait jouer un rôle important dans le développement de la roulure.

De plus, Fonti et al (2003) observent que tous les arbres dont la largeur moyenne de cerne est supérieure à 4 mm sont indemnes de toutes roulures (cf. Figure n°22).

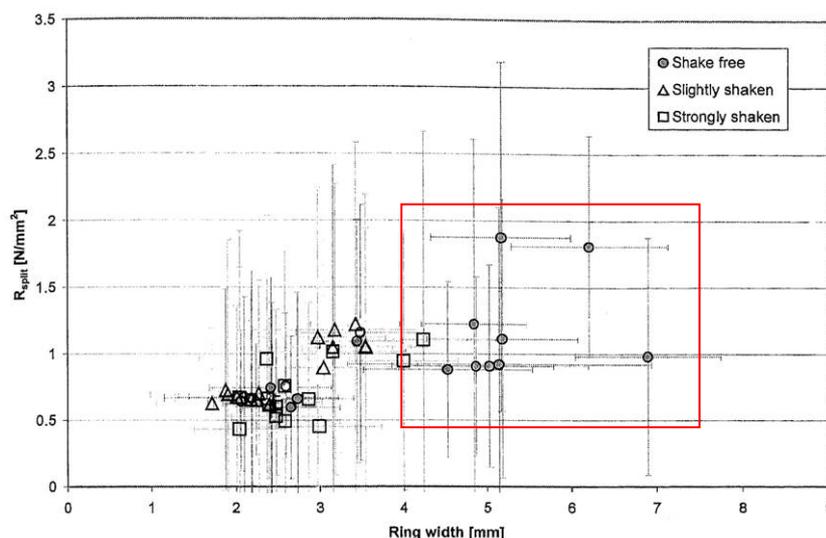


Figure n°22 : Relation entre la largeur de cerne, la résistance radiale et la roulure (FONTI P., SELL J., 2003). Réf. [31]

3.2.2.1.2- La zone initiale poreuse et la résistance mécanique

Le châtaignier est en effet un bois à **zone initiale poreuse**. Fonti et al (2002) montre que la proportion de bois initial est significativement différente d'un peuplement à un autre. La largeur de bois initial dans un même arbre est relativement stable et semble résulter de l'expression des facteurs bioclimatiques et des facteurs endogènes. **En revanche, il ne note aucune relation entre la roulure, la surface de vaisseaux de bois de printemps, la largeur moyenne des vaisseaux, la proportion de vaisseaux... .**

3.2.2.1.3- Les rayons ligneux et la propagation des fentes tangentielles

Les rayons ligneux orientés dans le sens radial constituent un tissu de renforcement améliorant la résistance du bois contre l'initiation et la propagation des fentes tangentielles.

Fonti et al (2002) ont étudié l'influence du volume de rayons ligneux sur le risque d'apparition de la roulure. Cette étude a porté sur trois peuplements situés dans le sud de la Suisse (cf. Figure n°23).

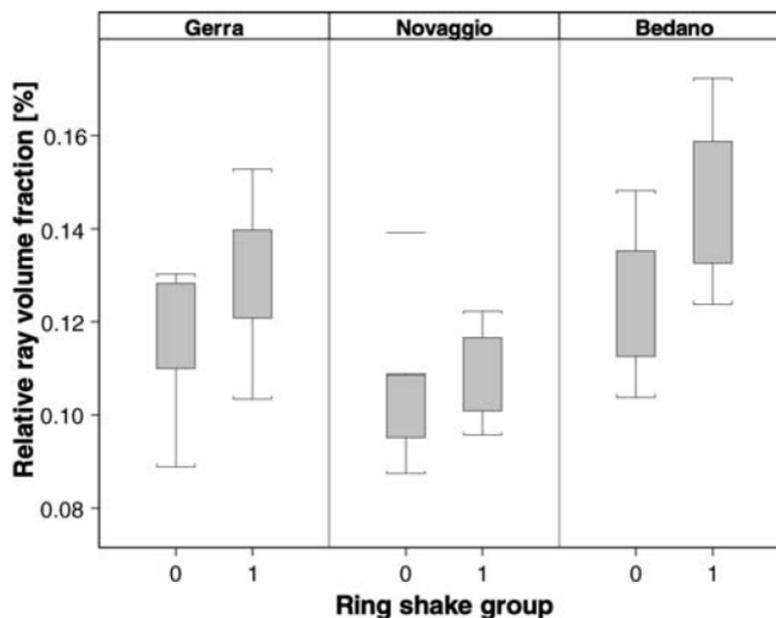


Figure n°23 : Volume de rayon ligneux suivant la présence et l'absence de roulure dans trois peuplements différents. (FONTI P., FREY B., 2002). Réf. [27]

Nota : 1 : Présence de roulure, 0 : Absence de roulure

Bien que la différence soit significative pour un seul peuplement (Bedano), les individus roulés présentent en moyenne un volume relatif de rayon ligneux plus important que les individus non roulés.

Ces résultats vont à l'encontre de ceux précédemment supposés. **Les auteurs font l'hypothèse que les processus biomécaniques conduisent à stimuler la production de rayons ligneux chez les individus roulés.** Il est plausible qu'afin de faire face à un niveau élevé de stress, les arbres sous contraintes produisent plus de rayons ligneux.

3.2.2.1.4- Le bois de tension

L'effet du bois de tension est souvent discuté car il génère localement l'augmentation du niveau de stress et renforce la résistance des tissus. Seulement sa répartition dans l'arbre n'est pas toujours celle attendue. Aucune relation n'a pu être mise en évidence.

Une observation macro-anatomique de la répartition du bois de tension met en évidence la faible fiabilité de la pente d'un rejet à un instant donné pour différencier, à priori, les zones de bois de tension et de bois opposé.

En effet, le côté tendu peut présenter une croissance moyenne plus forte, égale ou plus faible que le côté comprimé. On observe fréquemment un déplacement tangentiel de la zone de bois de tension pendant la vie des rejets. Ce déplacement est consécutif soit à un changement de l'orientation de l'inclinaison du rejet soit à une modification de la dissymétrie du houppier ou bien d'un processus de mise en place du bois de tension différent de celui théoriquement prévisible.

Dans l'hypothèse du rôle du bois de réaction comme réponse des arbres à la compétition spatiale, la croissance en taillis peut jouer un rôle important dans cette répartition du bois de tension.

3.2.2.2- Le déterminisme génétique et la résistance mécanique

Le fait que le châtaignier soit l'espèce feuillue dont la résistance mécanique est la plus faible et le fait que toutes les tiges d'une cépée présentent la même sensibilité à la roulure laisse envisager un **contrôle génétique**.

Bonnefoi n'avait pas pu différencier génétiquement les arbres roulés des arbres sains. Frascaria (1992) quant à elle met en relation, non pas la roulure, mais la résistance mécanique et quelques marqueurs génétiques. Bien que les résultats soient à pondérer en raison du faible échantillonnage, **il existe une liaison significative entre le caractère « arbres résistants » et le génotype**.

En revanche, les travaux de Burel (1993), réalisés dans le Limousin, ne confirment pas les travaux de Frascaria.

Les difficultés méthodologiques sont nombreuses pour étudier le rôle de l'hérédité sur le risque de roulure.

3.2.2.3- L'influence de la nutrition calcique

L'importance du calcium est discutée plusieurs fois dans la littérature comme étant l'un des facteurs prédisposant à la roulure.

Lachaussée (1953) publie un article dans lequel il discute de l'effet du rapport Ca/Fe (Calcium/Fer) dans le déterminisme de la gélivure chez les chênes. « On est amené à émettre l'hypothèse que le fer contenu dans le sol est absorbé par l'arbre en plus grande quantité que le calcium, lorsque le fer est abondant et le calcium rare, et que cette présence du fer en plus grande quantité modifierait les propriétés mécaniques du bois en le rendant plus fissile ».

Bien que le châtaignier soit une essence calcifuge, la nutrition calcique est fondamentale (Freyssac, 1994). Parmi les polymères constitutifs de la paroi, les pectines représentent des éléments importants dont le rôle cohésif peut être largement affecté par la possibilité de fixer ou non le calcium. Certains ont supposé que l'origine du décollement pouvait résider dans la fréquence des structures de type "egg-box" (structure créée par la formation de neuf liaisons de coordination entre le calcium et des pectines). Celles-ci favorisent la cohésion cellulaire (Verger, 1994). Un apport calcique augmente la synthèse des "egg-box".

Il est possible que la forte proportion de roulure observée après l'abattage dans le limousin résulte d'une carence calcique bien connue sur les sols de cette région.

3.3- Les contraintes internes

L'arbre est un système soumis en permanence à de très nombreuses contraintes internes. Ces contraintes ont deux sources

- les précontraintes dues à la croissance ;
- les précontraintes dues à la maturation

Les précontraintes dues à la croissance

Chaque année, l'arbre ajoute à la structure pré-établie une couche supplémentaire de bois à sa périphérie. Ainsi, la structure préexistante doit supporter chaque année l'accumulation de nouvelles charges. Alors la couche périphérique supporte seulement son propre poids alors que les premières couches subissent tout le poids de l'arbre.

Les précontraintes dues à la maturation

Lors de leur phase de maturation, les cellules se rétractent dans le sens longitudinal. Elles sont contraintes par les cellules précédemment installées et rigides. Ainsi, les cellules néoformées se retrouvent en tension. Alors, en contrepartie, pour assurer l'équilibre de la structure, les cellules en tension engendrent des forces de compression au niveau des cellules sous jacentes. Au cours du temps, à l'issue de l'ajout successif de couches, les cellules initialement en tension se retrouvent en compression. Schématiquement, le cœur de l'arbre est en compression, la périphérie en tension.

On regroupe l'ensemble de ces pré-contraintes sous le terme de "potentiel interne de déformations".

Une première partie de ce potentiel va s'exprimer lors de l'abattage. On a alors une libération partielle ou totale des contraintes internes. Lors de ces libérations, les niveaux de contraintes aux extrémités de l'arbre peuvent devenir suffisamment importants pour provoquer l'apparition et la propagation de fentes sur une longueur variable. A l'issue de ces premières fissurations, le niveau de contraintes dans l'arbre est plus faible. Il est remarquable qu'un châtaignier présentant de grandes fentes à cœur à l'abattage a moins de risque de rouler par la suite.

Une seconde partie de ce potentiel peut s'exprimer pendant la phase de séchage du bois (naturel ou artificiel). Le séchage, donc le départ d'eau, engendre des contraintes. Cette augmentation peut être suffisante pour déclencher un nouveau processus qui peut être :

- la propagation radiale de la fissure à cœur
- le changement d'orientation de la fissure
- l'apparition de roulures entre la partie centrale déjà fissurée et l'extérieur.

La roulure se produit dans la zone de jonction optimale où le niveau de contraintes est élevé et où la cohésion mécanique est faible, c'est-à-dire quasiment toujours à une limite de cerne et jamais dans les cernes voisins de l'écorce. Lorsque tous les cernes ont une cohésion mécanique équivalente, les roulures se produiront indifféremment dans un cerne ou l'autre mais toujours dans la même zone de contrainte radiale maximale.

Lors de l'opération de séchage, l'humidité interne d'une pièce de bois n'est pas uniforme. Les parties proches de l'extérieur sont plus sèches que les parties extérieures. Elles devraient se rétracter plus fortement compte tenu de la géométrie de la tige. Il y a encore apparition de contraintes internes qui peuvent être élevées aux extrémités du billon.

4- Conclusion

Les différentes études menées jusqu'à ce jour s'accordent sur le fait que la roulure résulte de mécanismes **complexes et interactifs**. C'est sans doute la raison pour laquelle les résultats sont rarement sans équivoques.

Nos connaissances au sujet de la roulure sont encore **aujourd'hui partielles**. Le mécanisme est en partie décrit et peut être résumé de la façon suivante (cf. Figure n°24) :

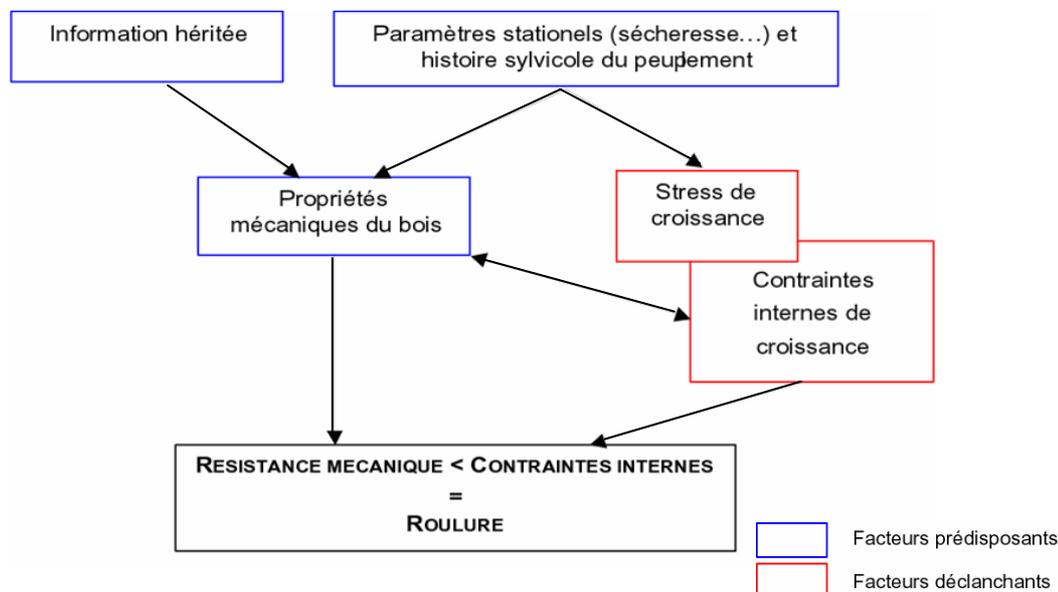


Figure n°24 : Les mécanismes de formation de la roulure (FONTI P., MACCHIONI N., THIBAUT B., 2002).
Réf. [29]

La roulure résulte d'un déséquilibre entre les forces auto générées et subies par l'arbre et sa résistance mécanique. Cette dernière est conditionnée par un ensemble de facteurs mal connus, qualifiés de facteurs prédisposant : l'âge, l'origine des tiges, la prédétermination génétique, la station... .

Depuis les années 1980, plusieurs voies de recherches ont été explorées. Partant d'un niveau de connaissances quasi-nulles, nos connaissances ont considérablement progressé. Mais de nombreuses questions demeurent. Il est important de souligner que les limites méthodologiques sont nombreuses face à l'étude de la roulure. La variabilité du phénomène en est la principale cause, et c'est sans oublier les difficultés de mise en œuvre technique qui constituent un frein majeur.

L'ensemble des travaux menés nous a démontré sans controverses **que l'âge et l'origine du peuplement sont deux facteurs qui prédisposent à la roulure**. La traduction sylvicole de ces conclusions est de préconiser l'abaissement de l'âge d'exploitabilité. Les arbres de francs pied sont à privilégier lors du renouvellement ou de l'amélioration du peuplement.

Mais d'autres variables sont en causes. Elles sont plus ou moins controversées. Le tableau ci-dessous fait le bilan des autres variables étudiées (cf. Tableau n°5).

Tableau n°5 : Bilan des facteurs étudiés en liaison aux risques de roulure

	Facteurs	Effet sur la roulure	Validité
Sylviculture	Age	Augmentation du risque de roulure avec l'âge	Admis, PAS de CONTROVERSE
	Origine des tiges	Augmentation du risque de roulure pour les rejets	Admis, PEU de CONTROVERSE
	A coup de croissance	A priori, irrégularité de croissance favorable au risque de roulure	<u>PAS ETUDIER</u>
	Accroissement	Favorable à la résistance mécanique radiale Augmentation de l'accroissement favorable à la diminution du risque de roulure	Controversé, <u>PEU ETUDIER</u>
	Traitement sylvicole	ECLAIRCIE ?	<u>PAS ETUDIER</u>
Station	Climat	A priori, pas d'années privilégiées	Admis, PEU de CONTROVERSE
	Fertilité	Variation de la proportion d'arbres roulés	Admis, PAS DEMONTRER
Hérédité	Génétique	Prédisposition à la roulure chez certains individus	Admis, PAS DEMONTRER

L'effet des **facteurs stationnels** est admis mais n'a jamais été démontré. Il est possible qu'un facteur (la concurrence) masque l'effet de la station n'apparaissant qu'en filigrane dans les analyses statistiques. La méthode d'échantillonnage et la variabilité du phénomène peuvent aussi l'expliquer.

La **croissance** du peuplement est plusieurs fois mise en cause. D'après Fonti (2003), les arbres dont l'accroissement radial est supérieur à **4 mm** ne sont pas roulés. En revanche, plusieurs expériences nous montrent que l'on ne peut réduire la croissance à sa **vitesse**. En effet, l'**homogénéité** de celle-ci doit être aussi considérée.

Hormis, les travaux de Bonenfant en 1985, **aucun outil d'évaluation** de la roulure n'a pu être établis.

Les arbres étudiés sont bien souvent issus de taillis non éclaircis. Les études sur le thème de la roulure n'ont jamais porté sur des peuplements éclaircis.

Les réponses apportées aux propriétaires et aux gestionnaires ne sont **pas suffisantes**. Ce bilan, certes non exhaustif, nous encourage à poursuivre les efforts.

Partie C

Compléments de bibliographie

Trois "nouvelles" études viennent s'ajouter à la littérature actuelle.

Les deux premières ont été réalisées en Limousin par Christian Riboulet (expert forestier) et en Bretagne par Gilles Pichard (technicien CRPF). C'est sans conteste parmi les études les plus importantes (160 placettes). Leur particularité réside dans leur approche globale (étude roulure, station, peuplement). Elles ne cherchent pas à expliquer les mécanismes conduisant à la roulure mais tentent de mettre en avant les facteurs qui la prédisposent au sein d'une région.

Pour ces deux études, les données brutes nous ont été confiées. Nous avons procédé à l'analyse de données.

La troisième fut réalisée par Guillaume Cousseau et Ernst Zürcher en juillet 2005 à la Haute école d'architecture, de génie civil et du bois à Bienne (Suisse). Elle a pour objectif de faire le lien entre les propriétés mécaniques et la roulure.

Les quelques pages suivantes synthétisent les principaux résultats. Le résumé complet figure en annexe.

Les prochains paragraphes reprennent seulement les nouveaux éléments que ces deux études apportent à la littérature pré-existante. **L'analyse complète figure en annexe joint au présent rapport.**

1- L'étude de la roulure en Limousin de C. Riboulet et de l'IDF

Elle fut lancée à la fin des années 1980 en Limousin par l'IDF. La mise en œuvre technique fut réalisée par Christian Riboulet, expert forestier à Limoges.

L'étude s'est effectuée sur **55 placettes** réparties au sein de 4 départements ; la Haute-Vienne, la Corrèze, la Creuse et la Dordogne. Elle a porté sur des **taillis non éclaircis** dont l'âge était compris entre **25 et 45 ans**. La circonférence moyenne se répartit normalement entre **30 et 55 cm**. Les placettes se distribuent équitablement dans les **quatre premières classes de fertilité** (cf. Figure n°25).

La roulure est **récurrente** dans les taillis de châtaignier du Limousin. 32% des tiges en moyenne sont roulées. Moins de 20% des placettes sont indemnes de roulures. La proportion d'arbres roulés est supérieure à 10% dans environ 60% des cas. La distribution de la roulure ne suit pas une loi normale. La hauteur moyenne de purge est en moyenne de 90 cm. Elle peut se propager dans l'arbre jusqu'à une hauteur de 3,7 m. La hauteur de roulure n'excède pas 1 m dans 66% des cas.

Aucune corrélation n'a pu être mise en évidence entre les variables dendrométriques, les variables stationnelles et la roulure. Le graphique suivant l'illustre. La roulure se répartit quelques soit l'âge ou l'indice de fertilité de la station.

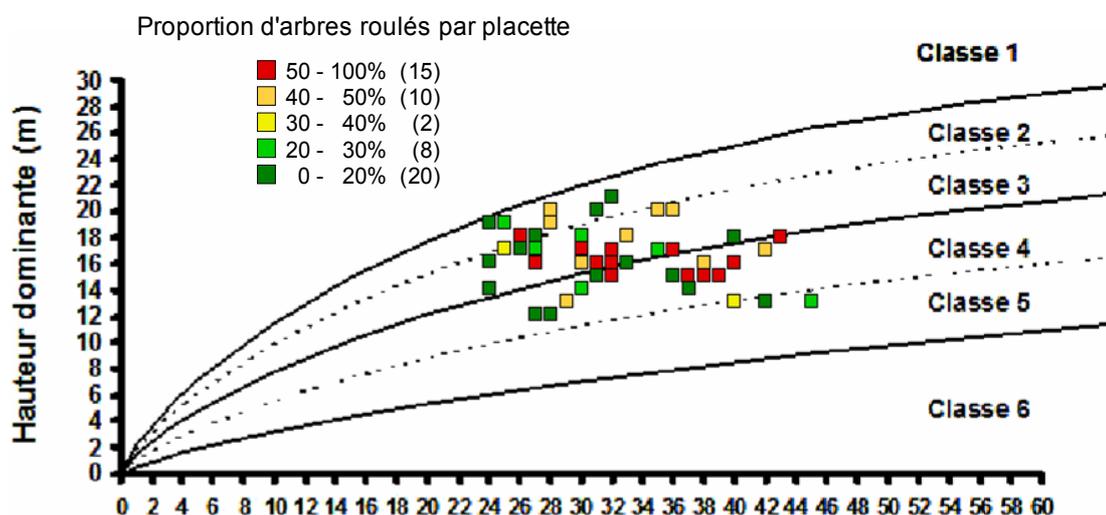


Figure n°25 : Fréquence de la roulure en fonction de l'âge et de l'indice de fertilité en Limousin

A défaut de comprendre les mécanismes et d'évaluer les facteurs qui prédisposent à la roulure, l'étude de Christian Riboulet apporte un nouvel élément. Elle permet d'évaluer la proportion de volume roulé à partir de l'observation des culées. En effet, il existe une relation directe et linéaire entre la proportion d'arbres roulés et la proportion de volume roulé :

$$\text{Proportion de volume roulé} = \text{Proportion d'arbres roulés} \times 0,22$$

Cette relation simple permet d'évaluer très rapidement la perte de volume provoquée par la roulure dans un lot de bois. Elle constitue un repère rationalisant la perte de valeur économique (cf. Figure n°26).

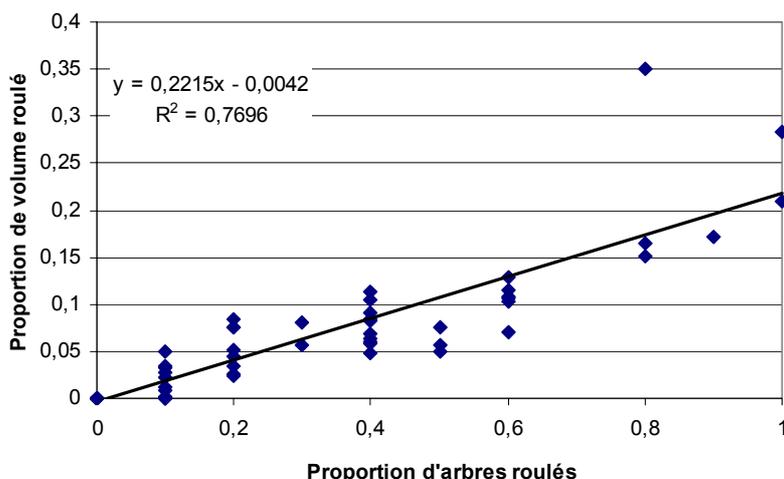


Figure n°26 : Relation entre la proportion d'arbres roulés et la proportion de volume roulé.

2- L'étude de la roulure en Bretagne de G. Pichard

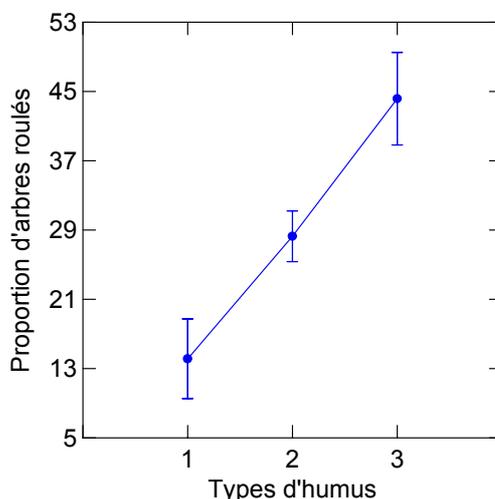
Depuis le début des années 1990, Gilles Pichard, technicien au CRPF du département d'Ile-et-Vilaine, a observé l'incidence de la roulure sur les peuplements de châtaignier en Bretagne à la faveur des exploitations et de ses tournées de terrain. **106 placettes** ont été réalisées et réparties entre les quatre départements bretons. L'histoire des peuplements est inconnue.

Le taux moyen de roulure observé dans un peuplement en Bretagne est d'environ 26%. Seulement 10% des placettes sont indemnes de roulure. La roulure se **distribue aléatoirement dans le département**.

La roulure est très nettement corrélée à l'**âge** du peuplement ($p < 0.001$). De la même façon, il y a une corrélation nette entre le risque de roulure et l'**origine des tiges**. Le taux de roulure est en moyenne de 10% dans les peuplements issus de franc-pied et d'environ 30% au sein des peuplements issus de rejets. L'**influence de la fertilité** de la station empiriquement reconnue est cette fois-ci nettement démontrée (cf. Figure n°27). La proportion d'arbres roulés augmente significativement en fonction de l'acidité de la station.

Test de Bonferroni	(1) Mull à Mull acide	(2) Mull Moder à Moder	(3) Dysmoder à mor
(1) Mull à Mull acide	-		
(2) Mull Moder à Moder	0.033*	-	
(3) Dysmoder à mor	0.000***	0.032*	-

Figure n°27 : L'effet de l'humus sur le risque de roulure en Bretagne



L'étude menée par Gilles Pichard permet d'estimer le risque de roulure au sein d'un peuplement en fonction de l'âge et de l'humus. Un outil d'évaluation se dessine (cf. Tableau n°6).

Tableau n°6 : Clé d'évaluation du risque de roulure en Bretagne en fonction de l'humus et de l'âge. (n=nombre d'arbres)

		Classe d'humus				Moyenne
		Eumull à Dysmull	Dysmull à Hemimoder	Eumoder	Dysmoder à MOR	
Classe d'âge	Mois de 40 ans	10% (n=12)	26% (n=7)	13% (n=7)	(n=1)	15% (n=27)
	40 à 50 ans	20% (n=9)	15% (n=8)	24% (n=18)	43% (n=12)	27% (n=47)
	Plus de 50 ans	12% (n=10)	46% (n=5)	44% (n=12)	55% (n=4)	36% (n=31)
	Moyenne	14% (n=31)	27% (n=20)	28% (n=37)	44% (n=17)	26% (n=105)

3- La roulure et les propriétés mécaniques

L'étude présentée ci-après tente de **comprendre la relation entre la résistance mécanique tangentielle et la largeur de cernes**. Elle a porté sur l'analyse de 96 individus issus d'un taillis de châtaignier de 50 ans, non éclairci, situé au sud des Alpes suisses à Bellinzona. Elle fut réalisée dans le cadre du stage FIF-ENGREF à l'étranger (Cousseau, 2005) et encadrée par Ernst Zürcher, professeur à la Haute Ecole d'architecture, de génie civil et du bois à Bienne en Suisse.

La résistance à la rupture dans le sens radial est dépendante de la largeur de cerne. La résistance à la rupture est d'autant plus forte que l'accroissement radial est fort. Les arbres dont l'accroissement radial moyen est supérieur à 4 mm (cf. Figure n°28) ont une valeur de résistance radiale 20% supérieure à la moyenne.

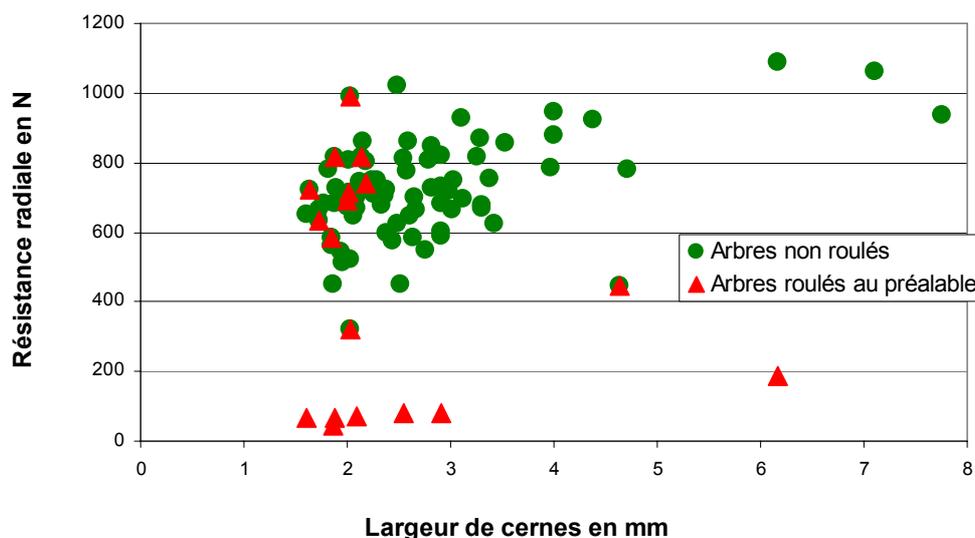


Figure n°28 : L'effet de largeur de cernes sur la résistance mécanique radiale.

22% des individus étudiés présentent une roulure sur la rondelle. Ainsi, on observe que la plupart d'entre eux (73%) se caractérise par un accroissement radial inférieur à 2,5 mm. Fonti (2003) met en évidence une relation similaire (cf. Figure n°21, 22).

A nouveau, l'accroissement est mis en cause dans le risque d'apparition de la roulure.

4- Bilan

Ces trois récentes études apportent de nouveaux éléments :

- L'étude de Gilles Pichard nous confirme l'effet aggravant de **l'âge**. Elle met en avant **l'effet prédisposant de l'humus** ou de **l'origine des tiges** bien souvent admis mais non démontré. L'analyse croisée de l'âge et de l'humus nous permet d'évaluer la proportion d'arbres roulés. **Une clé d'évaluation du risque de roulure est initiée.**
- L'étude en Limousin ne permet pas d'identifier l'effet de certains facteurs *a priori* reconnus comme prédisposant dans d'autres régions. En revanche, un **outil d'évaluation économique est amorcé**. En effet, la proportion d'arbres roulés est très nettement liée à la proportion de volume roulé.
- Au-delà de l'âge, de l'origine du peuplement, de la fertilité, **la vitesse de croissance** semble influencer nettement le risque de roulure. Plusieurs éléments vont dans ce sens. Il semble exister un seuil au-delà duquel le risque de roulure est diminué.

C'est à l'issue de la littérature et de ces nouveaux éléments que la réflexion au sujet de l'impact des éclaircies a démarré.

Partie D

L'origine du projet et les moyens nécessaires à la mise en œuvre pour répondre à :

"Quel est l'impact des éclaircies sur le risque de roulure ?"

Ce projet résulte de la concertation entre les propriétaires et les professionnels du secteur châtaignier. La mise en commun des moyens et des compétences a permis sa construction et sa mise en œuvre. Aujourd'hui, ce travail collectif et pluridisciplinaire a abouti à des réponses importantes face aux problèmes récurrents de la roulure.

Première réunion de restitution FOGEFOR, le 15 mai 2006 à Sénots (60)



Le projet présenté ci-dessous est piloté par le **Groupe de Travail National Châtaignier**. Le groupe de travail se compose de propriétaires-sylviculteurs, du SUF-IDF, des CRPF, de professionnels indépendants, de l'Université de Limoges, de l'ONF... .

Ce projet résulte de deux ans et demi de travail et de la mise en commun d'importants moyens et de compétences (cf. Figure n°29).

Le projet "l'impact des éclaircies sur le risque de roulure" est né en juin 2005 de la rencontre avec le groupe de travail. A cette date, un **bilan** est établi à partir des **données bibliographiques** et de **l'étude de la roulure en Limousin** analysée durant l'année 2004. Face aux conclusions et au phénomène récurrent de la roulure, une nouvelle question se pose : « Quel est l'impact des éclaircies sur le risque de roulure ? ».

A l'issue de cette réunion, **deux rendez-vous** sont pris :

- Réunion du groupe de travail en **octobre 2005 à Prahecq (79)** afin d'établir les bases méthodologiques ;
- Réunion du groupe de travail en **novembre 2005 à Beaumont en Bienne (02)** afin d'établir les contours du protocole.

Les semaines suivant la réunion de juin 2005, nous avons bénéficié de **deux nouvelles études** nous faisant nettement progresser dans notre démarche :

- **L'étude de la roulure en Bretagne** (G. Pichard)
- **L'étude des propriétés mécaniques du châtaignier en lien avec la croissance** (Cousseau, Zürcher, 2005)

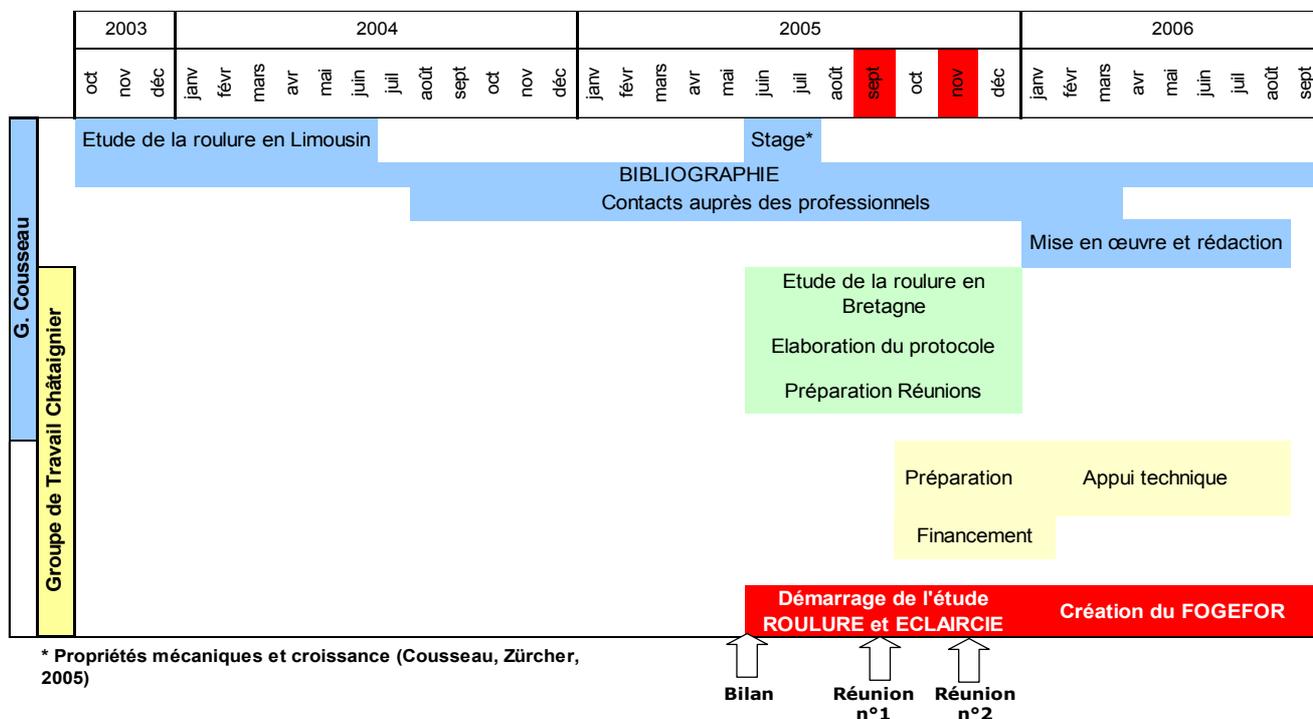


Figure n°29 : Les grandes étapes de la mise en œuvre du projet

L'impact des éclaircies tardives sur le risque d'apparition de la rou lure

Le projet est formalisé en janvier 2006 par la création d'un FOGEFOR de référence (Aisne) présidé par Mme Rosamé de Lacheisserie. Le FOGEFOR se compose de propriétaires et de techniciens forestiers (CRPF, indépendants...). Cette structure temporaire est en place pour une durée de 18 mois. Elle a bénéficié d'une somme de 6 500 € pour la mise en œuvre technique.

Pour mener à bien cette étude, **plus de 300 jours de travail ont été nécessaires**. L'analyse de l'étude en Bretagne et en Limousin n'est pas comptabilisée (environ 60 jours supplémentaires).

Tableau n°7 : Temps nécessaire à la réalisation du projet

Réunions préparatoires au projet	
CRPF	12 jours
Coopératives, experts, techniciens	4 jours
ONF, Université	3 jours
Total	19 jours
Prospection	
CRPF	18 jours
Coopératives, experts, techniciens	3 jours
ONF	1 jours
Total	22 jours
Préparation, suivi de l'étude et réalisation de l'étude	
SUF-IDF	35 jours
Stagiaire*	210 jours
Total	245 jours
Appuis techniques	
Bûcherons	15 jours
TOTAL	301 jours

* Etude bibliographique : 30 j + Préparation réunion : 20 j + Réalisation de l'étude : 160 j

Mais une telle étude a un coût. Le tableau suivant donne le détail du **coût réel** de l'étude. Ce dernier est évalué à environ 58 000 € (cf. Tableau n°8).

Moyens humains

Réunion préparatoire à l'étude	CRPF	10 500 €
	Coopératives, experts, techniciens	2 450 €
	ONF, Université	1 400 €
Prospection	CRPF	6 300 €
	Coopératives, experts, techniciens	1 050 €
	ONF, Université	350 €
Mise en œuvre de l'étude	SUF - IDF	12 250 €
	Stagiaire*	3 600 €
Appui technique	Bûcheron	3 000 €
TOTAL		40 900 €

*300 € par mois x 12

Tableau n°8 : Moyens humains et matériels nécessaires à la mise en œuvre du projet

Moyens matériels

Matériel d'étude	environ 500 arbres (172 m ³)	10 725 €
Logistic	Frais kilométriques (15 700 km) + Frais autoroutiers	4695 €
	Locations de matériel (Marteau à impulsion, resistograph©)	750 €
	Frais divers (Hôtel, Stockage des rondelles, prêts de tronçonneuse, etc)	1300 €
TOTAL		17 470 €

Le budget attribué à l'étude couvre seulement les frais de fonctionnement. **Ce projet a vu le jour et a pu être mené à son terme grâce à la volonté, la mise en commun des moyens de chacun et à la prise en charge financière des propriétaires de l'exploitation des bois et la perte induite par l'expérimentation.**

Partie E

Problématique et méthodologie

Problématique

Quel est l'impact des éclaircies sur le risque roulure ?

Les objectifs de l'étude

- **Comparer le taux de roulure dans les taillis éclaircis et non éclaircis ;**
- **Evaluer l'effet des à-coups de croissance engendrés par les éclaircies sur l'apparition de la roulure ;**
- **Evaluer les pertes économiques provoquées par la roulure ;**
- **Créer et de tester des outils permettant d'estimer la présence de roulure.**

1- Problématique et objectifs de l'étude

L'âge joue un rôle majeur dans le déterminisme de la roulure. On peut en minimiser les effets en préconisant la diminution de l'âge d'exploitabilité. Seulement, pour à la fois abaisser l'âge d'exploitabilité et répondre aux exigences du marché, qui tendent de plus en plus à la production de bois « étoffé », une sylviculture s'impose. Le passage en détourage ou en éclaircie est déterminant.

A ce jour, les éléments dont nous disposons au sujet du risque de roulures à l'issue des éclaircies sont peu nombreux (cf. Tableau n°5). La bibliographie nous apporte indirectement quelques réponses contradictoires. L'accroissement moyen des arbres sains est plus important que celui des arbres roulés. L'augmentation de l'accroissement est favorable à l'amélioration de la résistance mécanique radiale. Ainsi, ces conclusions vont en faveur des éclaircies.

En revanche, l'à-coup de croissance généré par un acte sylvicole semble localement augmenter le nombre de roulures (Fonti, 2003, Macchioni et *al*, 1996).

Afin d'optimiser le développement et la vulgarisation des techniques sylvicoles, il est nécessaire de mettre au clair leurs effets sur le risque de roulure.

Problématique

Ainsi, quel est l'impact des éclaircies sur le risque roulure ?

Les objectifs de l'étude

- De comparer le taux de roulure dans les taillis éclaircis et non éclaircis ;
- Evaluer l'effet des à-coups de croissance engendrés par les éclaircies sur l'apparition de la roulure ;
- Evaluer les pertes économiques provoquées par la roulure ;
- Créer et de tester des outils permettant d'estimer la présence de roulure.

La problématique et les objectifs décrits ci-dessus résultent non seulement des éléments bibliographiques rapportés précédemment mais aussi des discussions avec les professionnels de la filière. Les membres du Groupe de Travail National Châtaignier se sont investis à plusieurs reprises dans l'élaboration du protocole et de la définition de la stratégie d'échantillonnage.

Nota : Chaque placette est identifiée à l'aide d'un code composé de 5 caractères. Les deux premiers correspondent au numéro du département (79), puis les deux caractères suivant au numéro de la placette (02). Enfin, le code se termine par la lettre T ou E désignant le TEMOIN ou la placette ECLAIRCIE.

2- La stratégie d'échantillonnage

La définition de la stratégie d'échantillonnage a fait l'objet d'une réunion du Groupe de Travail National Châtaignier en octobre 2005 à Prahecq dans les Deux-Sèvres.

Afin de répondre à la problématique posée, « *Quel est l'impact de l'éclaircie sur le risque de roulure ?* », nous avons recherché des **COUPLES de placettes** :

- dont l'une est éclaircie fortement depuis au moins 10 ans et la seconde non éclaircie (le témoin) ;
- du même âge (plus ou moins 5 ans) ;
- sur la même gamme de fertilité ;
- géographiquement proche (moins de 2 km) ;
- avec une histoire sensiblement identique.

Les peuplements recherchés sont issus de **taillis**.

L'échantillonnage est complexe. **Peu de situations** répondent aux conditions fixées en France. En effet, à ce jour, la surface de peuplements éclaircis est faible.

De plus, afin d'effectuer des **comparaisons significatives**, l'échantillon est stratifié par **classes d'âge et par gammes de fertilité** (cf. Tableau n°9). En effet, la stratification de l'échantillonnage par classe d'âge et de fertilité se justifie par la littérature. L'âge est un facteur aggravant. Au-delà de 45-50 ans, le risque est majeur. La fertilité de la station prédispose fortement le risque de roulure comme nous le montre l'étude de Gilles Pichard en Bretagne. Les classes de fertilité sont définies à l'aide des courbes de fertilité établies par le SUF-IDF (cf. Figure n°5).

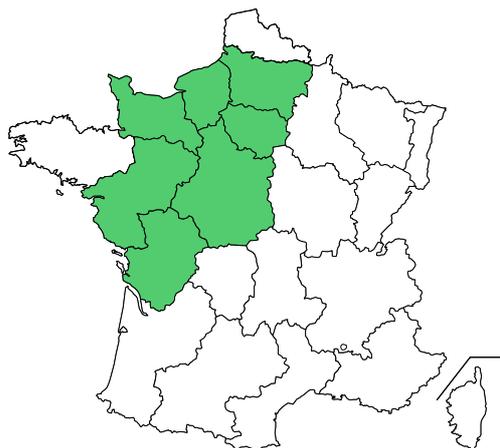
Tableau n°9 : Stratification théorique de l'échantillonnage

TOTAL = 12 couples		Indice de Fertilité	
		Bonne fertilité (Indice 1 et 2)	Fertilité moyenne (Indice 3 et 4)
Catégorie d'âge du taillis	30 – 45 ans	3 couples	3 couples
	45 ans et plus	3 couples	3 couples

Pour chaque strate, **3 répétitions sont exigées**. Le nombre total de couples à réaliser est de **12** (soit 24 placettes).

2.1- La zone d'étude

L'étude a porté sur le Nord-Ouest de la France où les potentialités du châtaignier sont les plus favorables à la production de bois étoffé (cf. Figure n°6). Elle couvre ainsi 7 régions (cf. Figure n°30). Grâce à la connaissance de terrain du personnel des CRPF et à l'aide des propriétaires du groupe de travail châtaignier, environ 30 sites potentiels ont été préalablement retenus. La première phase du projet fut consacrée à la prospection de ces sites à la recherche de couples répondants aux exigences précédemment fixées.

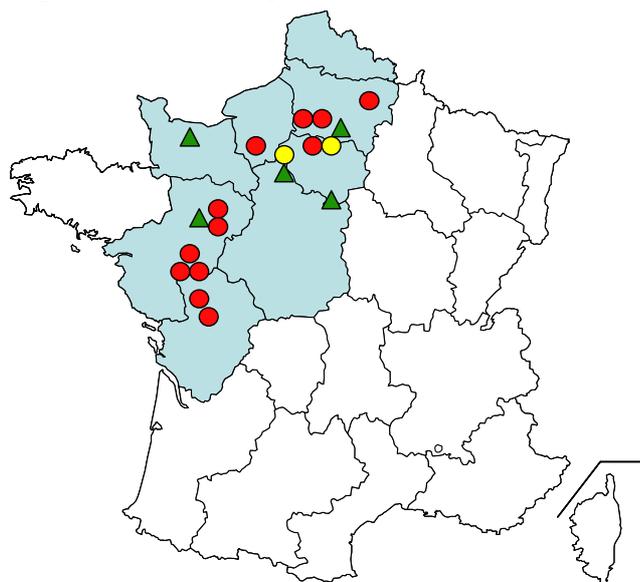


- Basse Normandie, Haute Normandie
- Centre et Ile de France
- Picardie
- Pays de Loire
- Poitou-Charentes

Figure n°30 : Couverture géographique de l'étude

2.2- Les peuplements retenus : 14 couples et 5 placettes

A l'issue de cette phase de prospection, 14 couples ont été retenus (cf. Figure n°31). 5 placettes expérimentales comportant une seule modalité (Témoin ou Eclaircie) s'y ajoutent.



- **Normandie** : 1 couple + 1 placette
- **Centre et Ile de France** : 3 couples + 2 placettes
- **Picardie, Nord Pas de Calais** : 3 couples + 1 placette
- **Pays de la Loire** : 5 couples + 1 placette
- **Poitou-Charentes** : 2 couples

- Couple complet, $n = 12$ soit 24 placettes
- Couple complet réalisé au marteau à impulsion, $n = 2$ soit 4 placettes
- ▲ Placette seule, $n = 5$ placettes

Figure n°31 : Bilan de la prospection et placettes retenues dans l'échantillonnage

2.3- Description des placettes étudiées

Tableau n°10 : Description des placettes étudiées

Code Placette	Couple	Sylviculture	Commune et DPT	Coordonnées X Lambert	Coordonnées Y Lambert	Age	Age de réclaircie	Densité en tiges/ha	Circonférence moyenne en cm	Proportion d'arbres roules	Humus
0201E	1	Eclaircie	Beaumont en Bienné (02)	659 148	2 520 294	66	41	167	111	47%	Eumoder
0201T	1	Témoin	Beaumont en Bienné (02)	657 575	2 521 742	57		818	76	45%	Eumoder
2701E	2	Eclaircie	Ecardenville sur Eure (27)	519 680,7	2 002 454,8	48	36	190	111	58%	Hemimoder
2701T	2	Témoin	Ecardenville sur Eure (27)	519 633,8	2 002 454,7	38		881	79	37%	Hemimoder
4901E	3	Eclaircie	Landes Chasles (49)	422 851,7	2 277 230,4	22	16	1 017	56	36%	Amphimull
4901T	3	Témoin	Landes Chasles (49)	422 900,8	2 277 178,9	23		1 615	53	20%	Amphimull
4902E	4	Eclaircie	Landes Chasles (49)	422 719,0	2 277 345,9	19	12	1 304	46	27%	Hemimoder
4902T	4	Témoin	Landes Chasles (49)	422 791,2	2 277 289,9	19		2 281	45	20%	Hemimoder
4903E	5	Eclaircie	Allonnes (49)	423 342,0	2 280 737,1	23	12	1 592	52	17%	Hemimoder
4903T	5	Témoin	Allonnes (49)	423 286,4	2 280 666,2	23		1 938	47	0%	Hemimoder
6002E G1*	6	Eclaircie	Senots (60)	575883	2 474 346	58	29	94	150	46%	Hemimoder
6001T	6	Témoin	Senots (60)	575731	2 473 703	53		1 273	77	20%	Amphimull
6002E G2*	7	Eclaircie	Senots (60)	575883	2 474 346	29	10	553	61	23%	Hemimoder
6002T G2*	7	Témoin	Senots (60)	575837	2 474 428	29		1 149	48	0%	Dysnull
7201E	8	Eclaircie	Parcé sur Sarthe (72)	412 285,7	2 318 516,1	42	30	545	79	40%	Hemimoder
7203T	8	Témoin	Durtal (72)	403 781,2	2 308 283,6	44		1 330	68	19%	Hemimoder
7202E	9	Eclaircie	Parcé sur Sarthe (72)	411 499,7	2 318 473,1	27	14	905	50	43%	Hemimoder
7202T	9	Témoin	Parcé sur Sarthe (72)	411 366,7	2 318 585,2	23		4 313	42	10%	Hemimoder
7901E G2*	10	Eclaircie	Chantemerle (79)	373 791,9	2 188 705,7	44	22	144	84	100%	Eumoder
7901T	10	Témoin	Chantemerle (79)	373 667,7	2 188 766,6	44		1 754	59	100%	Eumoder
7902E	11	Eclaircie	Château Bourdin (79)			29	15	825	61	65%	Eumoder
7902T	11	Témoin	Château Bourdin (79)			32		1 790	49	33%	Eumoder
9501E	12	Eclaircie	Chauvry (95)	595 629,6	1 148 958,4	64	43	305	118	65%	Amphimull
9501T	12	Témoin	Chauvry (95)	596 318,9	1 148 762,6	70		1 196	83	67%	Dysnull
9502E	13	Eclaircie	Chauvry (95)	593 612,0	1 148 385,3	52	44	300	98	65%	Eumoder
9502T	13	Témoin	Chauvry (95)	593 473,9	1 148 436,2	55		1 041	83	57%	Eumoder
9503E	14	Eclaircie	Gérocourt (95)	579 806,2	1 156 146,9	60	35	406	102	5%	Eumull
9503T	14	Témoin	Gérocourt (95)	579 565,6	1 156 881,7	60		1 202	81	5%	Eumull
1401E	P15	Eclaircie	St Gatien des bois (14)	442 446,1	1 184 383,1	39	19	381	93	90%	Eumoder
4904E	P16	Eclaircie	Allonnes (49)	423 376,1	2 260 780,1	22	11	1 943	46	33%	Dysmoder
6001E	P17	Eclaircie	Senots (60)	575 467,00	2 473 615,00	62	33	106	140	75%	Hemimoder
6003E	P18	Eclaircie	Blainquourt les Précy (60)	600 463,9	1 171 420,9	63	37	144	123	56%	Dysnull
6002T G1*	P19	Eclaircie	Senots (60)	575 837,00	2 474 428,00	62	33	124	138	40%	Dysnull
7201T	P20	Témoin	Parcé sur Sarthe (72)	412 605,5	2 319 115,4	58		793	83	45%	Hemimoder
7801E	P21	Eclaircie	Montalet le bois (78)	563 584,8	1 150 376,7	64	35	28	179	100%	Dysnull
7901E G1*	P22	Eclaircie	Chantemerle (79)	373 791,9	2 188 705,7	62	40	55	91	76%	Eumoder
9101E	P23	Eclaircie	Dannemois (91)			57	47	231	99	33%	Mésomull

G1/G2* : Pour un certain nombre de peuplement, on distingue deux générations (G1 : Arbres de première génération, G2 : Arbres de seconde génération)

2.4- Validité de l'échantillonnage

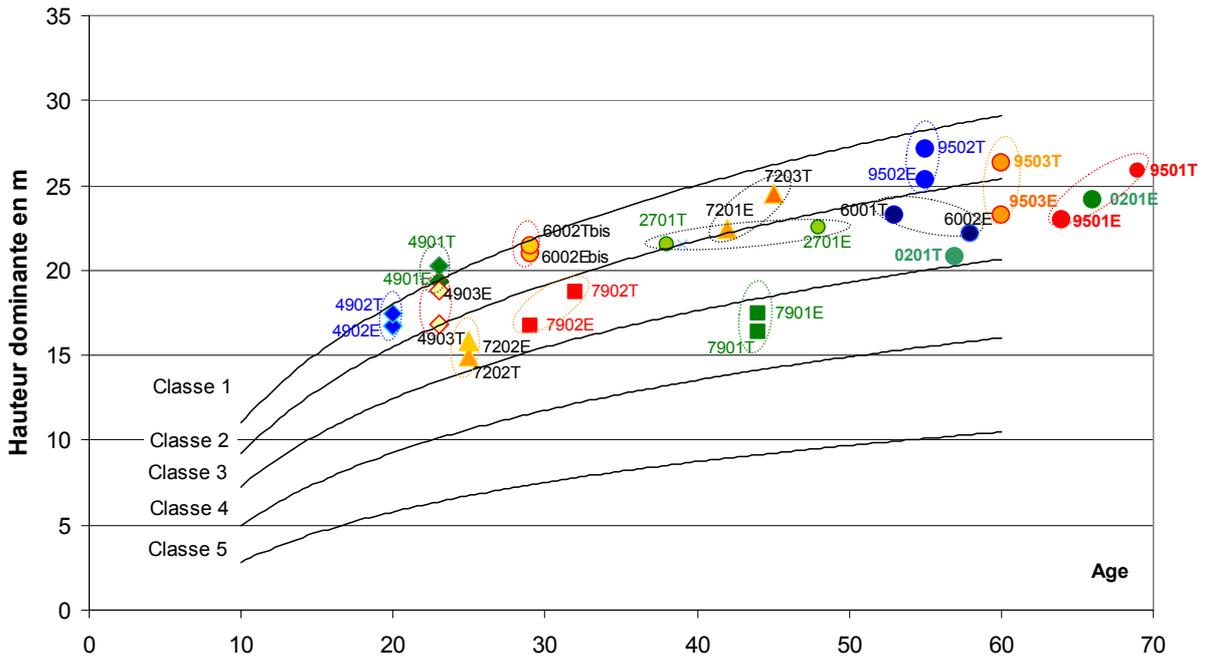


Figure n°32 : Situation des couples étudiés en fonction de l'âge et des indices de fertilité. Les points encadrés constituent à un couple.

La figure n°32 montre la répartition des couples en fonction de l'âge et de la fertilité de la station. La validité du couple est d'autant plus forte que les deux placettes le composant sont proches. Deux couples sont situés en limite de validité en raison de la différence d'âge : 0201T/0201E et 2701T/2701E. **12 couples répondent précisément aux exigences précédemment fixées.** La distance séparant deux placettes est systématiquement inférieure à 500 m sauf pour le couple 8 (7203T/7201E) où les placettes sont séparées de 8 km.

La hauteur dominante du peuplement éclairci est systématiquement inférieure à celle du peuplement témoin en raison de l'effet de l'éclaircie sur la croissance en hauteur.

Tableau n°11 : Comparaison entre l'échantillonnage réel et l'échantillonnage théorique

TOTAL = 14 couples		Indice de Fertilité	
		Bonne fertilité (Indice 1 et 2)	Fertilité moyenne (Indice 3 et 4)
Catégorie d'âge du taillis	30 – 45 ans	4 couples (Théorique : 3 couples)	3 couples (Théorique : 3 couples)
	45 ans et plus	3 couples (Théorique : 3 couples)	4 couples (Théorique : 3 couples)

L'échantillonnage observé est en adéquation avec l'échantillonnage théorique discuté préalablement (cf. Tableau n°11). Les différentes strates de l'échantillon contiennent au moins 3 couples. Le nombre de couples obtenus dépasse les objectifs fixés.

2.5- Les limites de l'échantillonnage

La limite majeure de l'échantillonnage est l'âge auquel les éclaircies ont été réalisées. En effet, dans les peuplements de plus de 20 ans, les éclaircies sont systématiquement tardives (cf. Figure n°33). Rappelons que la première éclaircie est préconisée entre 8 et 15 ans.

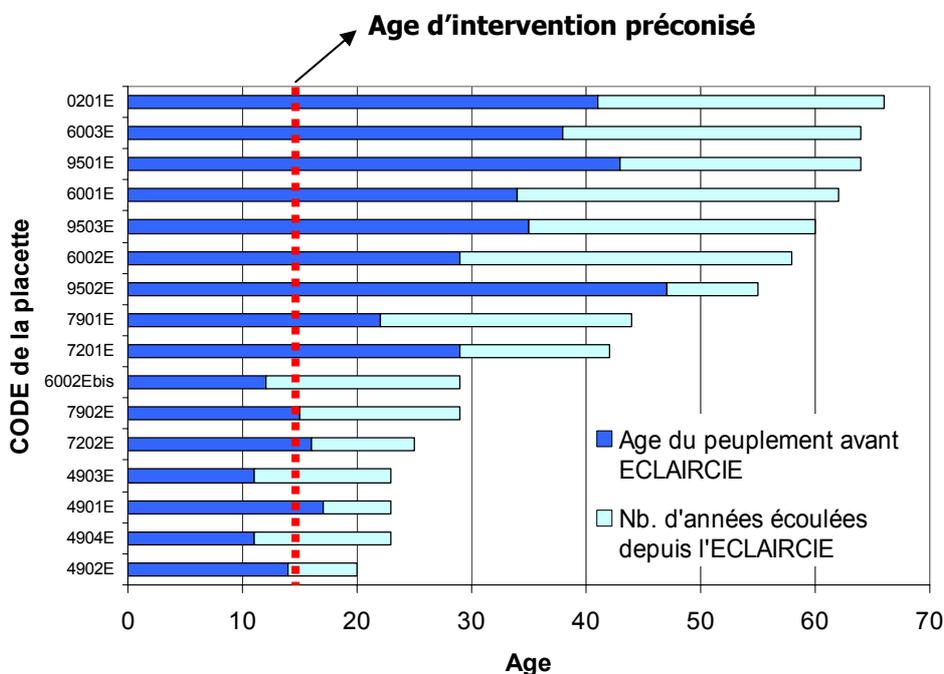


Figure n°33 : Les limites de l'échantillonnage : l'âge de l'éclaircie. En rouge figure la limite de passage en première éclaircie.

Les peuplements de plus de 45 ans ont connu une sylviculture techniquement obsolète. Seulement, aujourd'hui, il n'existe pas, sauf rare exception, de peuplements de plus de 45 ans éclaircis avant l'âge de 15 ans. Il nous faudrait attendre **15-20 ans** avant d'obtenir et d'étudier ce type de peuplement.

Pour les peuplements de moins de 45 ans, les éclaircies ont eu lieu entre 12 et 20 ans. Malgré un certain retard par rapport aux itinéraires préconisés (10 à 15 ans), elles restent techniquement viables.

Au sein d'un même peuplement, il peut y avoir une variation importante de l'âge des arbres alors que la structure paraît parfaitement homogène (plus ou moins 10-15 ans).

De plus, les variations stationnelles au sein d'une même parcelle sont parfois rapides.

3- La protocole

La définition du protocole a aussi fait l'objet d'une réunion du Groupe de Travail National Châtaignier en décembre 2005 à Beaumont en Bienné dans l'Aisne.

3.1- Principes généraux

Une fois les placettes identifiées et repérées, les mesures peuvent démarrer. Une placette se réalise en quatre étapes. 3 jours de travail sont nécessaires par placette (cf. Figure n°34).

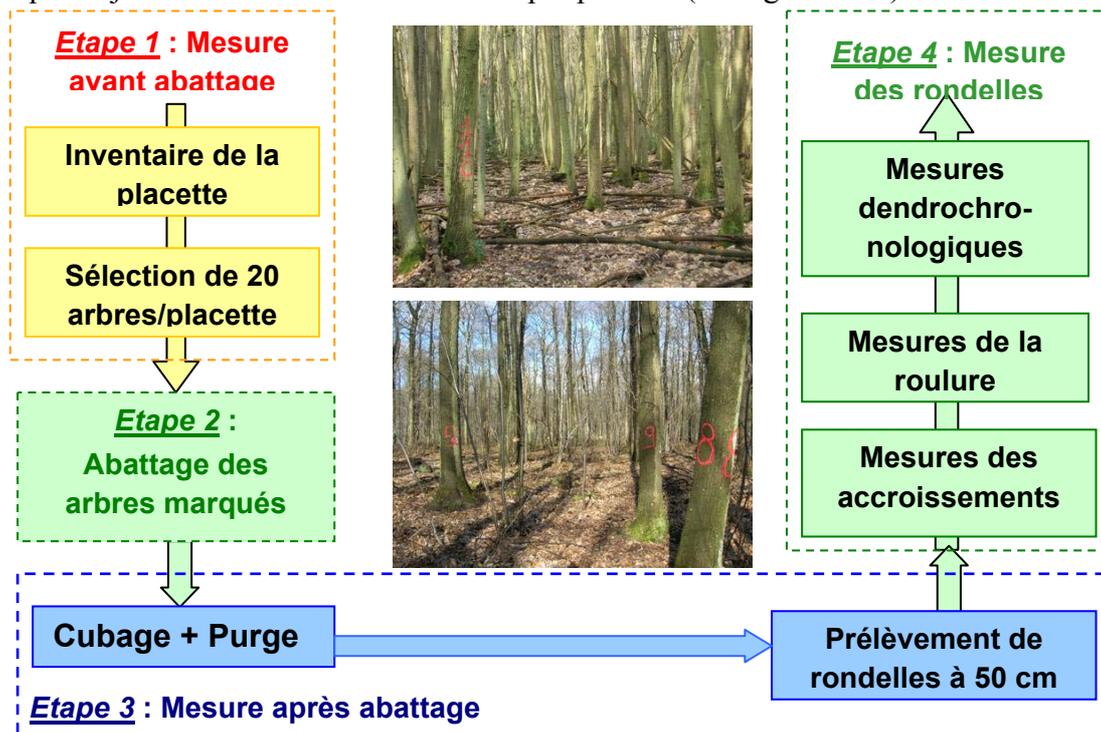


Figure n°34 : Les grandes étapes du protocole

3.2- Les mesures avant abattage

La surface de la placette est adaptée aux caractéristiques du peuplement. Chaque placette doit contenir au moins 20 cépées et au moins 40 tiges. La **circonférence** à 1,3 m est mesurée pour chaque tige. La **hauteur dominante** est relevée sur les n plus gros arbres de la placette ($n = \text{surface de la placette en m}^2 / 100$).

La **station** est décrite à partir du renseignement de l'altitude, de l'exposition, de la pente et de la topographie. Un inventaire floristique exhaustif et une fosse pédologique sont réalisés. Les données floristiques sont analysées avec le logiciel ECOFLORE© (Bartoli, 2000). Il permet de définir le gradient trophique (XEcoflore) et hydrique (YEcoflore) de la station.

3.3- Désignation et abattage des tiges

10 ou 20 tiges sont abattues par placette. Elles sont désignées au hasard et doivent être représentatives du peuplement. Par cépée, une seule tige est prélevée.

Dans la mesure du possible, un délai d'au moins une semaine s'écoule entre l'abattage et la purge. L'abattage est pris en charge soit par un(e) exploitant/coopérative, soit par un propriétaire ou bien encore en régie.

3.4– Cubage et purge

Chaque tige abattue est cubée et purgée (cf. Figure n°35). La longueur, le diamètre fin bout et le diamètre médian de la grume sont mesurés. La bille de pied est purgée. Pour chaque grume abattue, **une rondelle est prélevée à 50 cm du sol. 434 rondelles sont à ce jour disponibles et stockées.**

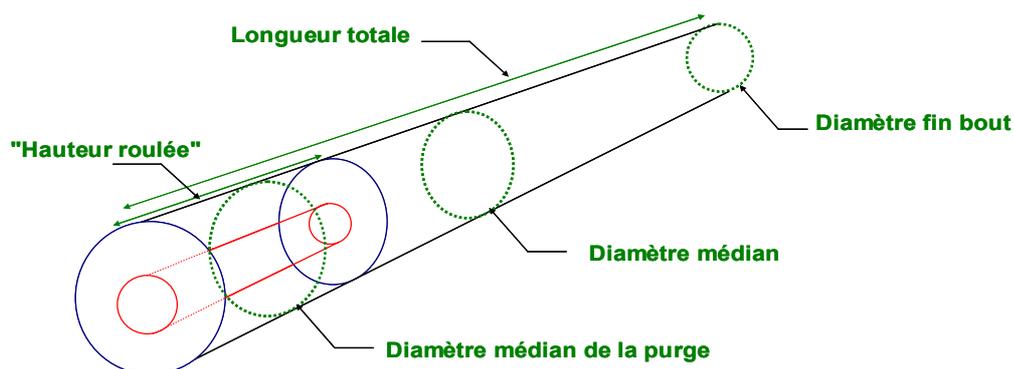


Figure n°35 : Le cubage de la grume et mesure de la purge

3.5– Mesures des rondelles

3.5.1– Mesures de la roulore

Pour chacune rondelle disponible, on a noté la **présence ou l'absence** de roulores, leurs **origines** (saine ou traumatique), le **nombre**, **l'angle**, **la distance au coeur** ainsi que leurs **années d'apparition** (cf. Figure n°36).

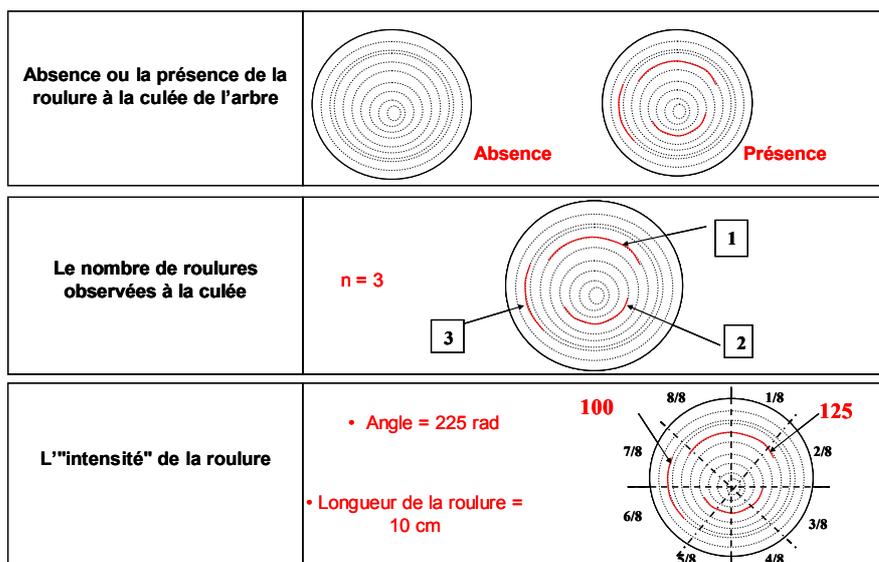
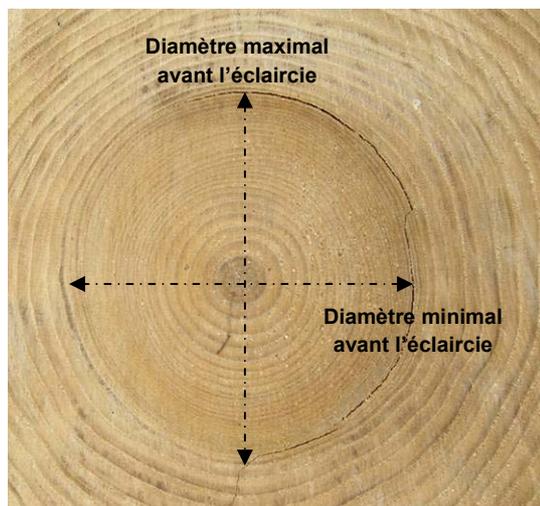


Figure n°36 : Les indicateurs de la roulore

3.5.2– Mesures des accroissements

Pour chacune des rondelles issues des peuplements éclaircis, le diamètre de l'arbre avant éclairci est mesuré (cf. Figure n°37). De plus, la largeur des 5 cerne précédent et succédant l'éclaircie est mesurée. On définit ainsi l'à-coup de croissance : Accroissement 5 **après** éclaircie / Accroissement 5 **avant** éclaircie.



NOTA : A-coup de croissance = Largeur APRES éclaircie / Largeur AVANT éclaircie soit 35/12

Figure n°37 : Définition de l'à-coup de croissance sur les arbres éclaircis.

3.5.3– Les mesures dendrochronologiques

89 individus ont fait l'objet d'une analyse dendrochronologique. Ces arbres sont issus de **10 couples**. Au sein de **chaque placette, 3 ou 4 tiges sont sélectionnées**. Un ou deux individus appartiennent à la classe des arbres moyens, un autre à la classe des dominants et le dernier à la classe des dominés.

La largeur de cerne est mesurée suivant quatre rayons à l'aide d'une chaîne de mesures prêtée par l'INRA-Champenoux.

3.6- Les limites du protocole

En raison de la diversité des situations rencontrées, le protocole a souvent été réajusté aux réalités de terrain. De nombreux obstacles s'opposent à l'évaluation de la roulure.

La purge est la variable la plus difficile à mesurer :

- la valeur de certains bois, même roulés, limite la purge ;
- même purgé, la roulure peut réapparaître.

La lisibilité de la roulure sur la rondelle est parfois mauvaise (zone de compression...). Le décollement peut être présent sur la rondelle mais non détectable à l'œil nu. Les roulures peuvent se refermer durant le séchage. La distinction roulure "saine" et "traumatique" n'est pas aussi évidente que le laisse suggérer la définition. La précision diminue lorsque le nombre de roulures augmente.

La difficulté majeure reste la coordination avec l'ensemble des interlocuteurs. La réalisation complète du protocole n'a pas pu aboutir dans tous les cas.

4- Jeu de données disponibles

Au regard des limites du protocole, le jeu de données n'est pas complet. Le tableau suivant fait l'état des variables disponibles (cf. Tableau n°12) :

Tableau n°12 : Jeu de données disponibles

Placette	Nombre d'arbres désignés	Nombre de rondelles disponibles	Nombre d'arbres mesurés en dendrochronologie	Variables dendrométriques		Observations de la roulure			Variables stationnelles	
				G, N, Ho ¹ ...	Cubage	Ou ²	Purge	Fiabilité de la purge ³	Fosse	Vegetation
0201E	20	20	4	O	O	RON	O	++	O	O
0201T	22	22	4	O	O	RON	O	++	O	O
2701E	19	-	-	O	O	Culée	N	0	O	O
2701T	19	-	-	O	O	Culée	N	0	O	O
4901E	11	11	4	O	O	RON	O	+++	O	O
4901T	10	10	4	O	O	RON	O	+++	O	O
4902E	11	11	4	O	O	RON	O	+++	O	O
4902T	10	10	3	O	O	RON	O	+++	O	O
4903E	12	12	2	O	O	RON	O	+++	O	O
4903T	10	10	4	O	O	RON	O	+++	O	O
6002E G1	9	9	4	O	O	RON	O	++	O	O
6001T	20	20	4	O	O	RON	O	++	O	O
6002E G2	13	13	4	O	O	RON	O	++	O	O
6002T G2	14	14	4	O	O	RON	O	++	O	O
7201E	20	20	4	O	O	RON	O	++	O	O
7203T	21	21	4	O	O	RON	O	+++	O	O
7202E	21	21	4	O	O	RON	O	++	O	O
7202T	20	20	4	O	O	RON	O	++	O	O
7901E G2	20	5	-	O	O	RON	N	+	O	O
7901T	20	5	-	O	O	RON	N	+	O	O
7902E	17	17	4	O	O	RON	O	+++	O	O
7902T	21	21	5	O	O	RON	O	+++	O	O
9501E	20	20	4	O	O	RON	O	+++	O	O
9501T	21	21	4	O	O	RON	O	+++	O	O
9502E	20	-	-	O	N	Marteau	N	0	O	O
9502T	21	-	-	O	N	Marteau	N	0	O	O
9503E	20	-	-	O	N	Marteau	N	0	O	O
9503T	21	-	-	O	N	Marteau	N	0	O	O
1401E	20	20	-	O	O	RON	O	++	O	O
4904E	12	12	4	O	O	RON	O	+++	O	O
6001E	20	20	4	O	O	RON	O	++	O	O
6003E	19	19	-	O	O	RON	O	+++	O	N
6002T G1	10	10	-	O	O	RON	O	++	O	O
7201T	20	20	3	O	O	RON	O	++	O	O
7801E	40	-	-	O	O	Culée	O	+++	O	N
7901E G1	-	-	-	O	O	RON	N	+	O	O
9101E	37	-	-	O	O	Culée	N	+	O	O
TOTAL	37	661	434	89	37	33	27	37	35	

1 : "O": Oui, Données disponibles, "N", Données non disponibles

2 : "RON" : Notation de la roulure sur les rondelles, "Culée" : Observation de la roulure sur le terrain à partir de l'observation des culées, "Marteau" : Evaluation de la roulure à l'aide du marteau à impulsion

3 : "0": Données non disponibles, "+" Purge incomplète, "++" Purge quasi complète, "+++": Purge totale

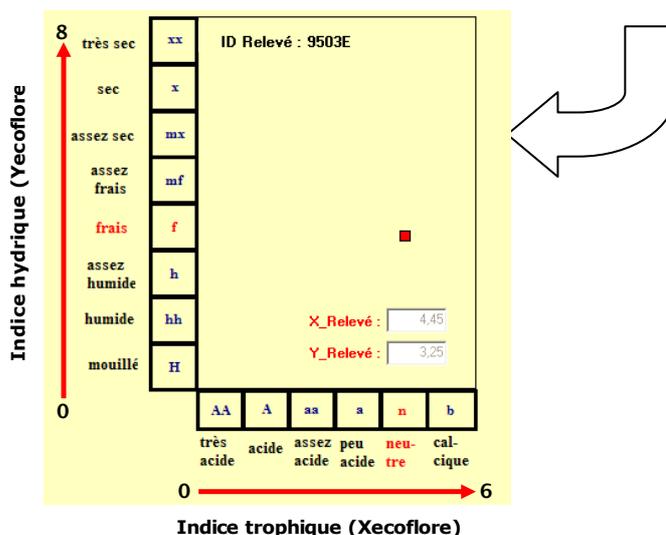
5- Traitement des données

5.1 – Détermination de l'indice trophique et hydrique de la station

L'utilisation de la hauteur dominante (et des courbes de fertilité) n'est pas pertinente dans le cadre de cette étude. En effet, les courbes de fertilité sont établies pour des peuplements non éclaircis. Ainsi, les indices trophiques et hydriques de la station seront calculés à l'aide de la flore. Nous avons utilisé le logiciel ECOFLORE (Bartoli, Tran han, 2001). Chaque plante est définie par son caractère indicateur. Le logiciel en question fait la synthèse des "caractères indicateurs" des plantes d'un même relevé. On en déduit ainsi l'indice trophique et hydrique de la station (cf. Figure n°38).

Nom latin	Nom français	Recouvrement	Libellé	X0	Y0
<i>Rubus groupe fruticosus</i>	Ronce des bois	1	Acidiphiles de moder mésophiles	0.5	4
<i>Lonicera peryclimenum</i>	Chèvrefeuille des bois	+	Acidiclines de mull oligotrophe mésophiles	1.5	3.5
<i>Rubus groupe fruticosus</i>	Ronce des bois	1	Acidiclines de mull mésotrophe mésophiles	2.5	3.5
<i>Mercurialis perennis</i>	Mercuriale pérenne	1	Neutrocalcicoles	4	3
<i>Fraxinus excelsior</i>	Frêne commun	1	Neutronitroclines hygroclines	3.5	2
<i>Galium mollugo</i>	Gaillet mollugine	3	Neutronitroclines mésophiles	3.5	3.5
<i>Sambucus nigra</i>	Sureau noir	3	Neutronitrophiles hygroclines	3.5	2
<i>Anemone nemorosa</i>	Anémone des bois	4	Espèces à très large amplitude	0.5	3
<i>Crataegus laevigata</i>	Aubépine épineuse	1	Neutroclines à large et moyenne amplitudes	1.5	3
<i>Prunus avium</i>	Merisier	1	Neutroclines à large et moyenne amplitudes	1.5	3
<i>Acer pseudoplatanus a</i>	Erable sycomore a	1	Neutroclines à large et moyenne amplitudes	1.5	3

Figure n°38 : Détermination de la fertilité de la station à l'aide de la flore. Exemple de la placette 9503E



L'indice trophique de la station est compris entre 0 (station très acide) et 6 (station calci-que). L'indice hydrique quant à lui est compris entre 0 (station mouillée) et 8 (station très sèche).

5.2- Traitements statistiques

L'ensemble des variables a été analysée à l'aide des logiciels d'analyses statistiques : Spad, Systat V11, Statistica.

La démarche utilisée est la démarche statistique classique :

- Analyses multi-variées
- Statistiques descriptives
- Régressions linéaires multiples

5.3– Evaluation financière

L'évaluation financière de la parcelle et l'estimation de la perte induite par la roulure sont des points fondamentaux de l'étude. Le tableau ci-dessous (cf. Tableau n°13) fait figurer les prix attribués aux différentes classes de circonférence. La qualité intrinsèque de la grume n'est pas prise en compte. Ce sont des prix moyens indicatifs utilisés comme référence. **Les disparités régionales ne sont pas prises en compte.**

Tableau n°13 : Grille de prix pour l'évaluation financière de bois sur pied non roulé

Classe de circonférence de l'arbre en cm	Prix unitaire en €/m ³
>150	100
120-150	70
90-120	50
60-90	10
<60	2

La valeur de la grume après purge est re-calculée à partir du diamètre fin bout de la purge.

5.4 –Présentation des résultats

Les probabilités associées aux tests statistiques sont signalées. Le nom du test et sa validité statistique figure de la façon suivante :

- NS : Test non significatif
- * : Test significatif au seuil de 5% ("*Assez bonne fiabilité*")
- ** : Test significatif au seuil de 1% ("*Bonne fiabilité*")
- *** : Test significatif au seuil à 0,1% ("*Très bonne fiabilité*")

Seul les résultats significatifs sont présentés.

Partie F

Les résultats

Les résultats issus de l'étude sont organisés de la façon suivante :

Etape n°1

L'effet de l'âge et de la station sur le risque de rou lure

Etape n°2

L'effet des éclaircies sur le risque de rou lure

Etape n°3

L'effet de l'à-coup de croissance et définition de seuil de risque

Etape n°4

Distribution de la rou lure dans l'arbre et modification induite par l'éclaircie

Etape n°5

Les outils d'évaluation de la rou lure

Etape n°6

Les itinéraires sylvicoles et analyse technico-économique

Etape n°7

Evaluation du risque de la rou lure à l'aide du marteau à impulsion, du résistographe et de l'oreille

1- Les facteurs pré-disposants la roulore

Dans cette partie, nous étudierons le risque de roulore à l'échelle du peuplement.

1.1- Les facteurs stationnels

1.1.1- Les corrélations

Tableau n°14 : Tableau de corrélations ; Influence des paramètres stationnels sur le risque de roulore – Test de corrélations de Pearson + Test de Bonferonni (Toutes placettes confondues, n=33)

Variables	Proportion d'arbres roulés	Hauteur de purge	Proportion de volume roulé
Xecoflore	-0.56*	-0.31	-0.47
Yecoflore	0.38	0.20	0.31
Altitude	0.67*	0.54	0.55*
Pente	-0.32	-0.25	-0.19
Humus	0.44	0.13	0.28
Topographie	-0.53	-0.45	-0.37
Prof. De sol	-0.12	-0.11	-0.02
Texture de l'Hz1	0.25	0.15	0.07

Nota : L'indice de fertilité a été écarté. En effet, cet indice devient obsolète en la présence des peuplements éclaircis.

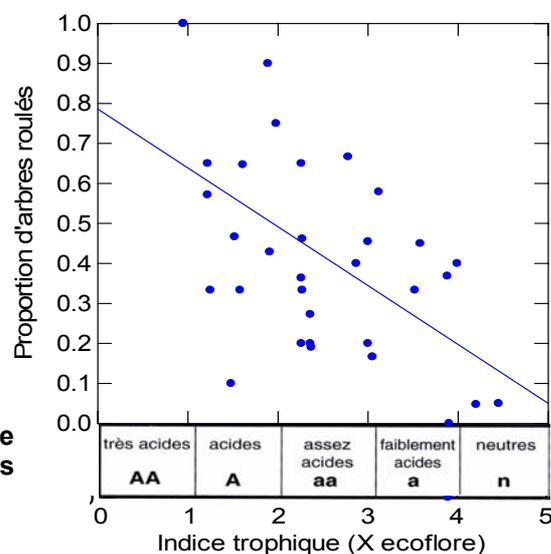
Parmi l'ensemble des facteurs stationnels étudiés, deux seulement sont corrélés au risque de roulore : **l'indice trophique (Xecoflore)** et l'altitude (cf. Tableau n°14).

La corrélation entre la roulore et l'altitude résulte d'un artéfact d'échantillonnage. En effet, les peuplements les plus âgés, donc *a priori* les plus roulés, se situent à une altitude légèrement supérieure (150-200 m) aux jeunes peuplements (50-150 m).

1.1.2- L'indice trophique de la station

En revanche, il existe une **relation nette entre le risque de roulore et le niveau trophique** de la station évalué à l'aide de la flore. En effet, toutes placettes confondues, **la proportion d'arbres roulés est inversement corrélée à l'acidité de la station** (cf. Figure n°39).

Figure n°39 : L'influence de l'indice trophique sur le risque de roulore (P<5%) (Toutes placettes confondues, n=33)



L'exemple ci-dessous fait figurer, pour les peuplements de moins et de plus de 45 ans, la position de la placette dans le diagramme écologique et la proportion de roulore pour chacune d'elles (cf. Figure n°40).

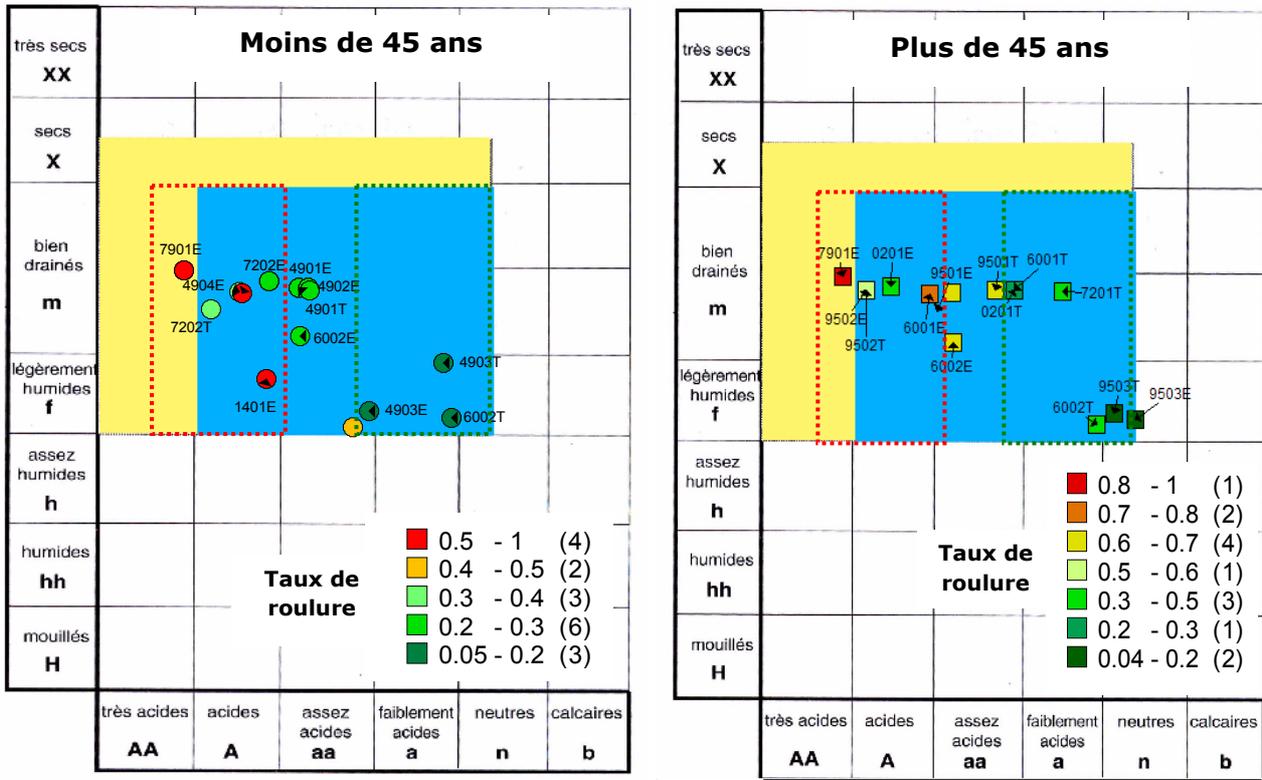


Figure n°40 : Répartition du taux de roulore en fonction du gradient trophique de la station. Nota : l'amplitude des classes « Taux de roulore » est différente suivant l'âge considéré.

Les stations « acides » et « très acides » engendrent une forte sensibilité à la roulore. Le taux de roulore dépasse déjà 30% pour les peuplements de moins de 45 ans. A l'inverse, les peuplements installés sur les stations « faiblement acides » et « neutres » sont peu sensibles à la roulore. Le taux de roulore n'excède pas 20% au sein des peuplements de moins de 45 ans et 30% au sein des peuplements de plus de 45 ans. Le taux de roulore parmi les stations de fertilité intermédiaire, c'est-à-dire les stations « assez acides », oscille entre 30 et 40% pour les jeunes peuplements (moins de 45 ans) et 50 et 60% pour les peuplements âgés (plus de 45 ans).

Une relation équivalente fut mise en évidence en Bretagne d'après l'étude de Gilles Pichard à partir des humus.

L'effet de la fertilité de la station sur le risque de roulore est souvent cité dans la littérature. Seulement, la démonstration a échoué à plusieurs reprises. D'après la présente étude, l'effet de la fertilité de station est démontré et quantifié.

La fertilité de la station influence la roulore. La proportion d'arbres roulés augmente lorsque l'indice trophique diminue (ou l'acidité augmente).

1.2- L'influence des paramètres dendrométriques

1.2.1- Les corrélations

Tableau n°15 : Influence des paramètres dendrométriques sur le risque de roulure – Test de corrélations de Pearson + Test de Bonferonni (n=33)

Variables	Proportion d'arbres roulés	Hauteur de purge	Proportion de volume roulé
Age	0.40923	0.1739	0.06732
Densité	-0.48696*	-0.29943	-0.12196
Surface terrière en m ² /ha	-0.35165	-0.27099	-0.14517
Circonférence moyenne en cm	0.47171*	0.23841	0.01558
Volume/ha en m ³ /ha	-0.34399	-0.2656	-0.23038
Elancement Ho/Dg*	-0.59401**	-0.48165*	-0.29325
* Acct. Moyen en circonférence en cm/an	0.02193	0.07478	-0.14539

Nota : Ho : Hauteur dominante (hauteur totale des 100 plus gros arbres/ha), Dg : Diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne. Le rapport Ho/Dg nous informe sur la stabilité du peuplement (Ho/Dg > 100 : "Instabilité", Ho/Dg < 80 : "Bonne stabilité")

Plusieurs variables sont corrélées à la roulure (cf. Tableau n°15) : la densité, la circonférence moyenne ou bien encore le coefficient d'élancement (Ho/Dg).

1.2.2- L'influence de l'âge

Toutes placettes confondues (n=33), il n'y a pas de corrélation statistiquement significative entre l'âge et la proportion d'arbres roulés (P = 0,11). La lecture attentive du graphique nous montre que les deux couples situés en dehors du nuage de points sont aussi aux extrêmes stationnels (cf. Figure n°41). Ces deux derniers, couple 9503 et 7901 respectivement situés sur la station la plus fertile (Indice trophique 4 d'après Xecoflore) et la moins fertile (Indice trophique 1 d'après Xecoflore), ont une influence marquée sur l'analyse statistique. Leurs réponses aux effets de l'âge sont atypiques.

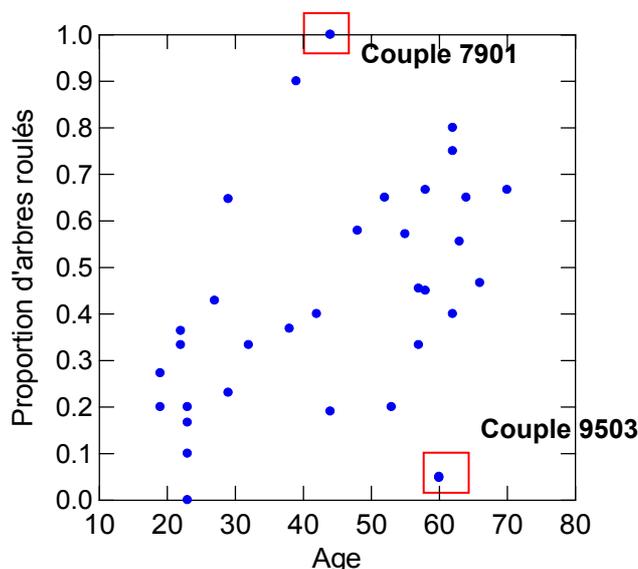


Figure n°41 : L'influence de l'âge sur le risque de roulure (P = 0,11 NS, n=33)

1.2.5- Conclusion et discussion

L'effet de la station sur la proportion d'arbres roulés est clairement démontré. L'acidification de la station prédispose à la roulure. L'indice trophique déterminé à l'aide de la flore permet de quantifier le risque de roulure pour une gamme d'âge donné. Dans la zone d'étude, l'observation de la flore nous renseigne assez précisément du risque potentiel de roulure. **Un outil d'évaluation de la roulure à partir d'observations floristiques se dessine.**

Pour une gamme de fertilité donnée, en dehors des extrêmes stationnels, l'effet de l'âge est à nouveau mis en évidence. **Le risque de roulure augmente avec le vieillissement du peuplement.** C'est un fait reconnu et rapporté par la bibliographie.

La relation entre la roulure et certains paramètres dendrométriques directement liés à la sylviculture laisse envisager un effet de l'éclaircie. Cette hypothèse est développée dans les prochains paragraphes.

L'influence de l'âge et de la fertilité sur le risque de roulure est décrite. Seulement, cela n'explique toujours pas en quoi ces deux facteurs sont respectivement des facteurs aggravants et des facteurs prédisposants.

En quoi l'âge favorise-t-il l'apparition de la roulure ?

Plusieurs hypothèses sont envisageables. Les forces subies et auto générées par l'arbre augmentent avec à l'âge. On peut aussi faire l'hypothèse que la résistance de la structure diminue avec l'âge. Cela signifierait une modification du fonctionnement physiologique de l'arbre au cours de son vieillissement. Il pourrait ainsi y avoir conjonction de ces deux phénomènes : l'augmentation des contraintes internes puis la diminution de la résistance du matériau subissant ces forces. Ces interactions pourraient expliquer l'augmentation de la roulure avec l'âge. Dans la suite du présent rapport, quelques éléments seront apportés en ce sens.

De la même façon, en quoi l'acidification de la station favorise-t-il l'apparition de roulure ?

Parmi les hypothèses possibles, nous retiendrons l'une d'elles déjà développée dans la littérature par l'Université de Limoges au sujet de la nutrition calcique (Verger, 1994). Au-delà de la carence en calcium, on peut faire l'hypothèse que la carence minérale d'un sol induit une modification et diminution de la cohésion des structures cellulaires. Les contraintes internes de l'arbre s'exercent sur un matériau mécaniquement faible provoquant ainsi la forte proportion de roulures au sein des stations peu fertiles.

2- Quelle est l'influence de la sylviculture ?

Comme nous le montre les précédents paragraphes, la roulure est liée à plusieurs indicateurs sylvicoles ; densité, circonférence moyenne, coefficient d'élanement.

2.1- Description du jeu de données

En raison de la structure de l'échantillonnage (faible effectif notamment), l'analyse statistique est délicate. Avant son utilisation, la simple observation du jeu de données nous fournit de précieuses informations (cf. Tableau n°16).

Tableau n°16 : Comparaison du risque de roulure au sein de chaque couple (n=28, 14 couples)

Couple	Placette	Taux de roulure dans le peuplement ...		Différence Eclairci-Témoin (Tri décroissant)	Caractéristiques des couples
		...Eclairci	...Témoin		
9	7202E/7202T	43%	10%	33%	Fertilité moyenne
11	7902E/7902T	65%	33%	32%	
7	6002EG2/6002TG2	23%	0%	23%	
8	7201E/7203T	40%	19%	21%	
2	2701E/2701T	58%	37%	21%	
6	6002TG1/6001T	40%	20%	20%	
5	4903E/4903T	17%	0%	17%	
3	4901E/4901T	36%	20%	16%	
4	4902E/4902T	27%	20%	7%	
13	9502E/9502T	65%	57%	8%	Eclaircie au-delà de 40 ans
1	0201E/0201T	47%	45%	2%	
12	9501E/9501T	65%	67%	-2%	
10	7901EG2/7901T	100%	100%	0%	Peuplement en limite stationnelle
14	9503E/9503T	5%	5%	0%	

Hormis le couple 12 (9501E/9501T), la proportion de roulure dans les peuplements éclaircis est toujours supérieure ou égale à la proportion de roulure des peuplements témoins.

Ainsi, l'éclaircie ne permet pas de diminuer le risque de roulure mais l'augmente.

La différence la plus importante entre l'éclaircie et le témoin s'observe pour les peuplements installés sur les stations de fertilité moyenne à médiocre (couples 9 et 11). Elle dépasse 30%.

L'impact des éclaircies tardives sur le risque d'apparition de la roulure

Pour trois couples (1, 12 et 13), la différence observée entre les deux modes sylvicoles est très faible. Il s'avère que ces trois peuplements sont ceux à avoir "bénéficiés" d'une éclaircie au-delà de 40 ans.

Les couples 10 (7901E/7901T) et 14 (9503E/9503T) ont un comportement atypique. Ils sont tout deux situés aux extrêmes stationnels. La proportion de roulure est équivalente entre les témoins et les peuplements éclaircis. Ces placettes sont retirées du jeu de données en raison de leurs situations stationnelles extrêmes.

La première étape descriptive nous permet d'envisager un effet marqué de l'éclaircie sur le risque de roulure. La seconde étape est la validation statistique de ces premières observations.

2.2- L'impact des éclaircies sur le risque de roulure

Les observations précédentes sont statistiquement validées. En effet, au seuil statistique de 5% (n=24, 12 couples), **la sylviculture a un impact net sur le risque de roulure**. Toutes choses étant égales par ailleurs, le risque de roulure est plus élevé au sein des peuplements éclaircis. En moyenne, le taux de roulure est 16% plus élevé chez les peuplements éclaircis (cf. Figure n°43)

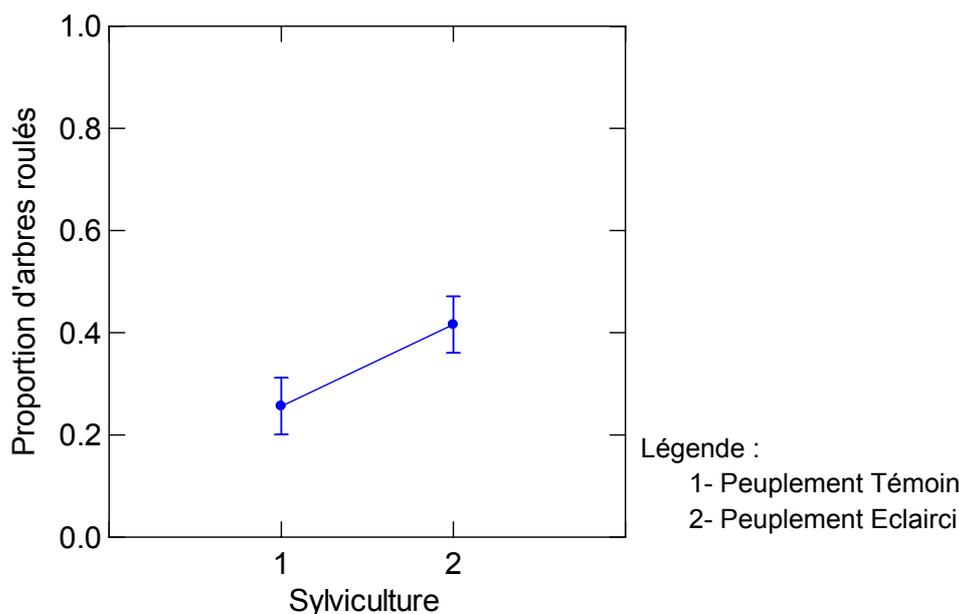


Figure n°43 : Influence de la sylviculture sur le risque de roulure (TEST ANOVA, $P < 0.03$, n=24)

Les éclaircies ont un impact négatif sur le risque de roulure.

Mais la prudence est nécessaire car les peuplements âgés ont bénéficié d'éclaircies tardives. Par ailleurs, comme nous l'avons préalablement démontré l'âge et la fertilité de la station ont des effets marqués. Il est alors nécessaire de tester l'effet de l'éclaircie par rapport au témoin pour chaque catégorie d'âge et de fertilité.

2.3- Impact des éclaircies sur le risque de roulure par catégorie d'âge et de fertilité

La figure ci-dessous constitue le point majeur de l'étude (cf. Tableau n°17).

Tableau n°17 : Comparaison du taux de roulures suivant le mode sylvicole par gamme d'âge et de fertilité (n=24, 12 couples)

	Moins de 45 ans		Différence E-T	Plus de 45 ans		Différence E-T
	Eclairci (E)	Témoin (T)		Eclairci (E)	Témoin (T)	
Fertilité moyenne (Xecoflore < 2,3)	Roulure : 0,47 n=3, CV = 30%	Roulure : 0,21 n=3, CV = 55%	+0,26 NS (P=0,07)	Roulure : 0,58 n=3, CV = 17%	Roulure : 0,56 n=3, CV = 18%	+0,02 NS
Bonne fertilité (Xecoflore > 2,3)	Roulure : 0,29 n=4, CV = 33%	Roulure : 0,10 n=4, CV = 115%	+0,19 * (P=0,04)	Roulure : 0,48 n=2, CV = 25%	Roulure : 0,28 n=2, CV = 41%	+0,2 NS (P=0,23)

Nota : "n=..." : nombre de couples correspondant à la strate, " CV =...%" : Coefficient de variation

Au sujet des peuplements installés sur les stations de bonne fertilité

L'éclaircie a pour effet **d'augmenter la proportion d'arbres roulés de 19 à 20%** pour les deux classes d'âge (moins de 45 ans et plus de 45 ans).

C'est une observation importante. En effet, les peuplements de plus de 45 ans ont été éclaircis tardivement tandis que les jeunes peuplements ont bénéficié d'une intervention avant 20 ans. Cela signifie que l'éclaircie (très) tardive n'engendre pas une augmentation accrue de la proportion d'arbres roulés par rapport à une éclaircie réalisée avant 20 ans. A l'inverse, les éclaircies entre 12 et 20 ans ne permettent pas une diminution significative de la proportion d'arbres roulés par rapport à une éclaircie tardive.

Au sujet des peuplements installés sur les stations de fertilité moyenne

L'éclaircie a comme effet d'augmenter nettement le risque de roulure, **26%**, pour les peuplements de moins de 45 ans. La différence n'est pas validée statistiquement mais la tendance est nette ($p=0,07$). En revanche, comme il est signalé plus haut, l'éclaircie n'engendre pas de risques supplémentaires pour les peuplements âgés de plus de 45 ans. Il est fondamental de noter que ces 3 parcelles sont celles à avoir bénéficiées des éclaircies les plus tardives, au-delà de 40 ans. Les éclaircies très tardives et techniquement obsolètes n'engendrent pas une augmentation de la proportion d'arbres roulés par rapport à la situation témoin.

2.4- Conclusion et discussion

L'âge, la station et la sylviculture influencent largement le risque de roulure. Ces trois facteurs combinés **expliquent 60% de la proportion d'arbres roulés (cf. 5.1)**. Cela nous montre que la roulure n'est pas un phénomène complètement aléatoire et imprévisible. De plus, les variables qui l'expliquent sont "maîtrisables" par le sylviculteur. En effet, on peut diminuer le risque de roulure en abaissant l'âge d'exploitabilité et en travaillant seulement les peuplements installés sur des stations de bonne fertilité.

D'après notre échantillon, **une éclaircie réalisée après l'âge de 12 ans favorise l'apparition de la roulure**. Elle engendre une **augmentation du taux de roulures d'environ 20%** quelque soit la fertilité de la station. **Une éclaircie tardive (entre 20 et 40 ans) a le même impact sur la roulure qu'une éclaircie réalisée avant 18 ans.**

Il est important de noter que les éclaircies très tardives (et techniquement obsolètes) ne provoquent pas une augmentation de la proportion d'arbres roulés. En effet, la proportion de roulures dans les peuplements éclaircis au-delà de 40 ans est identique à celle des témoins. Nous pouvons faire l'hypothèse que la roulure était déjà très nettement présente dans l'arbre sur pied lors de l'éclaircie. Il est probable que l'éclaircie n'a pas modifié la proportion d'arbres roulés. En revanche, il est possible qu'elle ait modifié la répartition de la roulure et le nombre dans les arbres restants. L'un des prochains paragraphes discute de l'effet des éclaircies sur la distribution de la roulure dans l'arbre.

Le doute relevé au sujet de l'effet des éclaircies sur le risque de roulure dans la bibliographie est maintenant vérifié. Mais **en quoi l'éclaircie peut-elle favoriser le risque de roulure ?**

3. En quoi l'éclaircie peut-elle engendrer une augmentation du risque de roulure ?

Le doute relevé au sujet de l'effet des éclaircies sur le risque de roulure dans la bibliographie est maintenant vérifié. **En quoi l'éclaircie peut-elle engendrer une augmentation du risque de roulure ?**

Tout porte à croire que l'augmentation du risque de roulure au sein des peuplements éclaircis est liée à la modification de la croissance de l'arbre.

Dans cette partie, nous étudierons le risque de roulure à **l'échelle de l'arbre**. Seuls les peuplements éclaircis (n=197) sont pris en compte dans l'analyse. Nous ajoutons aux couples précédemment observés les autres placettes éclaircies afin d'augmenter les effectifs (P15, P16, P17, P18, P19).

3.1- L'accroissement courant avant l'éclaircie et la roulure

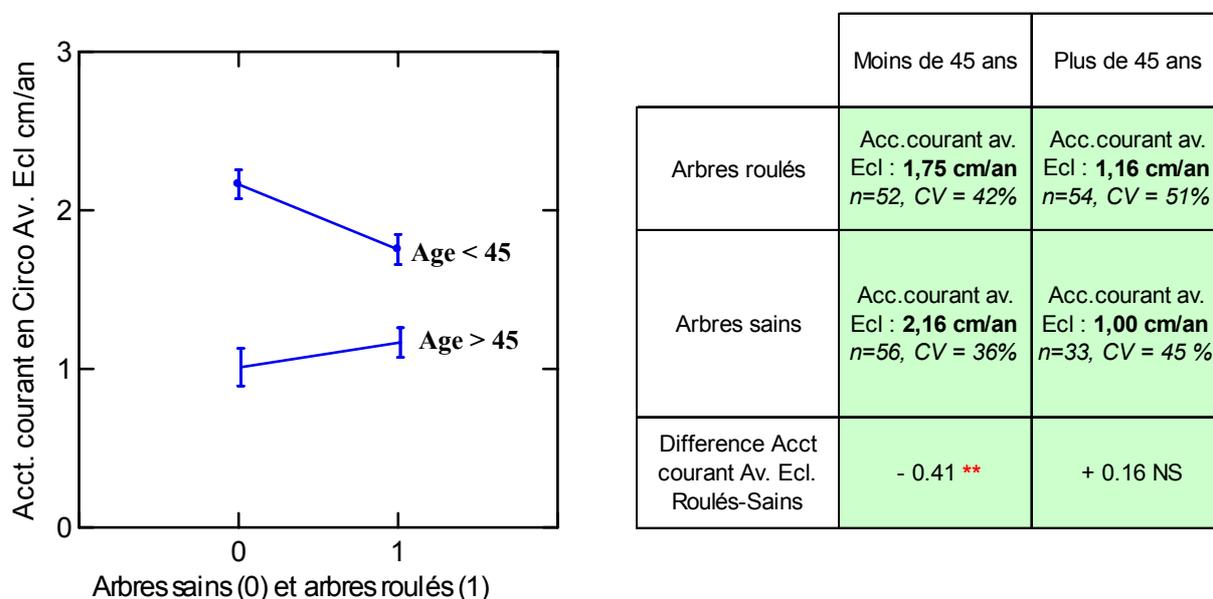


Figure n°44 et Tableau n°18 : Comparaison de l'accroissement courant avant l'éclaircie des arbres sains et des arbres roulés pour deux classes d'âge (Nota : n=nombre d'arbres, CV : Coefficient de variation)

Pour les peuplements de plus de 45 ans, l'accroissement courant en circonférence avant éclaircie est proche de 1 cm/an. **L'accroissement courant avant éclaircie des arbres sains et des arbres roulés est équivalent** (cf. Figure n°44 et Tableau n°18). Pour les peuplements âgés ou éclaircis tardivement, l'accroissement courant avant l'éclaircie n'a pas d'impacts sur la roulure.

En revanche, la conclusion est différente au sujet des peuplements de moins de 45 ans, donc éclaircis avant 20 ans. Tout d'abord, l'accroissement courant précédent l'éclaircie est au moins une fois et demi supérieur aux peuplements âgés.

De plus, **l'accroissement courant avant éclaircie des arbres roulés est inférieur à celui des arbres sains**. La différence est statistiquement significative. **L'accroissement courant des arbres sains est en moyenne de 2,16 cm/an.**

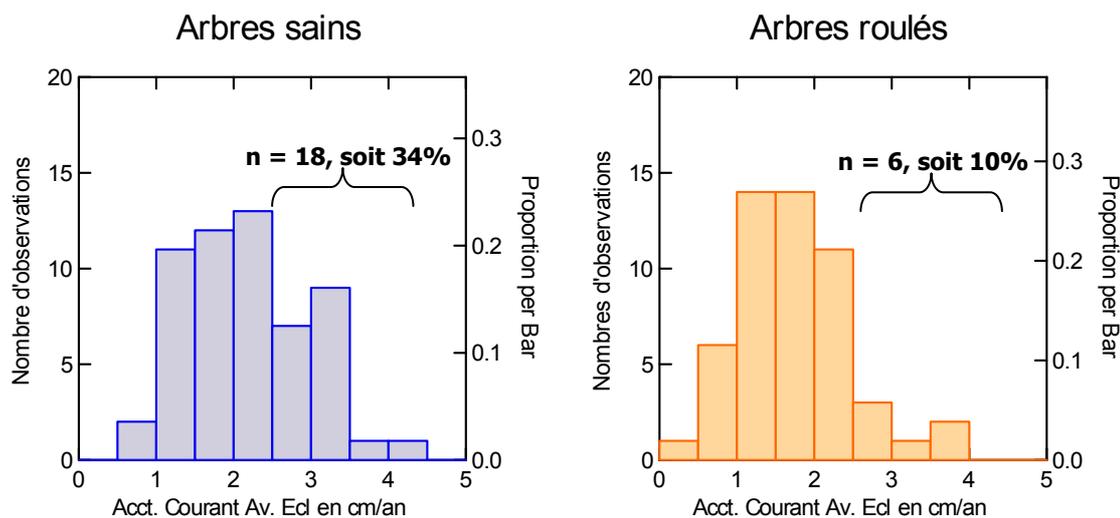


Figure n°45 : Distribution de l'accroissement courant avant éclaircie pour les arbres sains (n=52) et les arbres roulés (n=56)

Parmi l'ensemble de l'échantillon (n=108), 24 individus ont un accroissement courant avant éclaircie supérieur à 2,5 cm/an. Il s'avère que 75% d'entre eux ne sont pas roulés (cf. Figure n°45)

Pour les jeunes peuplements, le risque de roulure est d'autant plus fort que l'accroissement courant avant éclaircie est faible.

3.2- L'accroissement courant après éclaircie et la roulure

Il n'existe pas de corrélations entre le risque de roulure et l'accroissement courant après éclaircie (cf. Figure n°46).

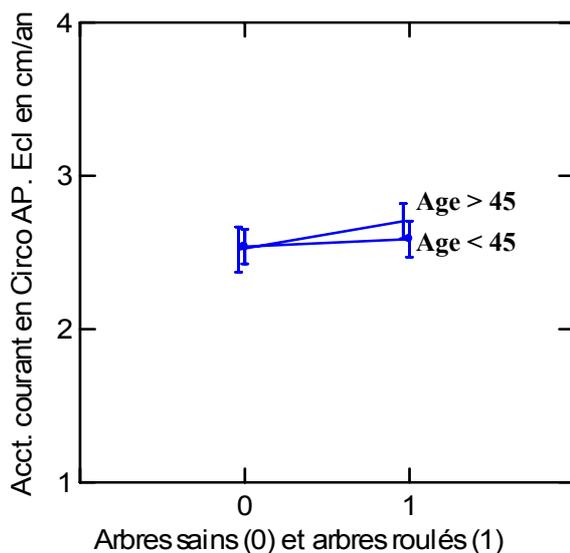


Figure n°46 : L'accroissement courant en circonférence après éclaircie pour les arbres sains et les arbres roulés pour deux classes d'âge.

Pour les deux classes d'âge, en l'absence ou en présence de roulure, **l'accroissement courant en circonférence après éclaircie, toutes tiges confondues, est d'environ 2,5 cm/an**. Il est important de noter que les **arbres dominants des peuplements ont un accroissement courant après éclaircie bien souvent supérieur à 3 cm/an**.

C'est un élément important. En effet, cela signifie qu'en dehors de compétition (accroissement courant mesuré 5 ans après éclaircie), l'accroissement courant en circonférence du châtaignier est d'environ 2,5 cm/an (soit 4 mm/an sur le rayon). D'après l'observation des profils de croissance obtenus par dendrochronologie, l'arbre peut biologiquement assurer cet accroissement au-delà de 40 ans.

Par voie de conséquences, si en l'absence de compétition l'accroissement courant en circonférence est proche de 2,5 cm/an, on peut éviter l'à-coup de croissance en intervenant avant que l'accroissement ne passe sous ce seuil.

Au regard des deux précédents paragraphes, une relation nette entre l'à-coup de croissance et la roulure est attendue chez les jeunes peuplements.

3.3- L'à-coup de croissance et la roulure

L'effet de l'à-coup de croissance est étudié par catégorie d'âge.

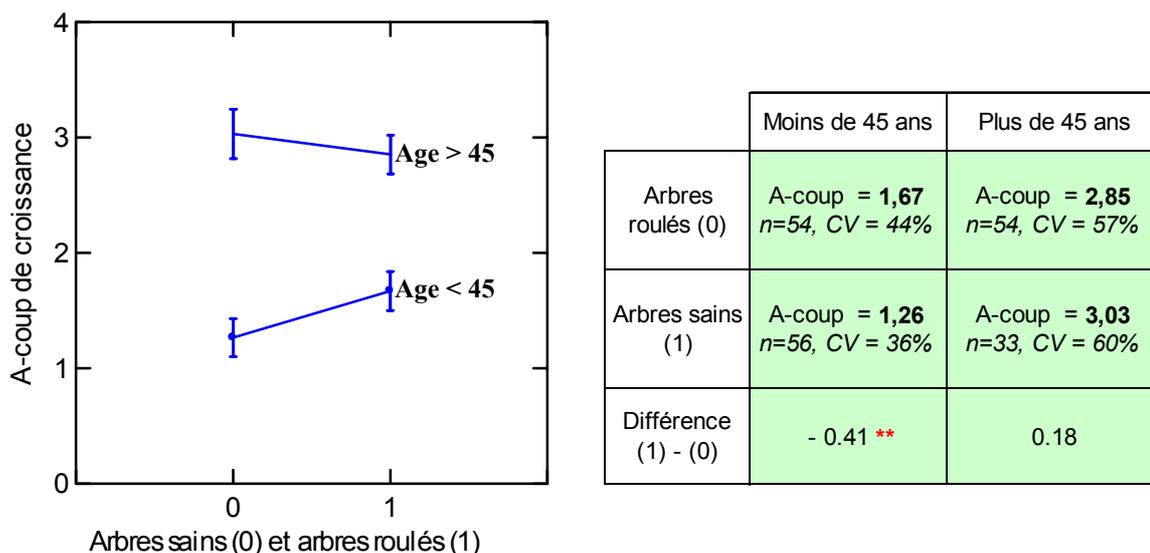


Figure n°47 : L'à-coup de croissance pour les arbres sains et les arbres roulés pour deux classes d'âge (Nota : n=nombre d'arbres, CV : Coefficient de variation)

Les peuplements âgés (au-delà de 45 ans) ont connu un à-coup de croissance nettement plus fort que les peuplements de moins de 45 ans (cf. Figure n°47). En effet, l'à-coup de croissance est d'autant plus fort que l'éclaircie est tardive puisqu'il résulte du rapport entre l'accroissement avant éclaircie diminuant inexorablement avec l'âge et l'accroissement après éclaircie environ égal à 2,5 cm/an.

Au sein des jeunes peuplements, les arbres roulés se distinguent des arbres sains par un à-coup de croissance statistiquement plus fort.

3.4- Conclusion et discussion

En plus de l'âge et de la station, **la roulure est liée à la croissance de l'arbre. Seulement, la croissance d'un arbre est caractérisée :**

- **par un indicateur quantitatif : sa vitesse (rapide ou lente)**
- **par un indicateur qualitatif : son homogénéité (à-coup de croissance).**

L'éclaircie influence à la fois la vitesse de croissance et son homogénéité (à-coup de croissance) :

1) Au sein des peuplements de moins de 45 ans

Au sein des peuplements de moins de 45 ans, éclaircis avant l'âge de 20 ans, **la roulure est corrélée à l'accroissement courant précédent l'intervention** (vitesse de croissance).

Pour les arbres sains, l'accroissement courant (en circonférence) avant éclaircie dépasse 2,1 cm/an. Le passage de l'accroissement en dessous de ce seuil est favorable à l'expression de la roulure. Cependant, cette valeur seuil est à réajuster et à discuter au regard de l'accroissement courant après l'éclaircie.

En effet, l'accroissement courant succédant à l'éclaircie est en moyenne de 2,5 cm/an, toutes conditions stationnelles confondues. Ainsi pour éviter l'à-coup de croissance susceptible de générer la roulure, l'intervention devrait avoir lieu avant le dépassement de ce seuil. Par ailleurs, 75% des arbres dont l'accroissement courant est supérieur à ce seuil avant l'éclaircie sont sains.

Il est important de noter et étonnant de retrouver **le même seuil de croissance rapporté** par la littérature (cf. Figure n°22, 28). En effet, d'après Fonti (2003), Cousseau et Zürcher (2005), la résistance mécanique de l'arbre devient maximale au-delà d'un accroissement radial compris entre 3 et 4 mm/an soit 2,5 cm/an en circonférence. Au-delà de ce seuil, le risque de roulure est nettement diminué.

Ainsi, dans la mesure où les arbres à accroissement courant important sont moins roulés, on peut faire l'hypothèse qu'à âge égal, les arbres dominants du peuplement sont moins sensibles à la roulure (cf. Figure n°50).

2) Au sein des peuplements de plus de 45 ans

Les peuplements de plus de 45 ans ne réagissent pas de la même manière. Ces peuplements éclaircis tardivement, parfois au-delà de 40 ans, ont un accroissement courant en circonférence proche d'1 cm/an.

Avec l'âge, l'accroissement courant diminue progressivement. Au-delà de 30 ans, l'accroissement courant se stabilise entre 1 et 1,5 cm/an. C'est en raison de l'homogénéisation de l'accroissement courant avec l'âge avant éclaircie que l'on n'observe aucune relation entre cette variable et la roulure pour les peuplements de plus de 45 ans.

Est-ce l'à-coup de croissance ou l'accroissement courant avant éclaircie qui engendre la roulure ?

D'après Fonti (2003), Cousseau et Zürcher (2005), les arbres dont l'accroissement radial est important sont mécaniquement plus résistants.

Nous démontrons que les arbres dont l'accroissement courant avant l'éclaircie est faible sont sensibles à la roulure. Seulement, les arbres issus des placettes témoins ont également un accroissement radial faible, les rendant a priori aussi sensible à la roulure. Or, on note que la proportion d'arbres roulés est environ 20 à 26% plus faible au sein des parcelles témoins. Ainsi, la vitesse de croissance ne suffit pas à expliquer la roulure. Donc, l'hétérogénéité de croissance induite a aussi un impact sur la roulure.

On peut diminuer le risque de roulure en assurant une croissance rapide (au delà du seuil de 2,5 cm/an en circonférence) et homogène.

Il semblerait que le **faible accroissement** soit un **facteur prédisposant** la roulure alors que l'**à-coup**, quant à lui, soit le **facteur déclenchant**.

Comment éviter l'à-coup de croissance et assurer une croissance soutenue ?

Il y a en fait peu de solutions pour assurer une croissance soutenue sans engendrer d'à-coup de croissance.

La figure ci-dessous est établie à l'aide des mesures dendrochronologiques réalisées sur environ 89 individus. Cette figure nous renseigne sur l'évolution de l'accroissement courant en circonférence en fonction de l'âge au sein des **peuplements témoins uniquement** (cf. Figure n°48).

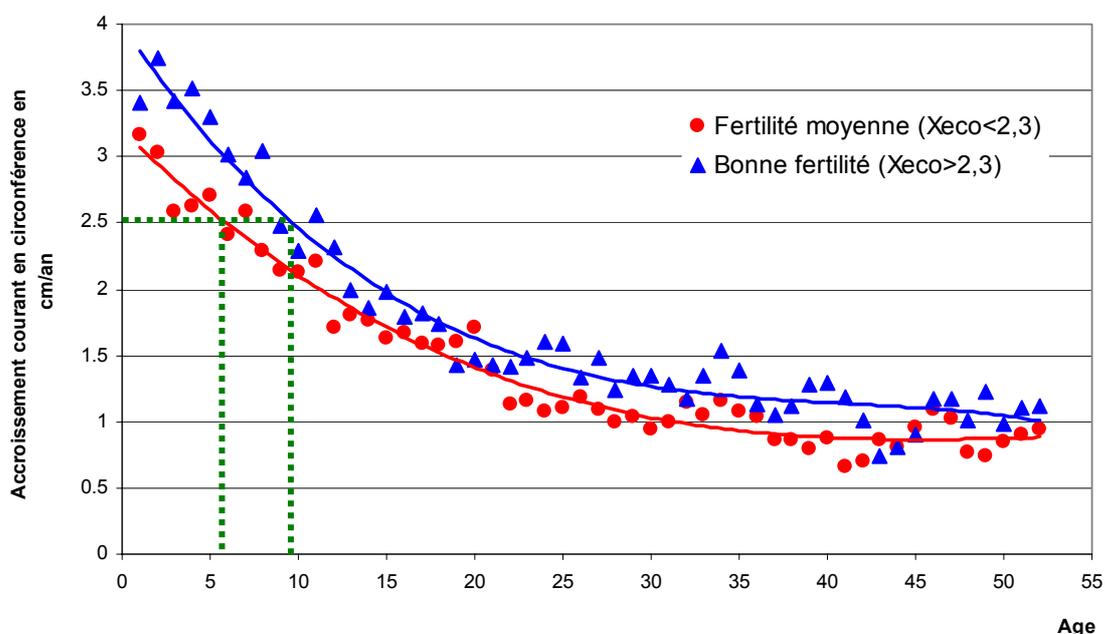


Figure n°48 : Evolution de l'accroissement courant en circonférence en fonction de l'âge pour deux classes de fertilité et pour des peuplements témoins (n=42)

Afin d'éviter l'à-coup de croissance généré par l'éclaircie, l'accroissement courant avant éclaircie ne doit pas être inférieur à 2,5 cm/an. La lecture de cette figure nous informe donc de l'âge maximal pour la réalisation des interventions.

C'est un autre résultat clé de l'étude. Il constitue les bases des préconisations sylvicoles pour limiter le risque de roulure :

Pour les peuplements installés sur des stations fertiles (Xecoflore >2,3), l'accroissement courant en circonférence du peuplement (toutes tiges confondues) passe sous le seuil de 2,5 cm/an vers l'âge de 10 ans. L'intervention devrait avoir idéalement lieu avant 10 ans. Pour les arbres dominants, un délai de 2 à 5 ans s'ajoute. L'intervention peut alors attendre l'âge de 12 à 15 ans.

Pour les peuplements installés sur des stations de fertilité moyenne (Xecoflore <2,3), l'accroissement courant en circonférence du peuplement (toutes tiges confondues) passe sous le seuil de 2,5 cm/an vers l'âge de 6 ans. L'intervention devrait avoir idéalement lieu avant 6 ans. Pour les arbres dominants, un délai de 2 à 5 ans s'ajoute. L'intervention peut alors attendre l'âge de 8 à 11 ans.

Aucune des placettes analysées dans le cadre de cette étude ne répondent aux âges préconisés. L'ensemble des placettes éclaircies, même celles éclaircies entre 12 et 15 ans ont dépassées le seuil de risque. La figure ci-dessous (cf. Figure n°49) illustre l'évolution de l'accroissement en circonférence du seul peuplement installé sur une station de bonne fertilité ayant bénéficié d'une éclaircie à l'âge de 10 ans (placette 6002E, G2).

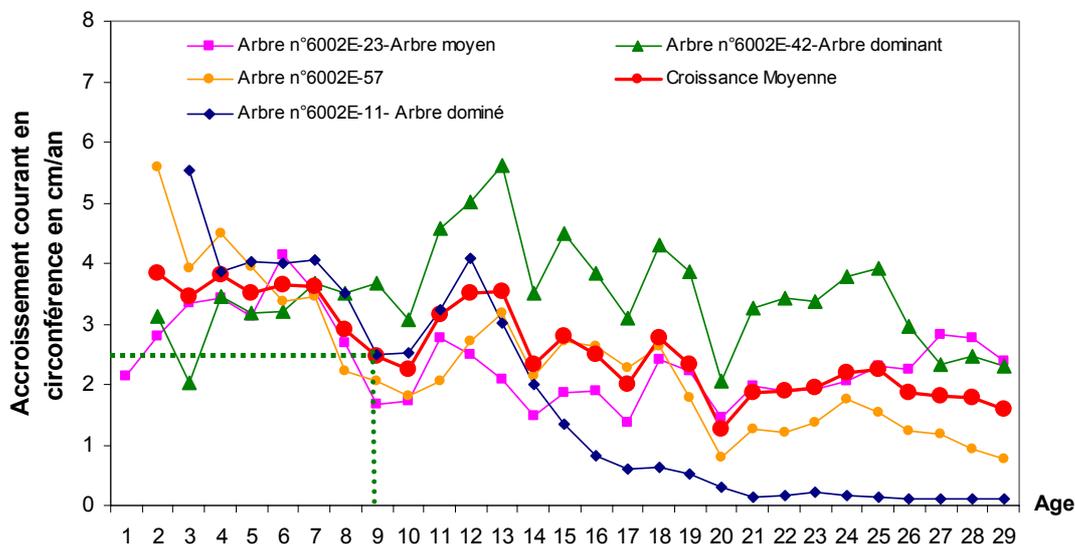


Figure n°49 : Evolution de l'accroissement de la placette 6002E et passage sous le seuil de risque

En effet, à 10 ans, la valeur de l'accroissement courant en circonférence passe dessous la valeur seuil définie préalablement à 2,5 cm/an. L'arbre dominant bénéficie de quelques années avant de le dépasser.

En raison de la dynamique de croissance du châtaignier, la période possible d'intervention est restreinte. **La sylviculture du châtaignier est certes simple mais exigeante.**

4- La distribution de la roulure

L'éclaircie a pour effet d'augmenter la proportion d'arbres roulés au sein des peuplements. La vitesse de croissance avant l'éclaircie et l'à coup de croissance sont mises en causes. Dans le présent paragraphe, nous discutons l'hypothèse d'après laquelle l'éclaircie modifie la distribution de la roulure au sein du peuplement et au sein de l'arbre.

4.1- La répartition de la roulure en fonction du statut social de l'arbre

D'après les précédentes conclusions, l'accroissement courant avant l'éclaircie a un rôle important dans l'expression de la roulure. Les arbres roulés ont un accroissement courant avant éclaircie plus faible que les arbres sains. Partant de ce constat, nous faisons l'hypothèse qu'au sein d'un peuplement, les arbres dominés (accroissement courant plus faible) sont plus sensibles à la roulure :

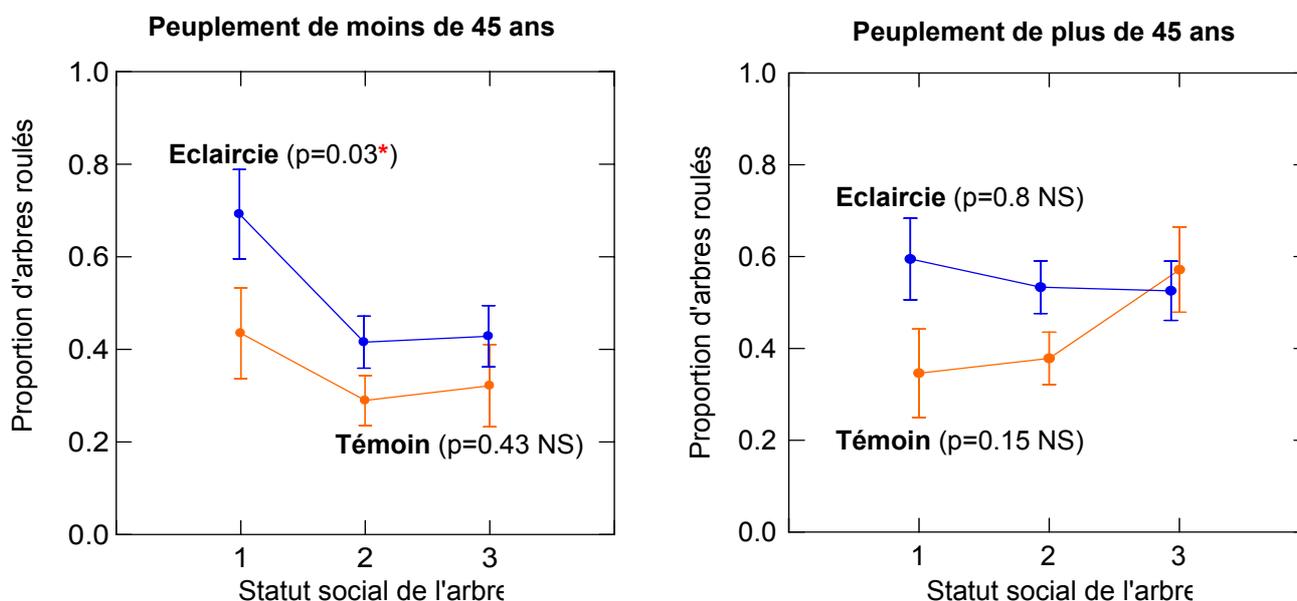


Figure n°50 : Relation entre la roulure et le statut social de l'arbre pour les deux classes d'âge et suivant la sylviculture (Test ANOVA, 1- Arbres dominés, 2- Arbres co-dominants, 3-Arbres dominants)

La précédente hypothèse est statistiquement vérifiée pour les peuplements éclaircis de moins de 45 ans (Anova, $p=0.03^*$). **Les individus dominés sont nettement plus sensibles à la roulure.**

Pour les peuplements de plus de 45 ans, éclaircis tardivement, la proportion d'arbres roulés est identique quelque soit le statut de l'arbre. En revanche, pour cette même catégorie d'âge, on note chez les arbres témoins une tendance conduisant à une augmentation du taux de roulure pour les dominants. C'est un fait déjà reconnu dans la bibliographie, Macchioni (1995) montre que la roulure affecte les plus gros arbres d'un peuplement non éclairci. Il évoque l'hétérogénéité de croissance (cf. Tableau n°2).

En cas d'intervention tardive au sein d'un peuplement non éclairci, il est fort probable que l'on augmente significativement le taux de roulures en travaillant au profit des arbres dominants de la parcelle.

4.2- La répartition de la roulure au sein de l'arbre

4.2- Distribution de la roulure dans le sens longitudinal

4.2.1- Distribution de la hauteur de roulure dans l'arbre

Au-delà de la présence de la roulure dans l'arbre, c'est sa hauteur de propagation qui est déterminante dans l'évaluation économique (cf. Figure n°51).

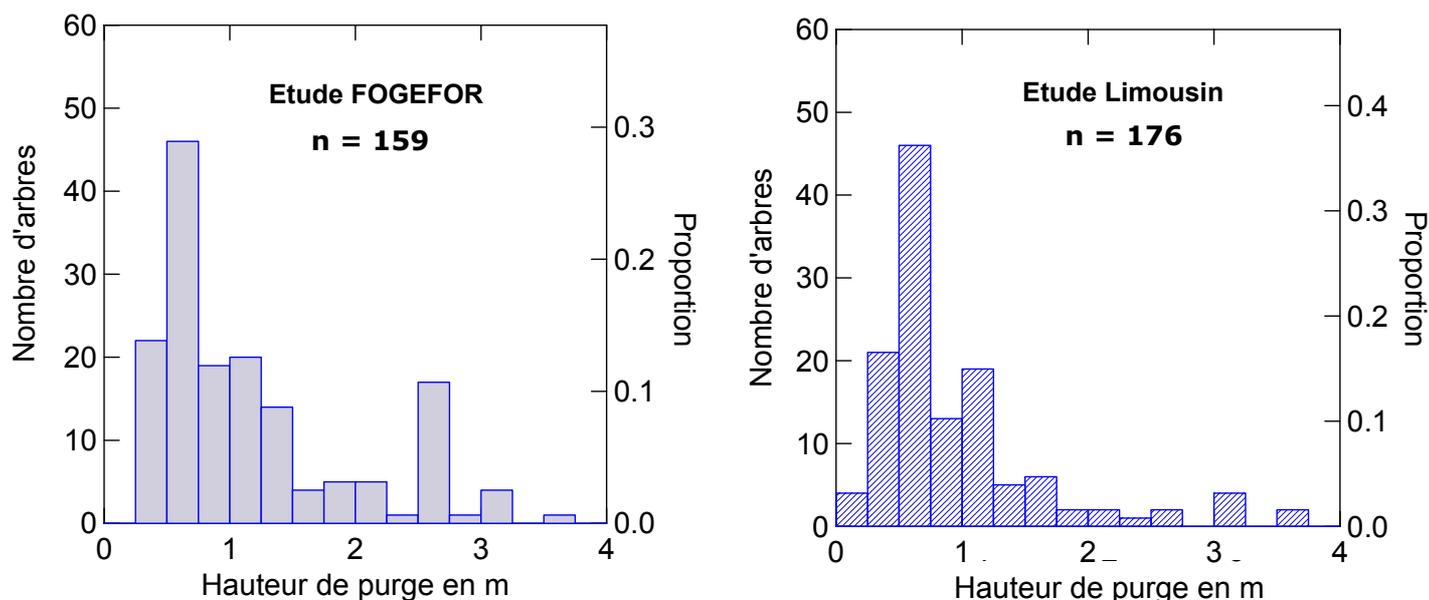


Figure n°51 : Distribution de la hauteur de purge mesurée dans le cadre de l'étude FOGEFOR (n=159) et dans le cadre de l'étude Limousin (n=176) (C. Riboulet, IDF)

La hauteur de propagation de la roulure est un phénomène variable (coefficient de variation = 68%). La roulure peut s'observer à toute hauteur. Ainsi, la roulure se propage pour respectivement 50% et 70 % des arbres roulés jusqu'à 1 et 2 m.

Il est très surprenant d'observer que la distribution de la roulure au sein de l'étude FOGEFOR est quasi identique à la distribution de la roulure en Limousin. Les deux distributions ont la même forme et sont centrées sur les mêmes valeurs.

Ces deux études ont été réalisées séparément (étude en Limousin durant les années 1990) par deux opérateurs différents.

Dans 50% des cas, la roulure ne se propage pas au-delà de 1 m.

4.2.2- La répartition longitudinale de la roulure par placette

Le précédent paragraphe analyse la distribution de la hauteur de propagation de la roulure dans l'arbre. La figure ci-dessous (cf. Figure n°52) traite de la répartition de la hauteur moyenne de purge par placette.

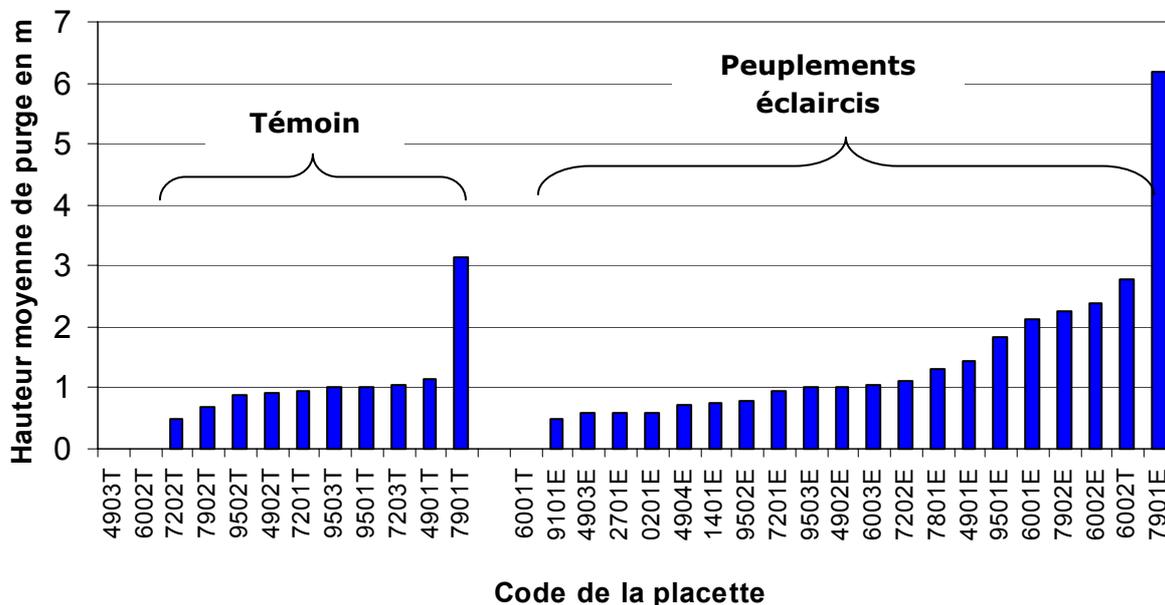


Figure n°52 : Distribution de la hauteur moyenne de purge par placette

Parmi les 12 placettes témoins, la hauteur de propagation de la roulure est inférieure à 1 m pour 10 d'entre elles (soit 83%). En revanche, la hauteur moyenne de purge excède 1 m pour 42% des peuplements éclaircis. Les hauteurs minimales et maximales de purge s'observent chez les peuplements installés sur les extrêmes stationnels.

4.2.3- La hauteur de propagation et le nombre de roulures à la culée

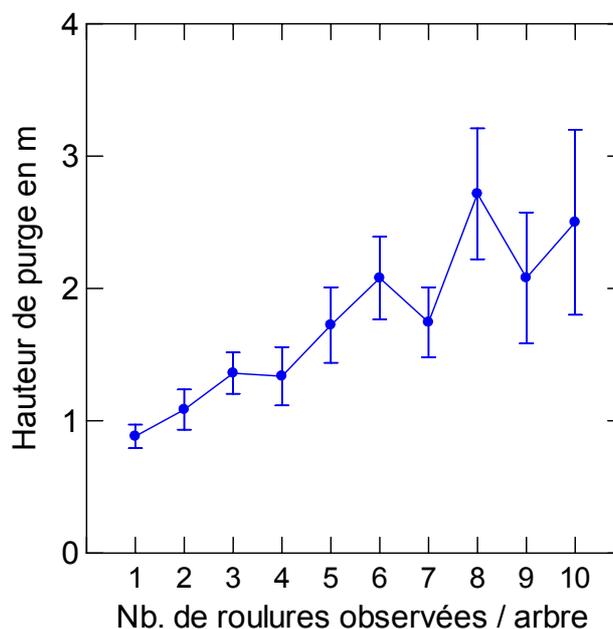


Figure n°53 : Hauteur de propagation (en m) de la roulure en fonction du nombre de roulures observées à la culée (n=159, Anova, p=0,000***)

L'observation du nombre de roulures à la culée lors de l'abattage permet d'évaluer la hauteur de propagation de la roulure (cf. Figure n°53). En effet, il existe une relation statistiquement significative entre le nombre de roulures et la hauteur de purge. La hauteur de purge est d'autant plus importante que le nombre de roulures observées à la culée est élevé. Ainsi, la hauteur moyenne de purge ne dépasse pas 1 m si l'on observe une seule roulure à la culée. En revanche, au-delà de 6 roulures présentes au pied de l'arbre, la hauteur moyenne de purge excède 2 m. Entre ces deux valeurs, la hauteur de propagation de la roulure augmente progressivement.

4.2.4- La hauteur de purge et la position de la roulure sur le rayon

Il est souvent reconnu empiriquement que la position de la roulure sur le rayon détermine la hauteur de purge : « *les roulures de cœur ne montent pas* ».

Ces observations sont d'autant plus vraisemblables qu'une explication biologique peut être apportée. La structure de l'arbre peut être assimilée à une superposition de troncs de cônes. Ainsi, nous faisons l'hypothèse que la hauteur de propagation de la roulure varie suivant le cerne affecté. La hauteur de fissuration est d'autant plus forte qu'un cerne périphérique (proche de l'écorce) est roulé.

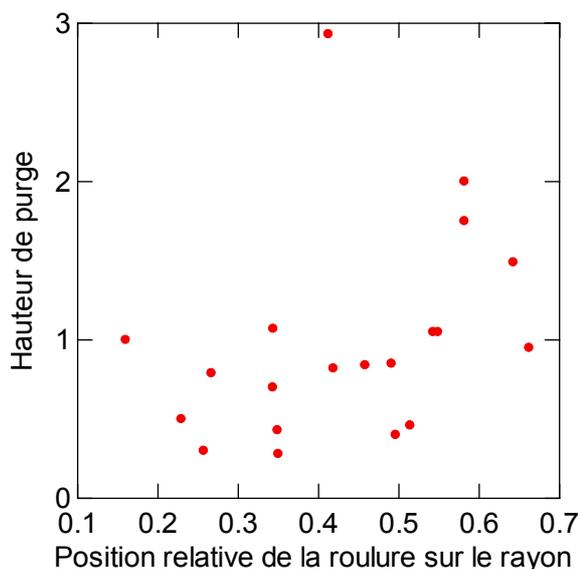
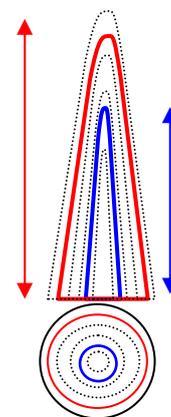


Figure n°54 : Position relative maximale de la roulure sur le rayon et la hauteur de purge pour les peuplements témoins de plus de 45 ans.

Cette hypothèse a pu être vérifiée (cf. Figure n°54). Il s'avère qu'il existe une corrélation entre la hauteur de purge et la position de la roulure sur le rayon. Cette relation est valable uniquement pour les peuplements témoins de plus de 45 ans. Pour les autres peuplements, cette relation n'est pas validée.

4.3- La distribution de la roulure dans le sens axial-tangentiel

4.3.1- Distribution de la roulure au sein des peuplements témoins

La littérature nous rapporte que la distribution de la roulure au sein de l'arbre n'est pas aléatoire (cf. Figure n°16). La fréquence d'apparition de la roulure est maximale vers 50% du rayon de l'arbre et décroît alors pour être nulle au voisinage de l'écorce (cf. Figure n°16) (Chanson et al, 1990, Macchioni et al, 1996). Aucune fissure n'est décelée dans les cernes les plus récents.

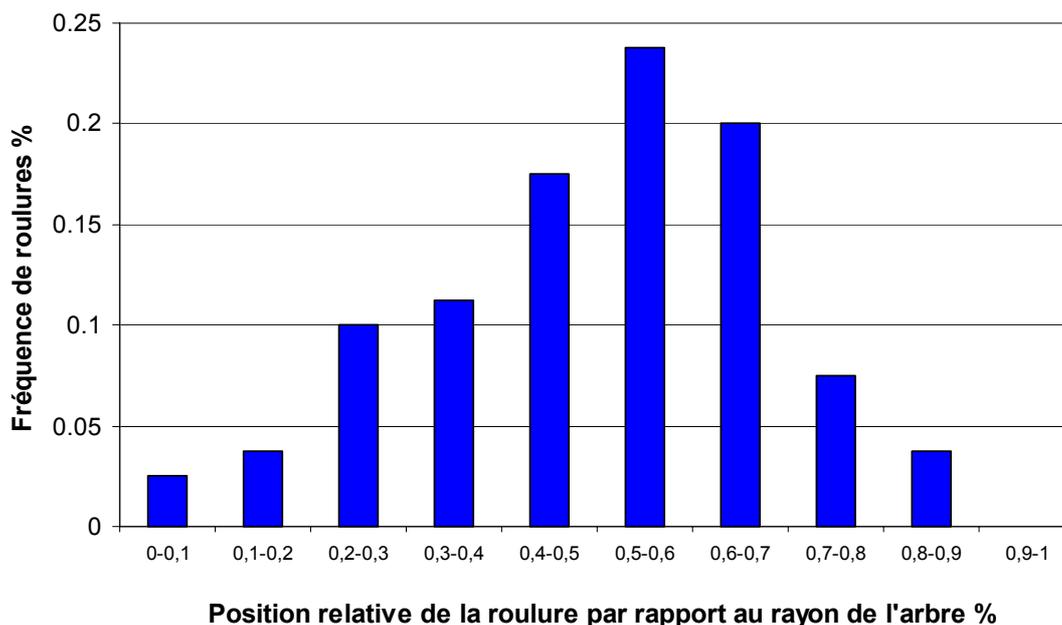


Figure n°55 : Position relative de la roulure sur le rayon de l'arbre au sein des peuplements témoins

Dans le cas de la présente étude, la répartition de la roulure le long du rayon s'avère être identique à celle discutée dans la bibliographie (cf. Figure n°55). La distribution est normale et la fréquence de la roulure atteint son maximum au milieu du rayon de l'arbre puis devient nulle en périphérie.

La distribution de la roulure au sein des peuplements non éclaircis constitue la courbe de référence.

4.3.2- Distribution de la roulure au sein des peuplements éclaircis

C'est un autre élément important de l'étude. Par gamme d'âge, nous avons comparé la distribution de la roulure entre le peuplement témoin et le peuplement éclairci. Au sein d'un couple, l'année de l'éclaircie constitue l'année de référence, c'est-à-dire l'année 0. Cette méthode d'observations nous permet d'évaluer la part de roulure induite par l'intervention sylvicole.

L'éclaircie modifie très nettement la répartition de la roulure au sein des peuplements de plus et de moins de 45 ans.

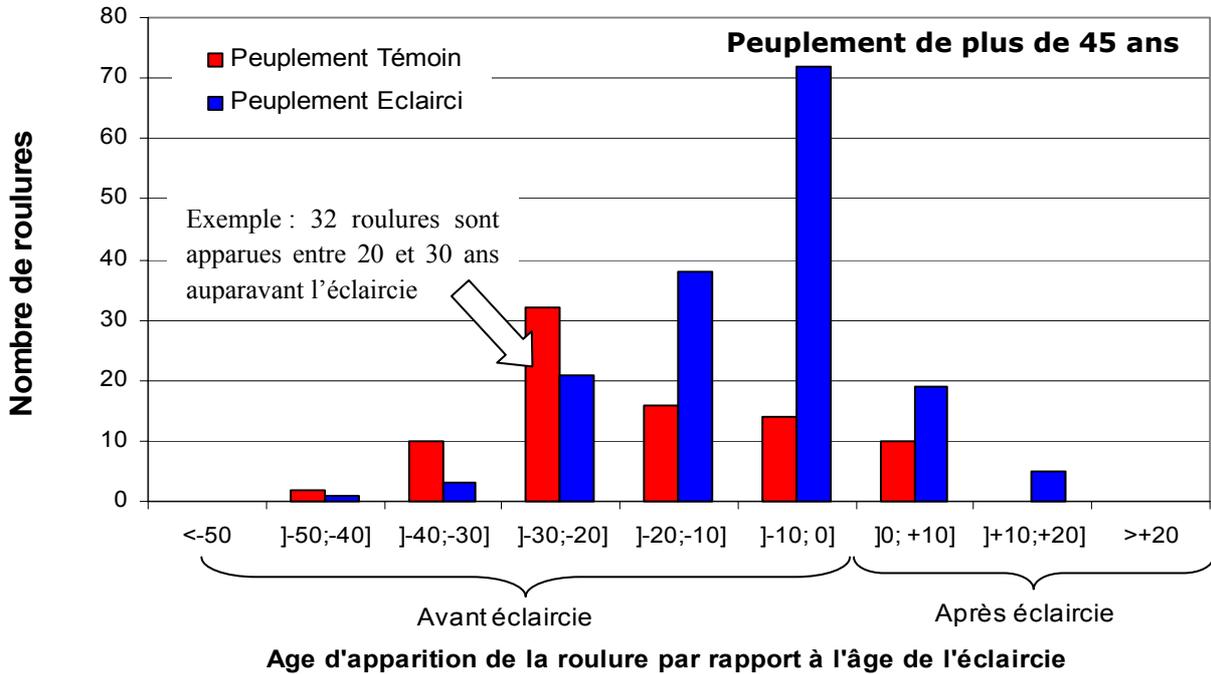


Figure n°56 : Comparaison de la répartition de la roulure entre les peuplements témoins et les peuplements éclaircis de plus de 45 ans en utilisant l'année d'éclaircie comme point de référence (n=327, 4 couples).

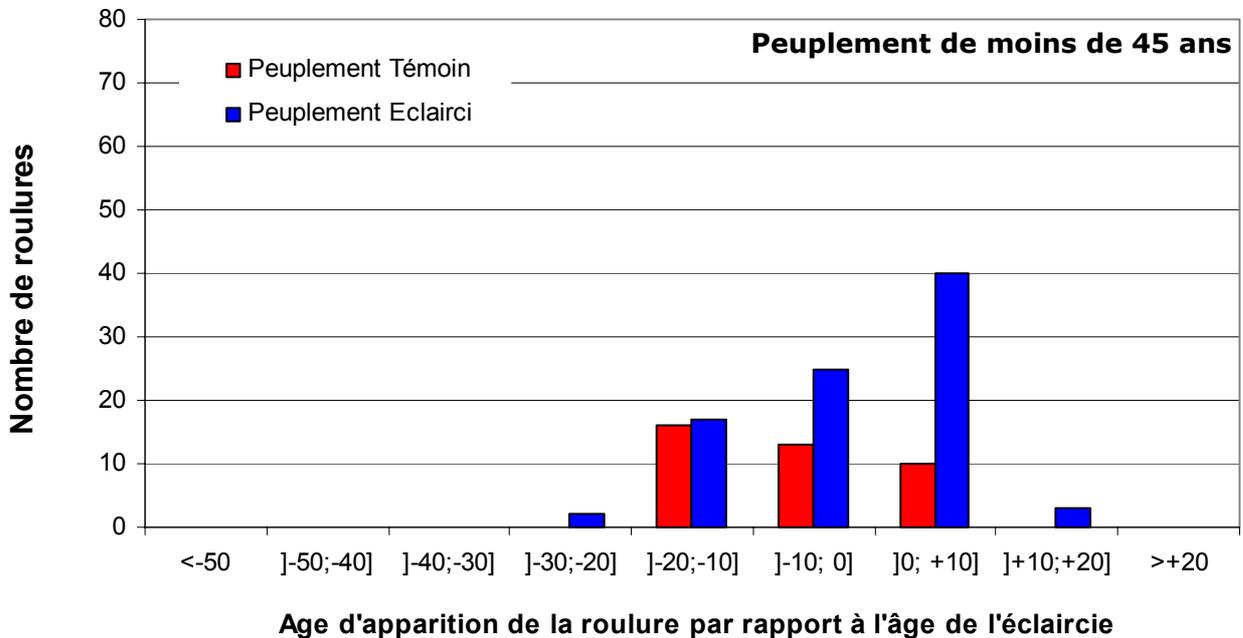


Figure n°57 : Comparaison de la répartition de la roulure entre les peuplements témoins et les peuplements éclaircis de moins de 45 ans en utilisant l'année d'éclaircie comme point de référence (n=327, 4 couples).

- Pour les peuplements de plus de 45 ans (cf. Figure n°56)

Pour un même nombre d'arbres roulés, le nombre de roulures observées au sein des peuplements éclaircis est très nettement supérieur au nombre de roulures observées au sein des témoins.

La roulure se distribue de façon privilégiée autour de l'à-coup de croissance. En effet, **45% des roulures observées au sein des peuplements éclaircis apparaissent dans les 10 années qui précèdent l'éclaircie.**

- Pour les peuplements de moins de 45 ans (cf. Figure n°57)

De la même façon, le nombre de roulures observées est plus important au sein des peuplements éclaircis. La roulure se concentre aussi autour de l'à-coup de croissance mais la distribution est différente de celle observée pour les peuplements éclaircis de plus de 45 ans. En effet, contrairement à ceux-ci qui concentrent la roulure dans les 10 cerne précédents l'éclaircie, **la roulure est aussi bien présente avant qu'après l'à-coup de croissance**

L'éclaircie accentue le nombre de roulures et modifie la répartition des roulures en les concentrant autour de l'à-coup de croissance.

4.3.3- Etude de quelques cas

4.3.3.1- Cas du couple 9501E/9501T : Effet d'une éclaircie brutale à l'âge de 43 ans

Ce couple fut retenu pour une analyse plus complète au regard des questions suscitées précédemment. Bien que les éclaircies au-delà de 40 ans ne provoquent pas une augmentation significative de la proportion d'arbres roulés, nous avons fait l'hypothèse qu'elles pouvaient modifier le nombre et la distribution de la roulure dans l'arbre. C'est ce que nous vérifions à l'aide de la figure suivante.

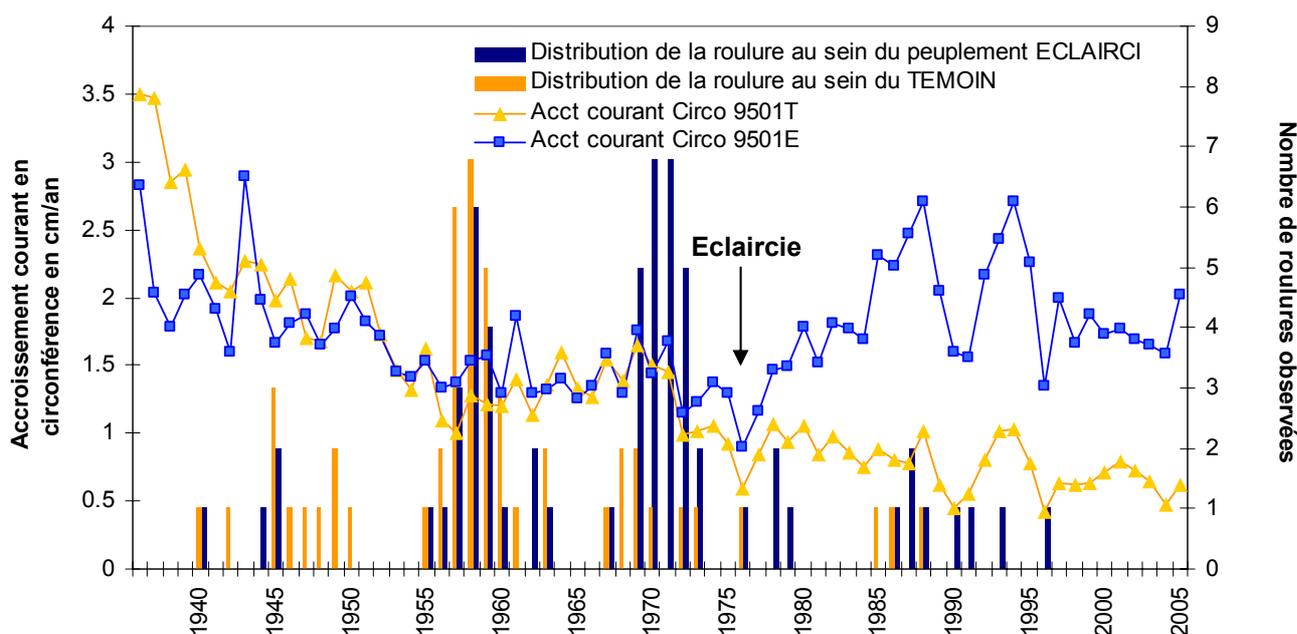


Figure n°58 : Distribution de la roulure et évolution de l'accroissement courant en circonférence pour le couple 9501T/9501E

En effet, l'éclaircie n'a pas modifié le taux de roulures mais elle a considérablement modifié la distribution et leurs nombres (cf. Figure n°58).

Pour un même nombre d'arbres roulés, le nombre de roulures au sein du peuplement éclairci est **30% supérieur au nombre de roulures parmi les arbres témoins**.

La **distribution est largement bouleversée**. Il est remarquable d'observer que la distribution de la roulure durant la décennie 1955-1965 est quasi identique entre le témoin et le peuplement éclairci. Durant la décennie suivante, 1965 et 1975, peu de roulures sont observées entre au sein du peuplement témoin. Pendant cette période, la roulure s'exprime très fortement au sein du peuplement éclairci. La distribution est normale et très proche de celle observée entre 1955 et 1965. Elle apparaît les cinq années précédents l'à coup de croissance conformément aux observations de la figure n°56.

4.3.3.2- Cas du couple 7902E/7902T : Effet d'une éclaircie à 18 ans sur une station de fertilité moyenne

Ce couple fut retenu dans le cadre de cette étude de cas car la différence du taux de roulure entre le témoin et le peuplement éclairci est la plus forte.

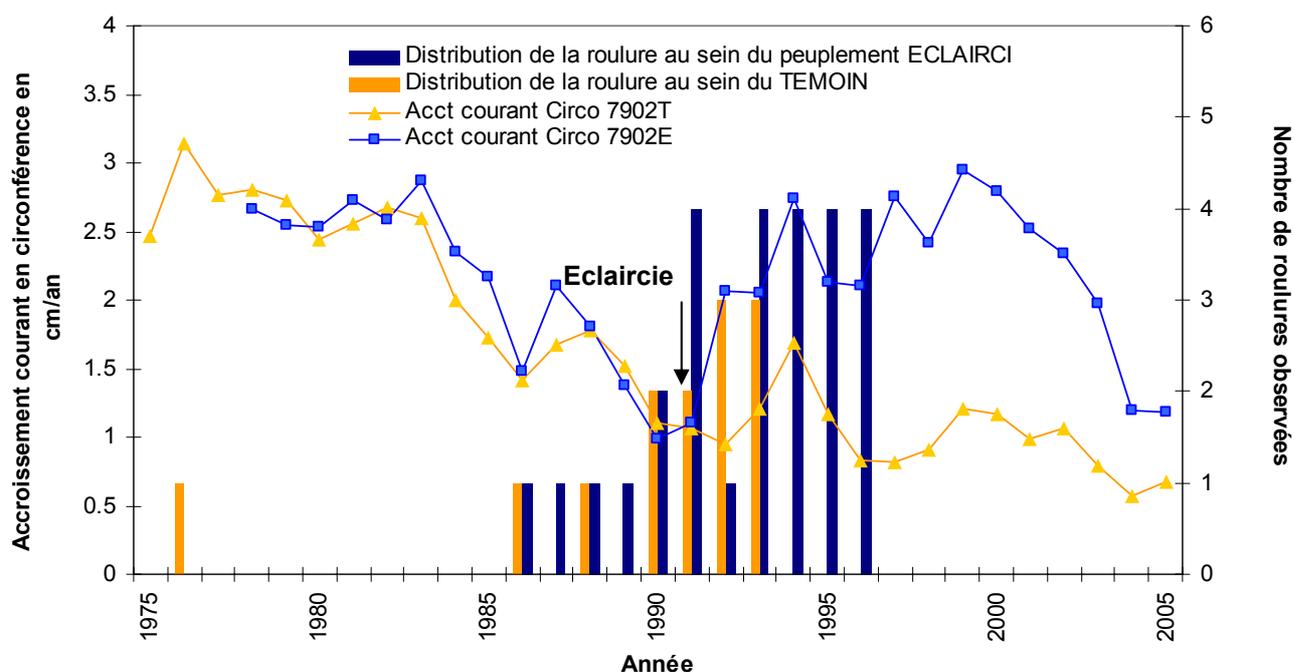


Figure n°59 : Distribution de la roulure et évolution de l'accroissement courant en circonférence pour le couple 7902T/7902E

Dans cet exemple, l'éclaircie a aussi modifié la distribution de la roulure (cf. Figure n°59).

Entre 1985 et 1992, la distribution de la roulure est en partie commune et semblable au témoin et au peuplement éclairci.

Après l'à-coup de croissance, le nombre de roulures augmente significativement au sein du peuplement éclairci. La courbe de répartition de la roulure semble être décalée. Cependant, cette fois-ci, on ne peut pas identifier un second "pic" de roulures comme dans l'exemple précédent.

4.4- Discussion

Nous avons précédemment mis en évidence l'augmentation de la proportion d'arbres roulés à l'issue de l'éclaircie. Les résultats présentés dans ce paragraphe nous montrent qu'elle modifie aussi la distribution de la roulure au sein de l'arbre. Ce résultat est compatible avec ceux de Fonti (2003) (cf. Figure n°18) rapportant une augmentation du nombre de roulures consécutivement à une intervention sylvicole.

La roulure se concentre dans la zone où l'à-coup de croissance s'est réalisé. Pour les peuplements éclaircis tardivement, la roulure se concentre avant l'à-coup de croissance. A l'inverse, la roulure se distribue avant et après l'à-coup de croissance pour les peuplements éclaircis avant l'âge de 20 ans.

L'étude de cas nous permet d'évaluer la "part de roulures" induite par l'éclaircie. Nous pouvons ainsi ébaucher la discussion au sujet de la cinétique de la roulure (cf. Figure°60)

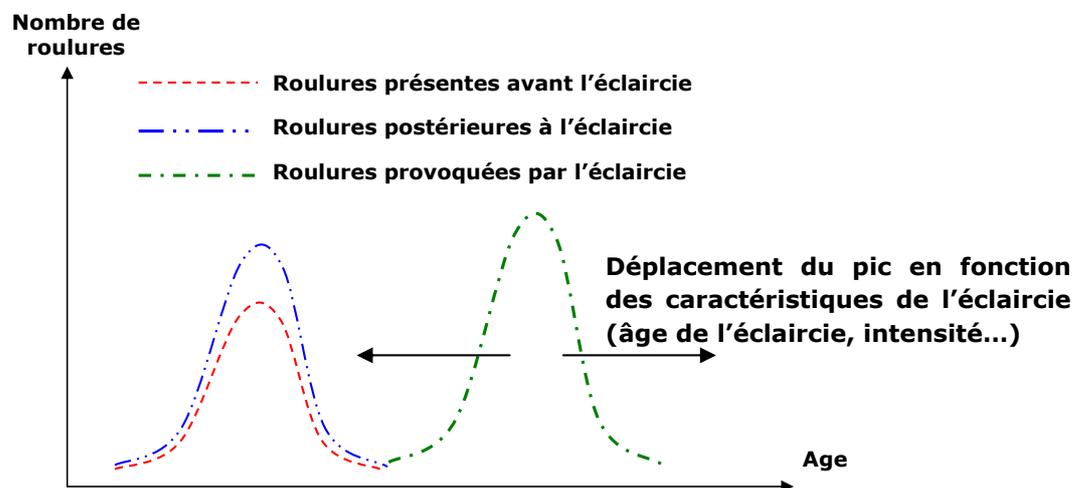


Figure n°60 : Cinétique de la roulure et effets de l'éclaircie

D'après nos observations, l'éclaircie provoque l'augmentation du nombre de roulures. Ces roulures induites viennent s'ajouter aux roulures antérieures à l'intervention. En fonction des conditions d'éclaircie, de l'âge du peuplement, de l'intensité de l'éclaircie, un "nouveau pic de roulures" peut apparaître et se différencier (9501E/9501T). Dans le cas contraire, elles viennent s'accumuler et amplifier la distribution précédent l'intervention comme dans le cas du couple 7902E/7202T.

Cette première discussion est partielle et laisse de nombreuses questions :

- **Mais, pourquoi et comment l'éclaircie modifie-t-elle la distribution de la roulure ?**
- **Quel est le temps nécessaire après l'éclaircie pour engendrer la modification de la distribution ?**

Nous tenterons d'apporter un début de réponses à chacune de ces interrogations.

4.4.1- De combien de temps dispose-t-on après l'éclaircie pour voir augmenter significativement le risque de roulure ?

C'est une question souvent posée. Seulement, la réponse n'est pas simple. En effet, on connaît l'année de formation du cerne roulé mais pas l'année de formation de la roulure en question. Il nous est impossible de connaître sa date d'apparition. Par ailleurs, cette question est obsolète si l'on considère que la roulure est absente de l'arbre sur pied.

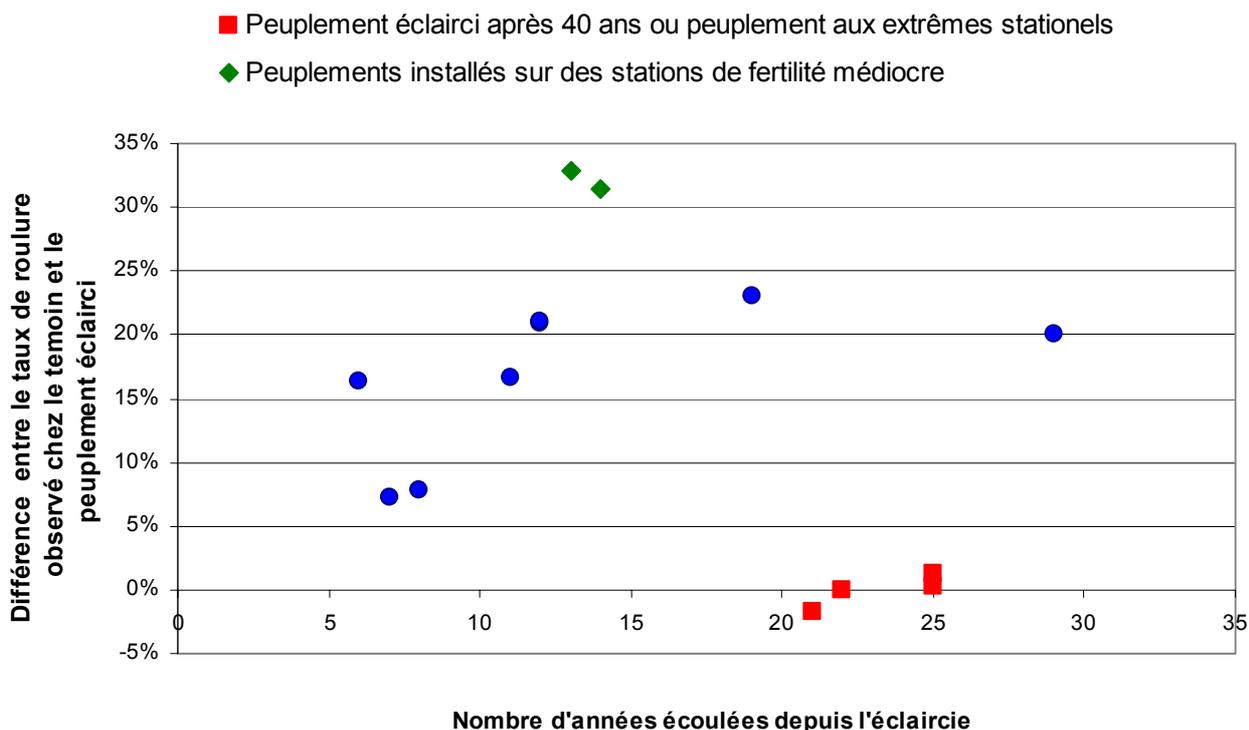


Figure n°61 : Relation entre le nombre d'années écoulées depuis l'éclaircie et la différence du taux de roulure ECLAIRCI-TÉMOIN

On peut apporter un début de réponse grâce à la figure n°61. L'interprétation et l'extrapolation doivent être prudentes. Les peuplements éclaircis très tardivement (après 40 ans) ou installés sur des stations de fertilité médiocre sont écartés de l'analyse.

Durant les 12 années qui succèdent l'éclaircie, le taux de roulure au sein du peuplement éclairci est de 8 à 16 % supérieur au taux de roulure du peuplement témoin. Parmi les peuplements ayant bénéficiés de l'éclaircie lors des 10 dernières années, deux d'entre eux ont un taux de roulure qui n'excède pas de 10 % le taux de roulure de leur témoin. Nous rappelons que la différence moyenne observée entre le peuplement témoin et le peuplement éclairci est de 20%. Cette différence est atteinte 12 ans après l'éclaircie.

Il semblerait que la différence du taux de roulure Eclairci-Témoin atteigne 20% dans les 12 ans suivant l'éclaircie.

4.4.2- Pourquoi l'éclaircie modifie-t-elle la distribution et le nombre de roulures dans l'arbre ?

La roulure est un phénomène dynamique. La difficulté majeure pour sa compréhension réside dans son observation qui se fait à un instant t. La répartition de la roulure le long du rayon à instant donné dans un peuplement témoin peut être décomposée en plusieurs moments. C'est la démarche proposée par la figure suivante :

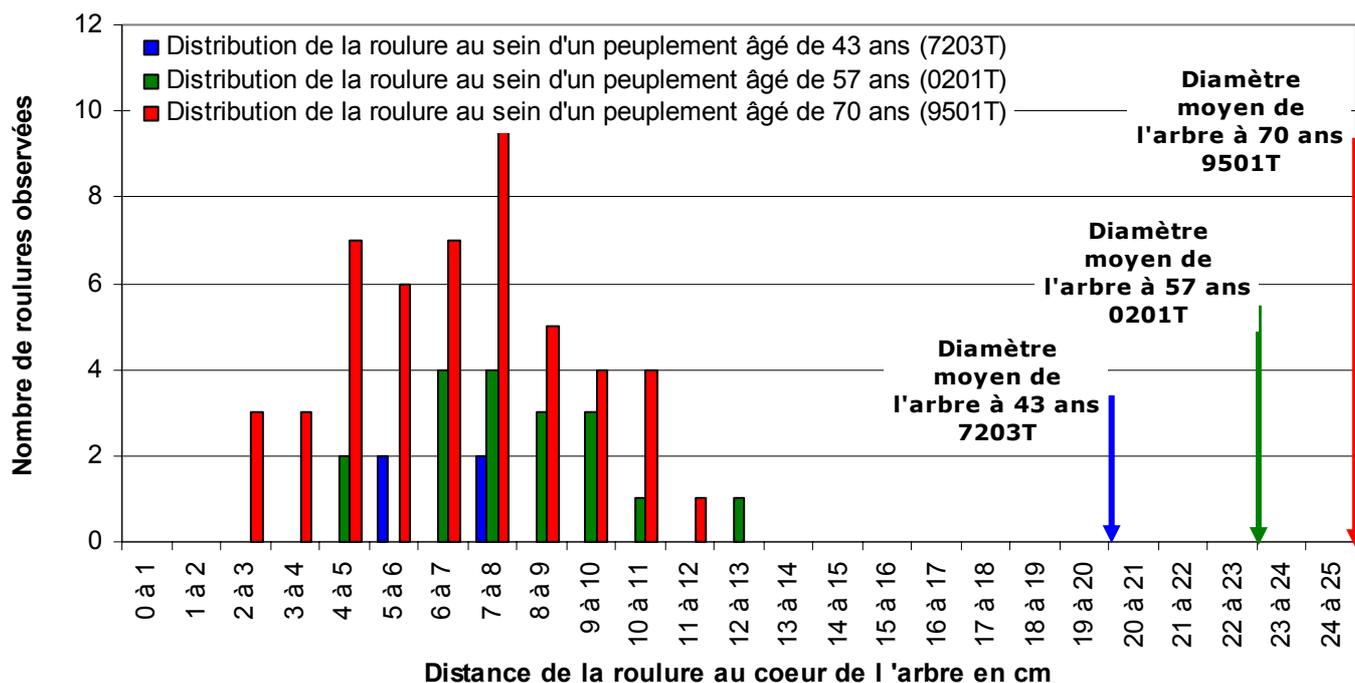


Figure n°62 : Evolution de la distribution de la roulure en fonction de l'âge parmi les arbres de peuplements non éclaircis

Pour analyser la dynamique de la distribution de la roulure en fonction du temps, nous avons comparé la répartition de cette dernière au sein de trois peuplements d'âges différents installés sur une station de fertilité équivalente.

Cette figure nous montre l'augmentation du nombre de roulures avec le temps. Dans les jeunes peuplements, les roulures, peu nombreuses, se distribuent ponctuellement. Avec le temps, une distribution normale se dessine. La fréquence maximale de roulure se déplace. Ces distributions se superposent.

Cette figure nous montre que :

La distribution de la roulure à un instant donné est la résultante d'une succession d'événements cumulatifs et contigus.

Ainsi, au regard de ces résultats, on peut aisément simuler l'évolution de la roulure le long du rayon d'un arbre n'ayant pas bénéficié de l'éclaircie. En parallèle, nous proposons une hypothèse apportant une explication de la modification de la distribution de la roulure dans l'arbre à l'issue de l'éclaircie.

Pour faciliter la compréhension, nous utiliserons un exemple graphique. L'hypothèse développée ci-dessous repose sur le fait que la roulure atteint sa fréquence maximale à la moitié du rayon (cf. Figure n°55).

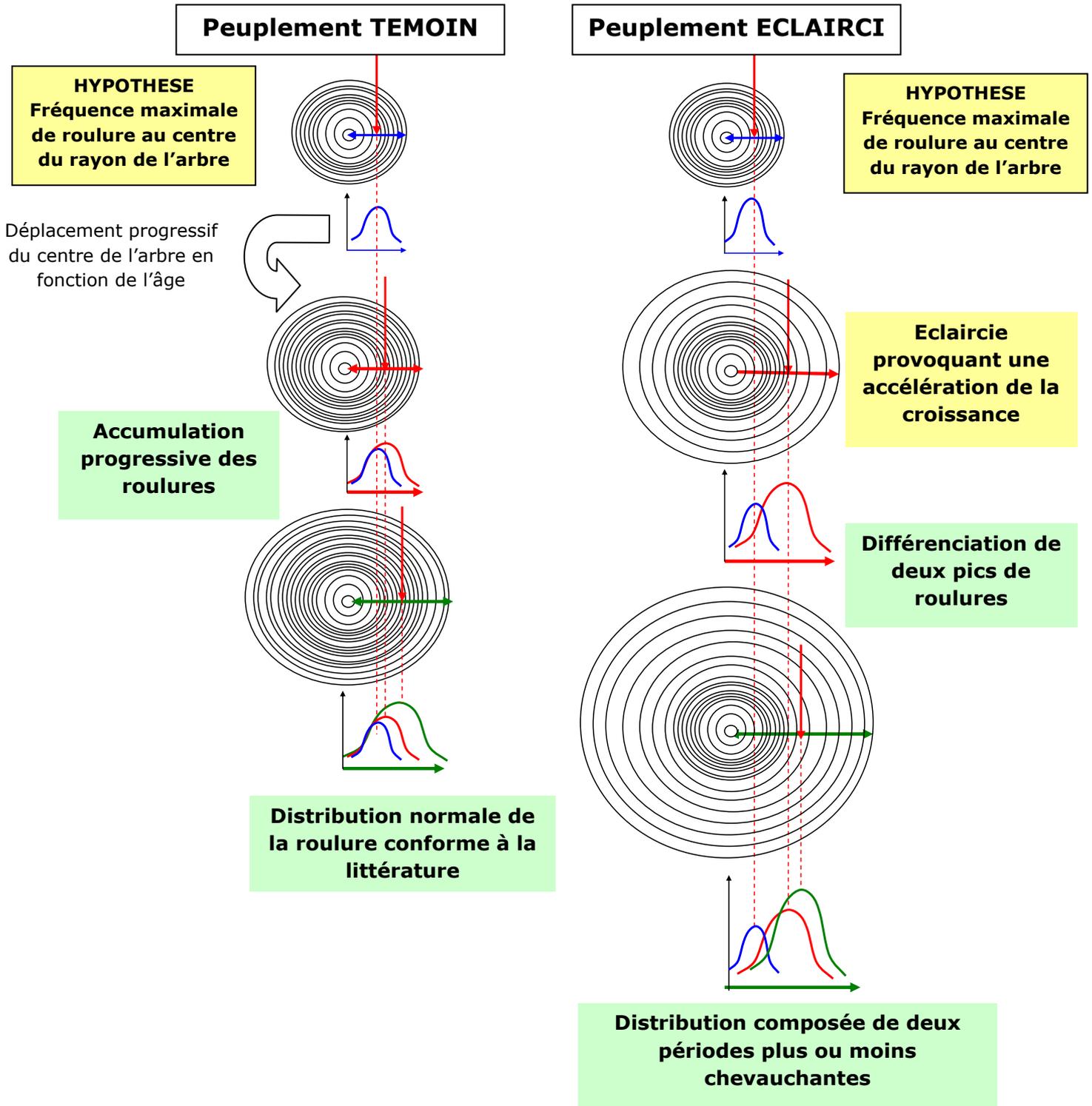


Figure n°63 : Essai d'explication : Pourquoi l'éclaircie modifie-t-elle la distribution de la roulure dans l'arbre ?

- **Au sein du peuplement non éclairci**

La fréquence de la roulure atteint son maximum aux environs de la moitié du rayon (cf. Figure n°55 et n°63). Seulement, l'arbre est une structure en constante évolution. Le milieu du rayon se déplace suivant le rythme de croissance généralement lent chez les peuplements non éclaircis. De fait, la zone où la fréquence de roulures est maximale progresse constamment et s'éloigne peu à peu du cœur. Ainsi, comme il est écrit plus haut, la distribution de la roulure à un instant t résulte d'une succession et d'une accumulation de distributions. Bien que pour faciliter la compréhension nous séparions l'évolution de la distribution en moment, elle se fait évidemment en continue.

- **Au sein du peuplement éclairci**

La problématique est différente (cf. Figure n°63). En effet, l'éclaircie a pour effet de modifier significativement la croissance de l'arbre. Ainsi, le déplacement du centre du rayon se fait rapidement à l'issue de l'intervention. Si l'hypothèse d'après laquelle la roulure atteint sa fréquence maximale au centre du rayon est maintenue, on peut alors supposer un déplacement significatif et brutal de la roulure dans l'arbre. Cela expliquerait la distribution de la roulure au sein du couple 9501E/9501T où l'on observe successivement deux pics identiques de roulures (cf. Figure n°58).

Cette hypothèse n'explique pas en quoi la roulure se concentre quasi-exclusivement avant l'à-coup de croissance chez les peuplements âgés et éclaircis tardivement et aléatoirement autour de l'à-coup chez les peuplements de moins de 45 ans. Il est probable que le déséquilibre Contraintes/Résistance du matériau ne soit pas du même ordre dans ces deux cas.

Il est montré que la largeur de cernes influence nettement la résistance mécanique du bois (Fonti, 2002, Cousseau et Zürcher, 2005). Les cernes étroits sont plus sensibles à la rupture radiale. De fait, le nombre de cernes potentiellement fragiles est d'autant plus important que l'éclaircie est tardive. L'augmentation de la largeur de cerne à l'issue de l'éclaircie favorise l'amélioration de la résistance radiale.

Pour les peuplements éclaircis tardivement, il est fort probable que la quasi-absence de roulures après l'éclaircie soit due à l'amélioration de la résistance du bois. Malgré que le risque de roulures soit maximal au centre du rayon de l'arbre, la roulure s'exprimera préférentiellement dans la zone à accroissement fin (avant l'à-coup de croissance) où la résistance du matériau est faible.

Pour les peuplements éclaircis avant 20 ans, malgré le ralentissement de la croissance, il n'y pas de série complète de cernes à accroissement fin. La différence entre l'accroissement courant avant et après éclaircie n'est pas du même ordre de grandeur que celle enregistrée au sein des peuplements éclaircis tardivement. Le matériau reste mécaniquement assez homogène autour de l'à-coup de croissance. La roulure va donc se répartir autour de celui-ci aussi bien avant qu'après.

5- Les outils d'évaluation de la roulure

5.1-Modèle de prévision de la roulure

5.1.1- Description du modèle

L'analyse linéaire multiple nous permet d'établir **un modèle expliquant environ 60% de la variabilité**. Ce modèle prend en compte trois variables : **l'âge, l'indice trophique défini à l'aide de la flore et la sylviculture**. Chacune de ces trois variables interviennent significativement dans le modèle au seuil de 5%. Le tableau ci-dessous décrit le modèle en question (cf. Tableau n°19).

Tableau n°19 : Description du modèle permettant d'évaluer le risque de roulure

n = 33 R = 0.76 R² = 0.59 SEE = 0.165

Variable	Coefficient	Std Error	t	P
Constant	0.30002	0.11131	2.69551	0.01157
Age	0.00642	0.00163	3.92618	0.00049
Sylviculture	0.1302	0.06043	2.15443	0.03965
Indice trophique	-0.10429	0.02721	-3.83244	0.00063

Ainsi,

Proportion de volume roulé = 0,006 x Age - 0.1 x indice trophique +0,13 x Sylviculture + 0.3

où ,

- l'indice trophique est défini à l'aide de la végétation et calculé à l'aide du logiciel "Ecoflore" (cf. Figure n°38)
- le facteur sylviculture prend la valeur **1 si le peuplement est éclairci** et **0 si le peuplement n'a pas bénéficié d'intervention**.

Au-delà du bénéfice apporté par un modèle de prévision de la roulure, il est intéressant de discuter de la signification biologique de ce dernier.

D'après ce modèle, l'âge engendre annuellement une augmentation du risque de roulure de 0,6% environ. Ainsi, la proportion d'arbres roulés augmenterait de 6% par décennie.

La sylviculture est un facteur aggravant. L'éclaircie provoque une augmentation de la proportion d'arbres roulés de 13% d'après le modèle. L'impact de l'éclaircie sur le risque de roulure était précédemment (cf. Tableau n°17) estimé à environ 20%. Il semblerait que le modèle en question sous estime le taux de roulures. Cette sous-évaluation résulte de l'influence des placettes éclaircies très tardivement (au-delà de 40 ans) pour lesquelles le taux de roulures n'excède seulement de quelques points le risque de roulure au sein des peuplements témoins.

L'indice trophique est un facteur prédisposant la roulure. Toutes choses égales par ailleurs, l'augmentation de l'indice trophique (baisse de l'acidité) permet une diminution du risque de roulure. Par exemple, le risque de roulure sur une station fertile (Xecoflore = 4, potentialités stationnelles excellentes pour le châtaignier) est 30% inférieur à une station de fertilité médiocre (Xecoflore = 1, taillis non améliorable).

5.1.2- Validité statistique du modèle

La roulure est un phénomène variable. Il est nécessaire d'évaluer la validité statistique du modèle.

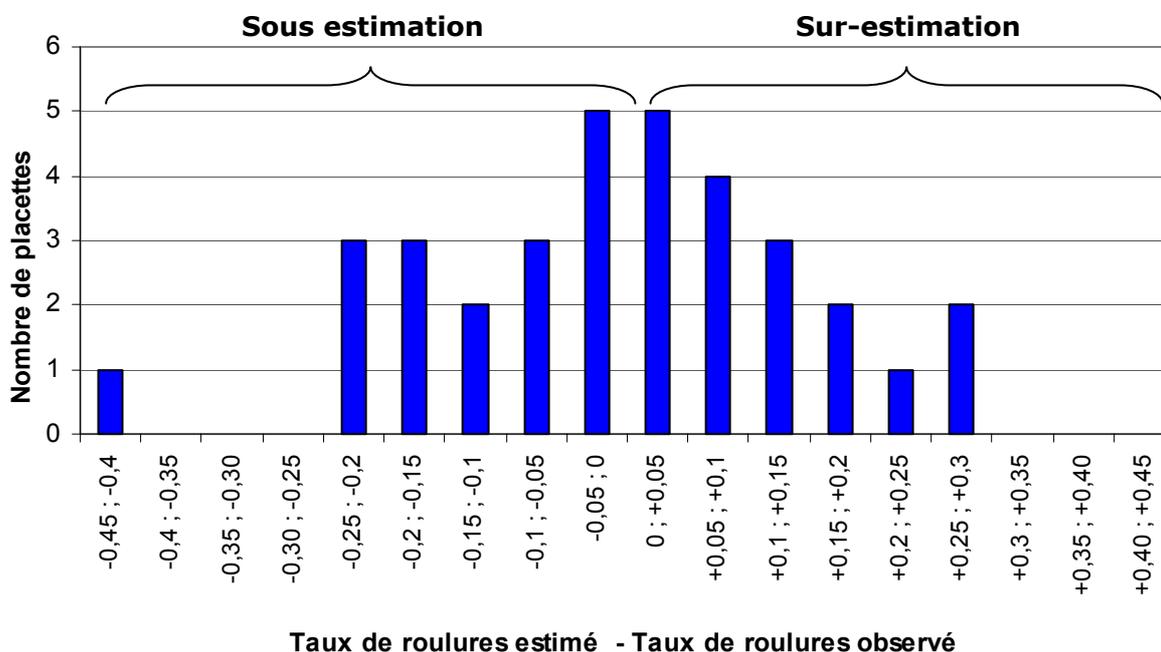


Figure n°64 : Distribution de la différence entre la proportion d'arbres roulés d'après le modèle et la proportion d'arbres roulés d'après les observations de terrain.

Le modèle est d'autant plus fiable que la différence entre la proportion estimée d'arbres roulés et la proportion d'arbres effectivement roulés est faible (cf. Figure n°64).

Ainsi,

Dans	29% des cas, la roulure estimée s'approche de la roulure observée à +/-	5%
Dans	50% des cas, la roulure estimée s'approche de la roulure observée à +/-	10%
Dans	65% des cas, la roulure estimée s'approche de la roulure observée à +/-	15%
Dans	79% des cas, la roulure estimée s'approche de la roulure observée à +/-	20%

Nous retenons que le modèle permet dans 65% des cas d'évaluer la proportion d'arbres roulés avec un risque d'erreur compris entre + 15% et -15%.

Ce modèle nous montre que la roulure est certes un phénomène variable mais non aléatoire. On peut dans 65% des cas la quantifier a priori au seuil de risque de 15%.

Nous pouvons poursuivre la démarche en testant la validité et la reproductibilité de l'outil précédemment établi dans deux autres régions géographiques pour lesquelles nous disposons des données nécessaires.

Par la suite, par commodité, nous appellerons le modèle préalablement défini par "**le modèle FOGEFOR**".

5.1.3- Reproductibilité du modèle FOGEFOR

5.1.3.1- La reproductibilité en Bretagne (Bonenfant, 1985)

Nous disposons d'une étude réalisée en 1985 par Bonenfant (Réf. [4]). Nous bénéficions ainsi de 24 placettes réparties en Bretagne pour lesquelles nous connaissons l'âge et l'indice trophique défini à l'aide de la flore. En revanche, l'histoire sylvicole et l'origine du peuplement sont inconnues. L'observation des densités nous permet de déduire que bon nombre de peuplements ont été éclairci (n=20). Il est aussi probable que certains peuplements soient issus de franc-pied. Rappelons que le modèle FOGEFOR est établi exclusivement à partir de taillis. C'est une limite importante à son utilisation.

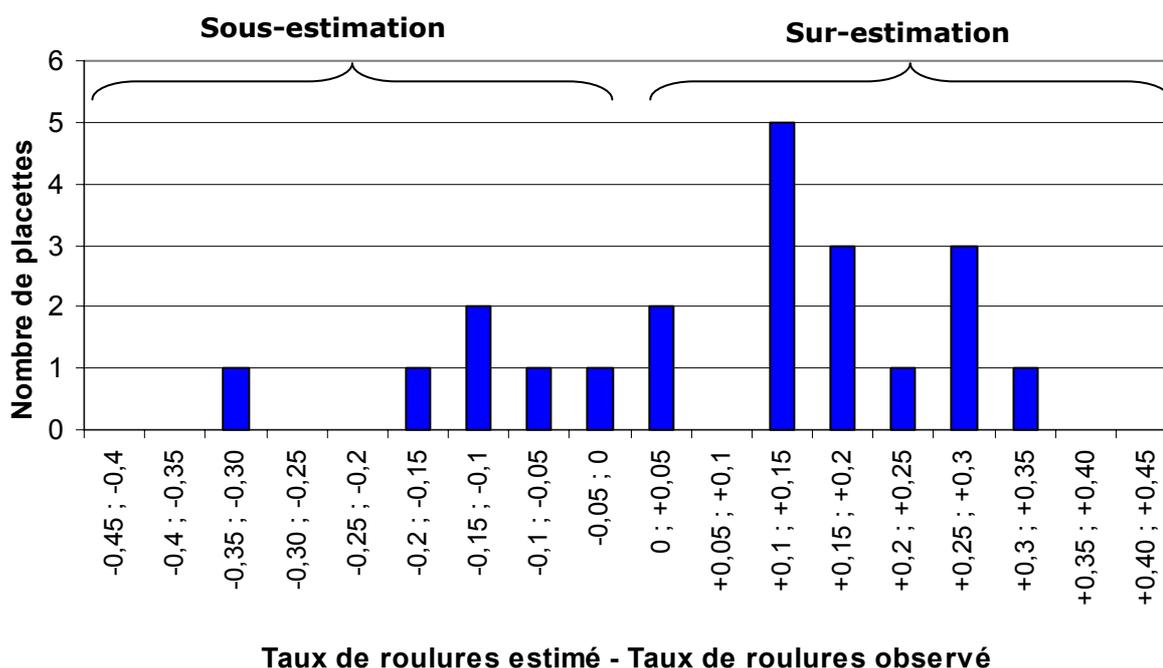


Figure n°65 : La reproductibilité du modèle : Peut-on étendre le modèle d'évaluation de la roulure à la Bretagne ?

La prévision de la roulure en Bretagne (d'après l'étude de Bonenfant, 1985) à l'aide du modèle préalablement défini est médiocre (cf. Figure n°65). On évalue le risque de roulure à +/- 15% seulement dans 43% des cas.

Dans 9% des cas, la roulure estimée s'approche de la roulure observée à +/-	5%
Dans 17% des cas, la roulure estimée s'approche de la roulure observée à +/-	10%
Dans 43% des cas, la roulure estimée s'approche de la roulure observée à +/-	15%
Dans 61% des cas, la roulure estimée s'approche de la roulure observée à +/-	20%

Le modèle en question surestime très nettement le risque de roulure en Bretagne. On surestime d'environ 25% le risque de roulure. Le modèle FOGEFOR pourrait être prolongé en Bretagne moyennant un réajustement.

La méconnaissance de la sylviculture en Bretagne et l'effet régional (cf. Figure n°13) peuvent expliquer le biais de 25%. Nous en discuterons prochainement dans un prochain paragraphe.

5.1.3.2- La reproductibilité en Limousin (Riboulet, IDF, 1990)

Comme pour l'étude de Bonenfant, nous bénéficions du jeu de données de l'étude en Limousin (Riboulet, IDF, 1990).

Le modèle FOGEFOR ne peut être utilisé pour l'évaluation de la roulure en Limousin. Comme il est précisé au paragraphe "Partie C, 3-", l'âge et la fertilité de la station n'expliquent pas la roulure. Le modèle n'est donc pas viable. De plus, l'indice trophique est compris entre 1 et 2. La surestimation de la roulure est alors importante.

5.2- Les outils d'évaluation de perte financière

5.2.1- Relation entre la proportion d'arbres roulés et la proportion de volume roulé

L'étude de la roulure en Limousin avait permis d'identifier une relation sans équivoque entre la proportion d'arbres roulés et la proportion de volume roulé (cf. Figure n°26). Cette dernière se décrit de la façon suivante : **Proportion de volume roulé = Proportion d'arbres roulés x 0,22**. Nous rappelons que la circonférence moyenne des peuplements étudiés était comprise entre 25 et 45 cm.

Nous trouvons une relation équivalente à celle définie en Limousin. Elle est de la forme suivante :

Proportion de volume roulé = Proportion d'arbres roulés x 0,18 (découpe fin bout comprise entre 15 et 20 cm)

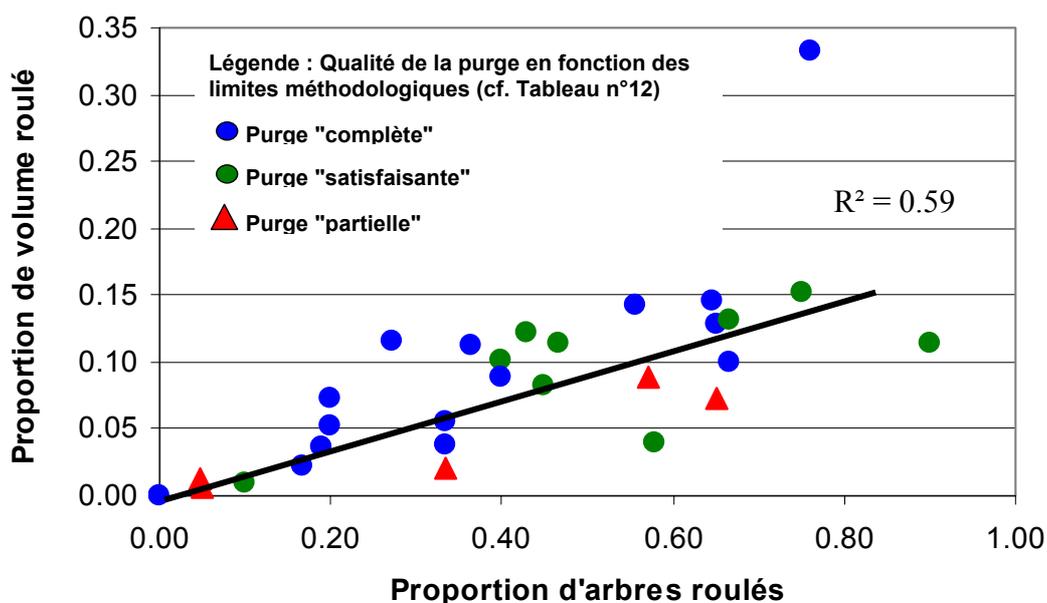


Figure n°66° : Relation entre la proportion d'arbres roulés et la proportion de volume roulé (n=29, P=1/1000).

L'impact des éclaircies tardives sur le risque d'apparition de la roulure

La relation définie en Limousin sur des petit bois est confirmée et reste valide sur des bois plus étoffés (cf. Figure n°66). Cette relation résulte du fait que la roulure se propage en moyenne à une hauteur comprise entre 1 et 1,2 m (cf. Figure n°51). La perte de volume induite par 1 m de purge est d'environ 20% et cela quelque soit la circonférence de l'arbre.

Dans le précédent paragraphe, nous avons présenté un outil qui permettait d'évaluer la proportion d'arbres roulés en fonction des conditions stationnelles, de l'âge et de la sylviculture (cf. Tableau n°29). Nous pouvons dès maintenant le compléter :

$$\text{Proportion de volume roulé} = 0,18 \times (-0,1 \times \text{Indice trophique} + 0,006 \times \text{Age} + 0,13 \times \text{Sylviculture} + 0,3).$$

Rappel : le facteur sylviculture prend la valeur "1" si le peuplement est éclairci et "0" si le peuplement n'a pas bénéficié d'intervention.

Il est important de faire remarquer au regard de ces résultats que la roulure entraîne certes une perte de volume non négligeable mais généralement inférieure à 20%.

5.2.2- Relation entre la proportion de volume roulé et la perte de valeur financière

Il s'avère que la proportion de volume est corrélée à la perte de valeur financière. Ainsi, par exemple, pour 10% de volume roulé, la perte de valeur financière des bois est de 10% environ. La relation est la suivante : Proportion de volume roulé = Perte de valeur financière (cf. Figure n°67)

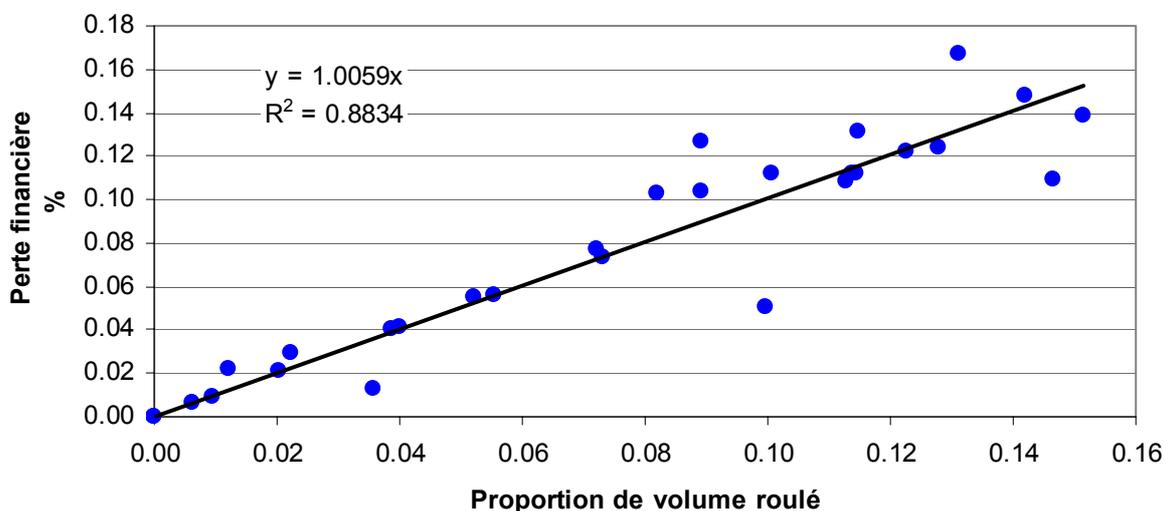


Figure n°67 : Relation entre la proportion de volume roulé et la perte de valeur financière (n=29, P=1/100).

Ainsi, nous pouvons franchir une nouvelle étape dans l'évaluation de la roulure.

$$\text{Perte de valeur financière} = 0,18 \times (-0,1 \times \text{Indice trophique} + 0,006 \times \text{Age} + 0,13 \times \text{Sylviculture} + 0,3).$$

Rappel : le facteur sylviculture prend la valeur "1" si le peuplement est éclairci et "0" si le peuplement n'a pas bénéficié d'intervention.

5.3-Bilan

5.3.1- Clé de risque de roulerie

A partir du modèle défini préalablement, on peut établir un abaque à double entrée permettant d'évaluer la proportion d'arbres roulés (cf. Tableau n°20).

Tableau n°20 : Proportion d'arbres roulés en fonction de l'âge et des indices trophiques définis à partir de la végétation

Si le peuplement a été éclairci, rajouté **0.13** à la valeur relevée dans la table.

	Indice trophique															
	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6	2.8	3	3.2	3.4	3.6	3.8	4
20	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24	0.22	0.20	0.18	0.16	0.14	0.12	0.10	0.08	0.06	0.04	0.02
22	0.33	0.31	0.29	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19	0.17	0.15	0.13	0.11	0.09	0.07	0.05	0.03
24	0.34	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24	0.22	0.20	0.18	0.16	0.14	0.12	0.10	0.08	0.06	0.04
26	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24	0.22	0.20	0.18	0.16	0.14	0.12	0.10	0.08	0.06
28	0.37	0.35	0.33	0.31	0.29	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19	0.17	0.15	0.13	0.11	0.09	0.07
30	0.38	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24	0.22	0.20	0.18	0.16	0.14	0.12	0.10	0.08
32	0.39	0.37	0.35	0.33	0.31	0.29	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19	0.17	0.15	0.13	0.11	0.09
34	0.40	0.38	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24	0.22	0.20	0.18	0.16	0.14	0.12	0.10
36	0.42	0.40	0.38	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24	0.22	0.20	0.18	0.16	0.14	0.12
38	0.43	0.41	0.39	0.37	0.35	0.33	0.31	0.29	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19	0.17	0.15	0.13
40	0.44	0.42	0.40	0.38	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24	0.22	0.20	0.18	0.16	0.14
42	0.45	0.43	0.41	0.39	0.37	0.35	0.33	0.31	0.29	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19	0.17	0.15
44	0.46	0.44	0.42	0.40	0.38	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24	0.22	0.20	0.18	0.16
46	0.48	0.46	0.44	0.42	0.40	0.38	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24	0.22	0.20	0.18
48	0.49	0.47	0.45	0.43	0.41	0.39	0.37	0.35	0.33	0.31	0.29	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19
50	0.50	0.48	0.46	0.44	0.42	0.40	0.38	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24	0.22	0.20
52	0.51	0.49	0.47	0.45	0.43	0.41	0.39	0.37	0.35	0.33	0.31	0.29	0.27	0.25	0.23	0.21
54	0.52	0.50	0.48	0.46	0.44	0.42	0.40	0.38	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24	0.22
56	0.54	0.52	0.50	0.48	0.46	0.44	0.42	0.40	0.38	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24
58	0.55	0.53	0.51	0.49	0.47	0.45	0.43	0.41	0.39	0.37	0.35	0.33	0.31	0.29	0.27	0.25
60	0.56	0.54	0.52	0.50	0.48	0.46	0.44	0.42	0.40	0.38	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28	0.26
62	0.57	0.55	0.53	0.51	0.49	0.47	0.45	0.43	0.41	0.39	0.37	0.35	0.33	0.31	0.29	0.27
64	0.58	0.56	0.54	0.52	0.50	0.48	0.46	0.44	0.42	0.40	0.38	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28
66	0.60	0.58	0.56	0.54	0.52	0.50	0.48	0.46	0.44	0.42	0.40	0.38	0.36	0.34	0.32	0.30
68	0.61	0.59	0.57	0.55	0.53	0.51	0.49	0.47	0.45	0.43	0.41	0.39	0.37	0.35	0.33	0.31
70	0.62	0.60	0.58	0.56	0.54	0.52	0.50	0.48	0.46	0.44	0.42	0.40	0.38	0.36	0.34	0.32

Exemple :

- Peuplement non éclairci, de 40 ans, indice trophique de 2 : **Proportion d'arbres roulés = 0.34**
- Peuplement éclairci, de 40 ans, indice trophique de 2 : **Proportion d'arbres roulés = 0.34 + 0.13 = 0.47**
- Risque d'erreur : dans 65% des cas, le risque d'erreur est inférieur à 15%

5.3.2- Simplification de la clé de risque de rouleure

La définition exacte de l'indice trophique comme le propose la clé ci-dessus (cf. Tableau n°20) nécessite d'effectuer une analyse complète et précise de la flore. Celle-ci est facilitée par l'usage du logiciel ECOFLORE (Bartoli, 2001). Seulement, cet outil atteint ces limites d'utilisation *in situ*...

Pour rendre la clé plus pertinente lors de son utilisation sur le terrain, nous avons donc simplifié le tableau précédent.

La simplification repose sur l'identification de plantes indicatrices à partir d'un tableau de contingence floristique. On a ainsi distingué trois groupes floristiques déterminants trois classes d'indice trophique (cf. Figure n°68).

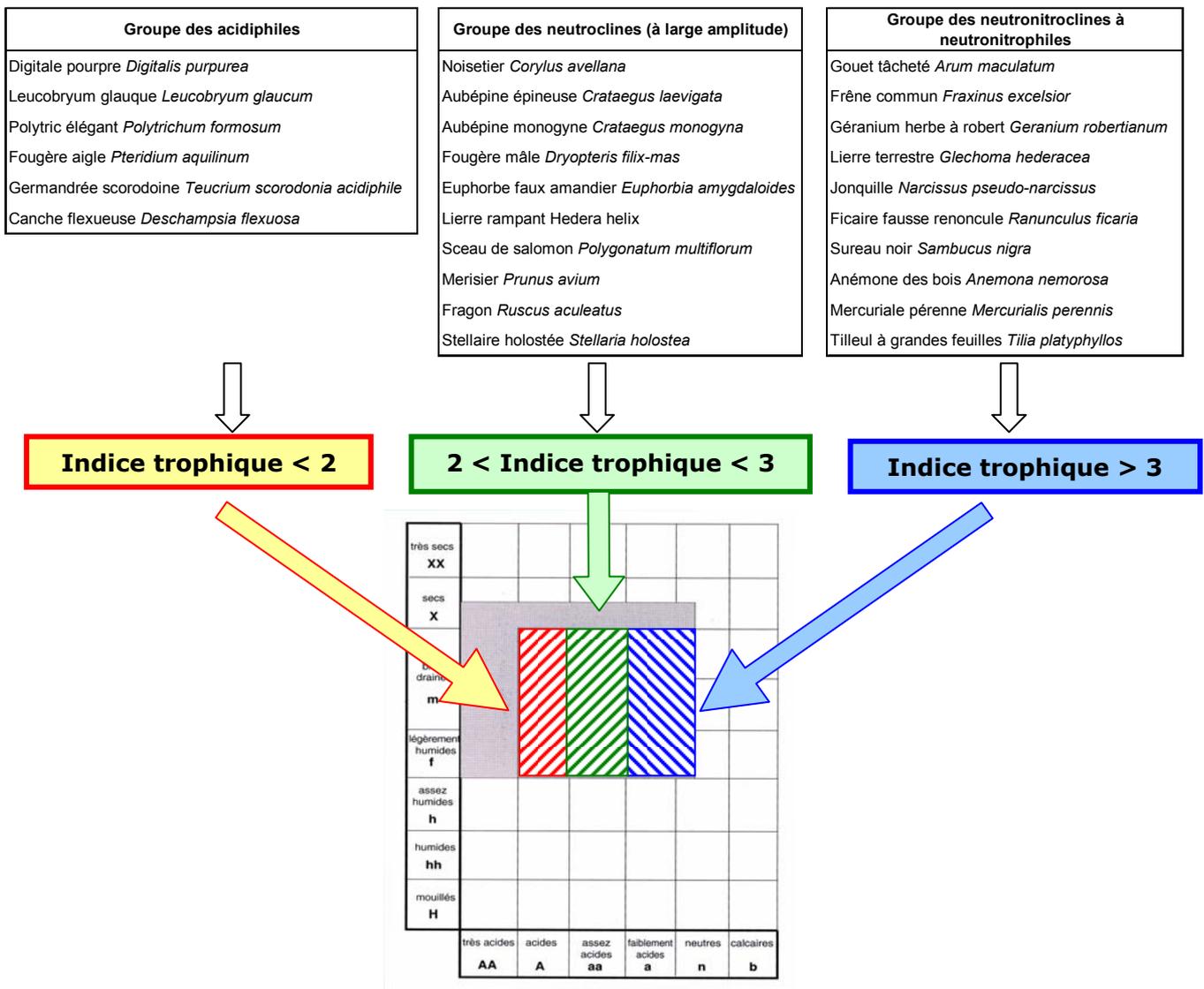


Figure n°68 : Simplification de la clé : définition des indices trophiques à l'aide de la flore

La présence d'une des six plantes acidiphiles lors d'un inventaire floristique conduit à classer la station parmi les stations peu fertiles où l'indice trophique est inférieur à 2. A l'inverse, la présence d'une espèce neutroclinaire est révélatrice d'une station à bonne potentialité pour le châtaignier. L'indice trophique est supérieur à 3.

Pour chaque niveau trophique défini ci-dessus (cf. Figure n°68), on peut à nouveau établir la relation entre la proportion d'arbres roulés et l'âge. Le risque de roulure est alors compris entre les deux bornes du niveau trophique (cf. Figure n°69).

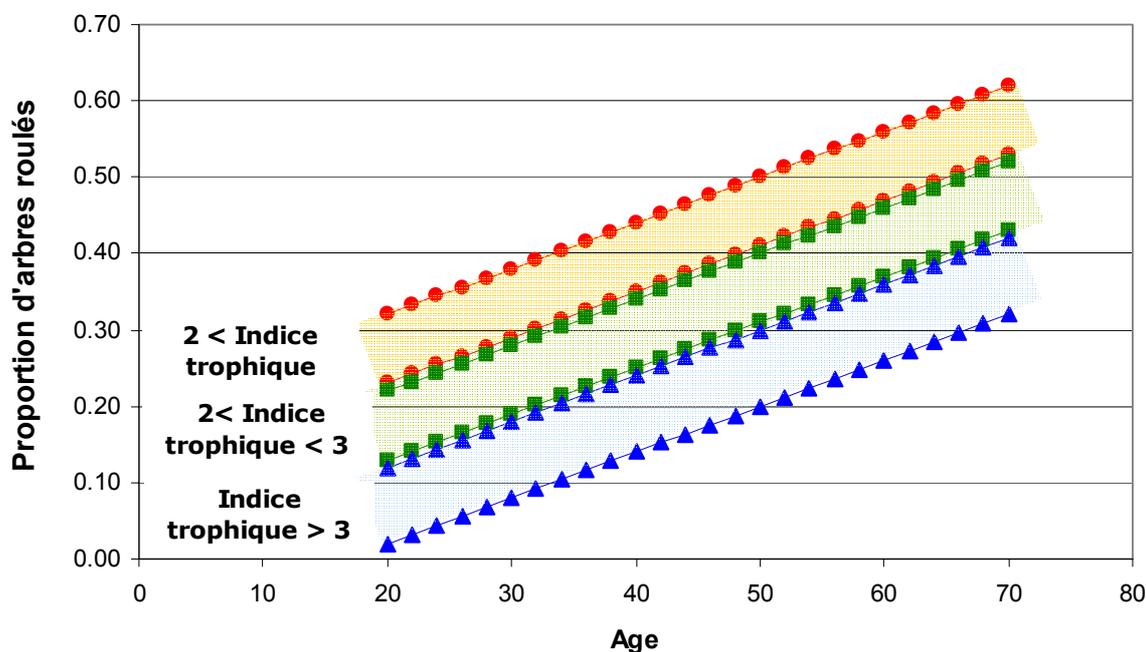


Figure n°69 : Simplification de la clé : relation entre la proportion d'arbres roulés et l'âge

La simplification de la détermination de l'indice trophique par l'identification de plantes indicatrices rend la clé utilisable et accessible à tous.

5.4-Conclusions et discussion

L'analyse combinée des différentes variables expliquant individuellement la roulure permet d'établir un modèle estimant la proportion d'arbres roulés. Dans 65% des cas, la différence entre le taux de roulure estimé et le taux de roulure observé est inférieure à 15%. L'application du modèle en dehors de la zone d'étude n'est pas valide. L'extension de ce dernier en Bretagne est possible moyennant un réajustement.

La limite d'utilisation est dans l'estimation de l'indice trophique défini à l'aide de la flore et calculé à l'aide du logiciel ECOFLORE. On peut s'affranchir du calcul exact de l'indice trophique en s'appuyant seulement sur l'identification de quelques plantes indicatrices.

La relation définie entre la proportion de volume roulé et la proportion d'arbres roulés d'après l'étude en Limousin est réaffirmée. La relation est équivalente. D'après cette dernière, la proportion de volume roulé dans un peuplement dont le taux de roulure est de 50% serait comprise entre 9 et 10%.

De plus, on peut déduire directement la perte économique à partir de la proportion de volume roulé. Si l'on reprend l'exemple cité précédemment, la perte financière ne dépasse pas 10% dans un peuplement dont 50% des tiges sont roulées.

Cela impose un regard critique sur les propos tenus à l'égard du châtaignier et de sa réputation « d'arbre à roulures ». En dehors des extrêmes stationnels, la perte en volume et la perte financière induites par la roulure ne sont pas aussi importantes qu'on peut l'entendre dire.

Les outils d'évaluation discutés ci-dessus, malgré leurs limites de validité, permettent de rationaliser les choix des propriétaires, d'affiner les itinéraires sylvicoles et d'inclure le risque de roulure dans les calculs économiques.

Grâce à ces outils d'évaluation, on peut, par exemple, déterminer l'âge d'exploitabilité à ne pas dépasser en fonction de la perte économique acceptée par la propriétaire (cf. Figure n°70).

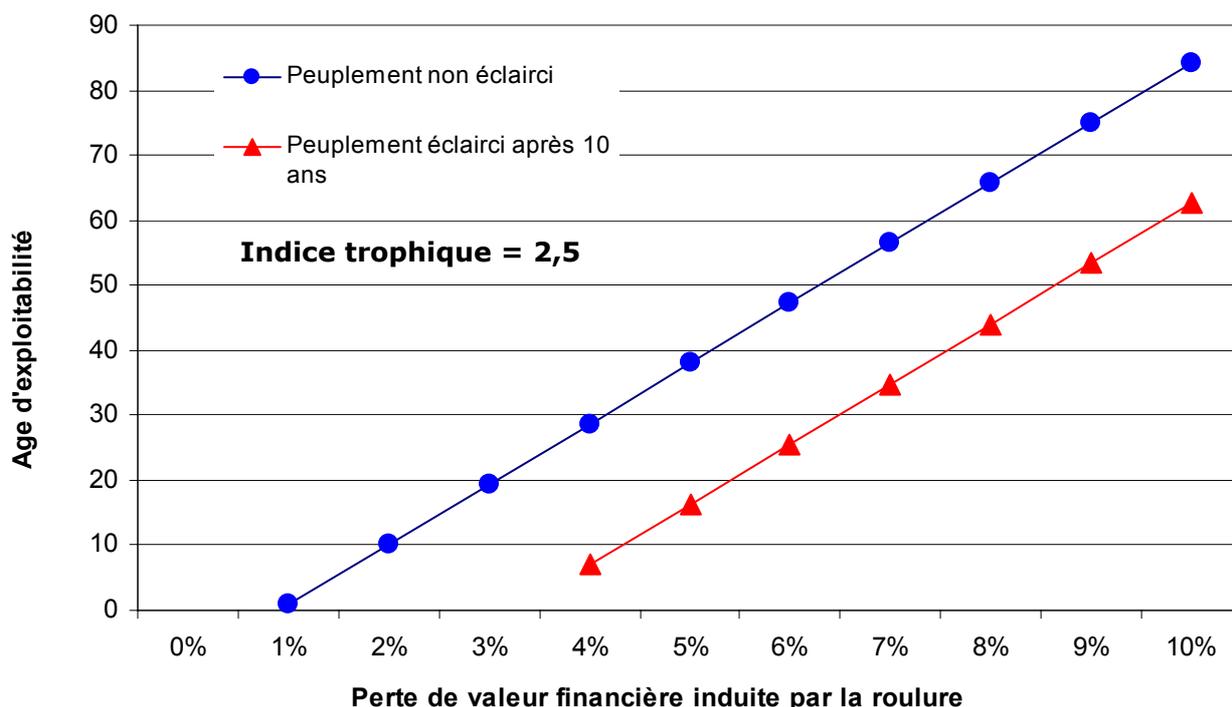


Figure n°70 : Définition de l'âge d'exploitabilité en fonction de la perte de valeur économique.

L'éclaircie tardive provoque une augmentation du taux de roulure d'environ 20%. Cela signifie que cette dernière entraîne une perte en volume ou en valeur financière 3 à 4% supérieure à celle du témoin.

Dans la mesure où l'on considère que la perte de valeur financière est acceptable jusqu'à 10%. On en déduit que l'âge d'exploitabilité au sein d'un peuplement éclairci tardivement est de 60 ans.

Dans le cas où l'éclaircie est réalisée après l'âge de 10 ans, la perte de valeur financière induite par la roulure sera d'environ 8 % à 45 ans.

Cette dernière remarque nous conduit à discuter les itinéraires sylvicoles.

6- Quelle(s) sylviculture(s) pour éviter l'augmentation du risque de roulure ?

Avant propos : La réflexion au sujet des itinéraires sylvicoles est à replacer dans un contexte stationnel et économique. En effet, les potentialités stationnelles et la filière du châtaignier sont différentes suivant les zones géographiques considérées. Nous nous sommes placés dans le contexte du nord de la Loire où les potentialités et le marché conduisent à la production de bois étoffé. Certaines des discussions présentées ci-dessous atteignent leurs limites dans le sud ouest.

Les précédents paragraphes nous ont permis d'évaluer l'impact des éclaircies sur le risque de roulure. A partir de ces observations, nous pouvons maintenant discuter des itinéraires sylvicoles techniquement et financièrement optimaux. Quelques rappels sont nécessaires.

6.1- Comment éviter l'augmentation du taux de roulure après l'éclaircie ?

Nous rappelons les principales conclusions définies ci-dessus :

- L'à-coup de croissance provoqué par une éclaircie a pour effet d'augmenter la proportion d'arbres roulés d'environ 20%.
- En dehors de toute concurrence, l'accroissement courant après l'éclaircie est supérieur à 2,5 cm/an. Cette valeur d'accroissement courant est obtenue pour l'ensemble des tiges du peuplement. L'accroissement courant des tiges co-dominantes et dominantes dépasse 3 cm/an.
- L'à-coup de croissance peut être évité. En effet, sur les stations de bonne fertilité (Indice trophique défini par la flore Xecoflore >2,3), **l'accroissement courant en circonférence passe sous le seuil de 2,5 cm/an (toutes tiges confondues) vers l'âge de 10 ans. L'intervention devra avoir idéalement lieu avant 10 ans.**

On peut éviter l'à coup de croissance, et l'augmentation du taux de roulure qui lui est inhérente, en intervenant avant que le couvert se ferme. Cela nous conduit à effectuer la première intervention à 10 ans. Les autres passages sont à prévoir en fonction de la concurrence.

Comment mesurer simplement la concurrence au sein d'un peuplement ?

6.2- La surface terrière : un indicateur sylvicole permettant de mesurer la concurrence

Les précédents résultats nous montrent que l'accroissement courant en circonférence est au moins égal à 2,5 cm/an durant les cinq années suivant l'éclaircie, toutes tiges confondues. Ainsi, on fait l'hypothèse que la concurrence s'exerce sur un arbre lorsque la valeur de son accroissement courant descend en dessous de ce seuil. Alors dans un peuplement non éclairci, **la concurrence commence à s'exercer entre 8 et 10 ans** (cf. Figure n°48).

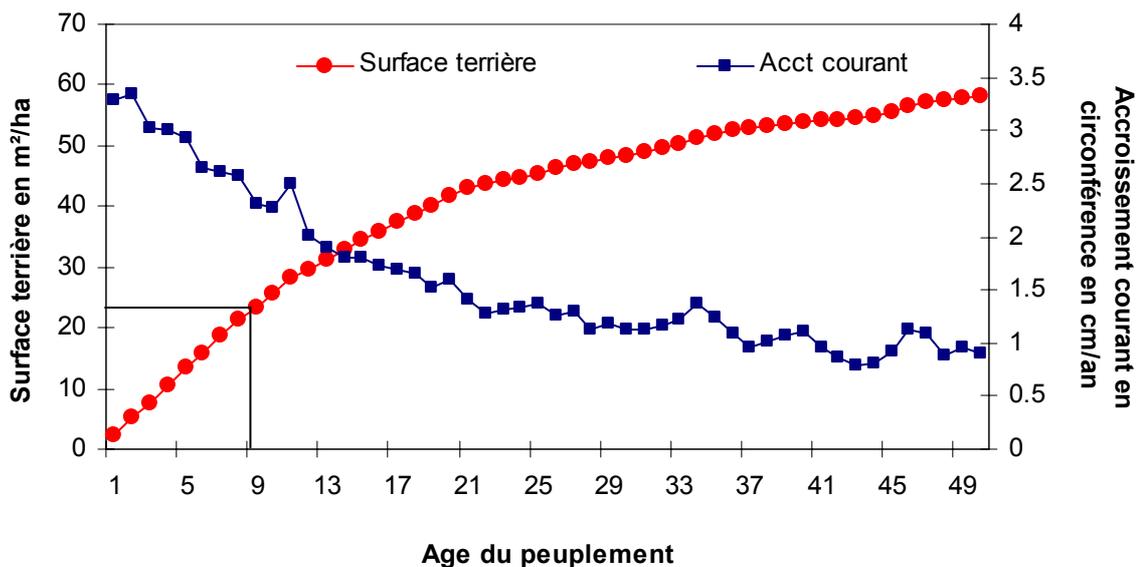


Figure n°71 : Evolution de l'accroissement courant et de la surface terrière en fonction de l'âge.

Ainsi, on peut en déduire la surface terrière à partir de laquelle le couvert se ferme et la concurrence s'exprime (cf. Figure n°71). A l'âge de 8-10 ans, l'accroissement courant dépasse la valeur seuil de 2,5 cm/an lorsque la **surface terrière est comprise entre 21 et 25 m²/ha**.

Au delà d'une surface terrière de 25 m²/ha, la concurrence s'exprime et l'éclaircie provoquera un à-coup de croissance.

C'est un élément déterminant pour l'établissement des itinéraires sylvicoles. Ce seuil est réutilisé par la suite.

6.3- Quelle est la densité maximale à ne pas dépasser pour une circonférence donnée

Nous savons que la surface terrière à ne pas dépasser au risque de provoquer l'à-coup de croissance lors du passage en éclaircie est comprise entre 21 et 25 m²/ha. On peut ainsi déduire la densité à ne pas dépasser pour une circonférence donnée. **La courbe ci-dessous constitue l'élément de base pour l'établissement d'itinéraires sylvicoles.**

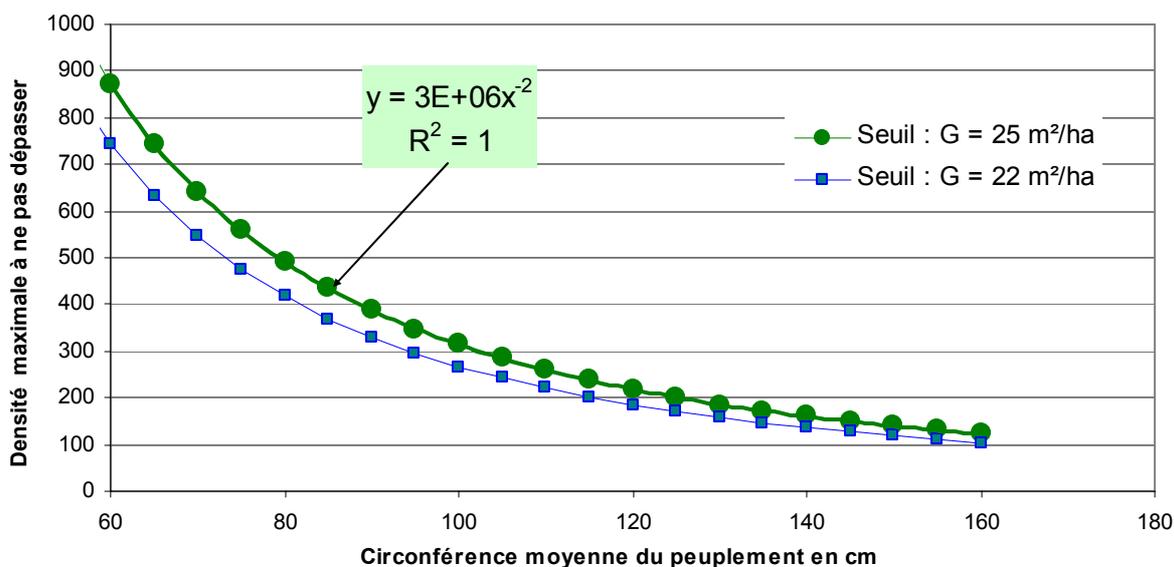


Figure n°72 : Densité à ne pas dépasser au risque de voir la concurrence s'exprimer en fonction de la circonférence moyenne du peuplement.

Par exemple, pour une circonférence moyenne de 120 cm, la densité à ne pas dépasser au risque de voir la concurrence s'exprimer est de 220 tiges/ha.

Les résultats présentés ci-dessus (cf. Figure n°72) ont été éprouvés et vérifiés à l'aide de quelques éléments bibliographiques à notre disposition. Bonenfant (1985) met en évidence la relation entre le diamètre de l'arbre à 1,5 m et le diamètre du houppier défini par $D_{houppier} = 14,80 \times D_{1,5} + 1,15$

Il montre ainsi que le diamètre du houppier est de 6,8 m pour une circonférence de 120 cm. Ainsi, pour cet exemple, la densité ne devra pas excéder 220 tiges/ha.

La croissance du peuplement est optimale si la densité du peuplement pour une circonférence donnée est inférieure à Densité maximale = $3.10^6 \times (Circonférence\ moyenne)^{-2}$

6.4- Après le dépressage/l'éclaircie, de combien de temps dispose-t-on avant que le couvert se referme ?

Les prochains tableaux sont le prolongement de la relation précédente : **Densité maximale = $3.10^6 \times (Circonférence\ moyenne)^{-2}$** .

Ils permettent de mesurer l'efficacité d'une éclaircie en évaluant le temps nécessaire pour que le couvert se referme.

Nous faisons l'hypothèse que la **réduction de la densité se fait en un seul passage**.

Tableau n°21 : Age à partir duquel le couvert se renferme en fonction de l'âge d'intervention et de la densité objective

Acct courant ap. Ecl = 3 cm/an		Densité objectif					
		200	400	600	800	1000	1200
	10	41	29	23	20	17	15
	11	41	29	23	19	17	15
	12	41	29	23	20	17	15
	13	42	29	23	20	17	15
	14	42	29	23	20	17	15
	15	42	29	24	20	17	
	16	42	30	24	20	17	
	17	43	30	24	20		
	18	43	30	24	20		
	19	43	30	24	20		
	20	44	30	24			
	21	44	31	24			
	22	44	31	24			
	23	45	31	25			
	24	45	32	25			
	25	46	32				
	26	46	33				
	27	47	33				
	28	47	33				
	29	48	34				
	30	48	34				
	31	49	35				
	32	49	35				
	33	50	35				
	34	50	35				
	35	51					

Acct courant ap. Ecl = 2.5 cm/an		Densité objectif					
		200	400	600	800	1000	1200
	10	47	32	26	22	19	16
	11	47	32	25	21	18	16
	12	47	32	25	21	18	16
	13	47	32	25	21	18	16
	14	48	32	25	21	18	15
	15	48	32	25	21	18	
	16	48	32	25	21	17	
	17	48	33	25	21		
	18	48	33	25	20		
	19	48	33	25	20		
	20	48	33	25			
	21	49	33	25			
	22	49	33	25			
	23	49	33	25			
	24	50	33	25			
	25	50	34				
	26	50	34				
	27	51	34				
	28	51	34				
	29	52	35				
	30	52	35				
	31	52	35				
	32	53	36				
	33	53	36				
	34	53	36				
	35	54					

Nota : La vitesse de fermeture du peuplement dépend de l'accroissement courant après éclaircie. Nous avons retenu deux hypothèses :

- **Accroissement courant en circonférence après éclaircie : 2,5 cm/an, accroissement courant moyen sur l'ensemble du peuplement**
- **Accroissement courant en circonférence après éclaircie : 3 cm/an, accroissement courant moyen sur les tiges dominantes et co-dominantes**

La seconde hypothèse est la plus vraisemblable puisque l'on travaille au profit des tiges co-dominantes et dominantes lors de l'éclaircie.

Dans le cas où **la première intervention est réalisée à 10 ans** (cf. Tableau n°20) :

- Une éclaircie réduisant la densité du peuplement à **200 tiges par hectare** permet de maintenir le peuplement en dehors de concurrence **jusqu'à l'âge de 40 ans**, c'est-à-dire jusqu'à la fin de vie du peuplement.
- A l'inverse, une éclaircie conservant plus de **800 tiges/ha** devient rapidement **obsolète**. Le couvert s'est déjà refermé à l'âge de 20 ans.
- L'éclaircie à 600 tiges/ha est le compromis. Elle permet de maintenir le peuplement ouvert jusqu'à l'âge de 23-25 ans. Un second passage s'imposera.
- **ATTENTION**, une éclaircie précoce (10 ans) et violente (200 tiges/ha après éclaircie) peut engendrer de nombreux problèmes qualitatifs (mauvaise élagage naturel, gourmands).

6.5- Une éclaircie ? mais pour quels types de produits ?

Nous pouvons déduire des précédents paragraphes la circonférence moyenne du peuplement à un âge d'exploitabilité donné. Nous avons retenu deux âges d'exploitabilité : 45 et 60 ans. L'accroissement courant après l'éclaircie est fixé à 3 cm/an.

Tableau n°22 : Circonférence moyenne atteinte en fonction de l'âge et de l'intensité de l'éclaircie pour deux âges d'exploitabilité

Age d'exploitabilité = 45 ans

Circonférence moyenne au sein d'un peuplement

NON Eclairci = 67 cm

Acct courant ap. Ecl = 3 cm/an		Densité objectif					
		200	400	600	800	1000	1200
	10	127	107	95	86	82	73
	11	126	107	94	86	74	72
	12	125	105	93	84	73	71
	13	125	104	92	83	79	74
	14	124	103	91	82	78	
	15	122	102	89	83	76	
	16	121	102	88	81		
	17	121	101	89	80		
	18	119	99	87	79		
	19	118	98	86			
	20	118	97	85			
	21	116	95	83			
	22	114	95	81			
	23	113	93				
	24	111	93				
	25	110	91				
	26	108	89				
	27	107	89				
	28	105	87				
	29	103	85				
	30	101	85				
	31	99	83				
	32	97	81				
	33	95	81				
	34	94					
	35	92					

Age d'exploitabilité = 60 ans

Circonférence moyenne au sein d'un peuplement

NON Eclairci = 81 cm

Acct courant ap. Ecl = 3 cm/an		Densité objectif					
		200	400	600	800	1000	1200
	10	146	120	107	99	95	89
	11	146	120	107	98	91	88
	12	144	118	105	97	89	87
	13	145	117	104	96	92	88
	14	144	116	103	95	91	
	15	143	115	102	95	90	
	16	141	115	100	94		
	17	142	114	101	93		
	18	140	113	100	91		
	19	139	111	98			
	20	140	110	97			
	21	138	108	95			
	22	136	109	93			
	23	136	107				
	24	134	107				
	25	134	105				
	26	133	103				
	27	133	104				
	28	131	102				
	29	130	100				
	30	128	100				
	31	128	98				
	32	126	96				
	33	126	96				
	34	124					
	35	122					

Nous faisons toujours l'hypothèse que la réduction de la densité se fait en un seul passage.

Dans le cas où **la première intervention est réalisée à 10 ans** (cf. Tableau n°23) :

- On peut escompter obtenir à 45 ans un peuplement dont la circonférence moyenne est de 125-130 cm. A 60 ans, la circonférence moyenne est de 146 cm. Dans ce cas, le peuplement à dépasser le seuil de surface terrière depuis 20 ans (à l'âge de 41 ans).
- Une densité finale de 400 tiges/ha ne permet pas d'atteindre la circonférence objective de 120 cm à 45 ans mais 15 ans plus tard à 60 ans.
- Une éclaircie précoce conservant plus de 800 tiges n'a que peu d'effets sur la circonférence moyenne en comparaison au témoin.

6.6- Bilan

Retenons,

- Pour maintenir le peuplement en dehors des contraintes de concurrence, la surface terrière doit être inférieure à 25 m²/ha. La croissance du peuplement est optimale si la densité du peuplement pour une circonférence donnée est inférieure à Densité maximale = $3.10^6 \times (\text{Circonférence moyenne})^{-2}$
- Les éclaircies ou les dépressages maintenant 800 tiges/ha sont rapidement obsolètes. Le couvert se referme quelques années après l'intervention.
- Une intervention précoce et dynamique permet d'atteindre aux environs de 40 ans un peuplement dont la circonférence moyenne est proche de 120 cm.
- La réduction de la densité en un seul passage dans le jeune âge peut compromettre la qualité. Deux interventions sont préférables.

Ainsi, au regard de ces résultats, on peut définir plusieurs itinéraires sylvicoles. Ils ont pour objectifs :

- d'éviter l'augmentation du taux de roulure après l'éclaircie ;
- d'optimiser la croissance ;
- de ne pas compromettre la qualité des bois.

Ces itinéraires sont des repères, tous les intermédiaires sont possibles (cf. Tableau n°23).

Tableau n°23 : Proposition d'itinéraires sylvicoles n'engendrant pas une augmentation du taux de roulure

Age d'exploitabilité = **45 ans**

Perte de valeur due à la roulure = **5 à 6%** (indice trophique est de 2.5 (cf. Figure n°70))

Circonférence objective = **125-130 cm**

Rythme de croissance : **Optimisé**

	Premier passage				Second passage		
	Age	Densité après intervention	Travaux	Commentaires	Age	Densité après intervention	Commentaires
Itinéraire 1	10	200	Passages en élagage	<i>Problèmes qualitatifs</i>	-	200	-
Itinéraire 2	10	400	Passages en élagage	<i>Problèmes qualitatifs</i>	25-30	200	Produits commercialisables
Itinéraire 3	10	600	-		20-25	200	Produits commercialisables
Itinéraire 4	10	800	-	<i>Couvert se referme rapidement</i>	18-20	200	Produits commercialisables ??

Il est à noter que les itinéraires discutés ci-dessus sont semblables à ceux rapportés dans la littérature.

Outre l'optimisation technique, il est important de vérifier la pertinence économique.

L'itinéraire 3 semble être optimal. Il ne compromet pas la qualité des bois et assure une croissance soutenue. Il n'entraîne pas une augmentation du taux de roulure. Il sera utilisé comme référence dans l'analyse financière.

7- La rentabilité de la sylviculture

L'évaluation de la rentabilité est bien souvent une opération délicate et parfois subjective. Le choix des taux d'actualisation, des prix unitaires, le modèle de croissance... sont autant de variables sujettes aux critiques. Conscient de ces limites, l'évaluation de la rentabilité reste néanmoins un outil de réflexion. La partie suivante n'a pas d'autres ambitions que de fournir un éclairage financier aux préconisations sylvicoles établies ci-dessus. Sa lecture doit être critique et considérée avec recul.

7.1- Les préalables à l'évaluation de la rentabilité

7.1.1- La grille de prix

La fixation d'une grille de prix est un travail préalable à l'évaluation de la rentabilité financière. Cette grille fut construite à partir des cours du bois observés sur les cinq dernières années (cf. Figure n°7). Nous avons toutefois apporté une modification. La classe de circonférence 90-120 a été divisée en deux classes : 90-105 et 105-120 cm. Le prix unitaire des arbres appartenant à cette première classe est fixé à 25 € au lieu de 50 €. Parmi les peuplements non éclaircis de plus de 45 ans, une proportion importante de volume est en limite des classes 60-90 et 90-120. Ainsi, le maintien du prix à 50 € engendrerait une surestimation de la valeur de la parcelle (cf. Tableau n°24).

Tableau n°24 : Grille de prix pour l'évaluation financière

Classe de circonférence de l'arbre	Prix unitaire en €/m ³
>150	100
120-150	70
105-120	50
90-105	25
60-90	10
<60	2

7.1.2- Les outils d'évaluation financière

Pour l'évaluation financière, nous avons utilisé trois indicateurs reposant sur le principe de l'actualisation :

- Le **Bénéfice actualisé** (BAo) à l'année 0 : c'est la différence entre les recettes et les dépenses actualisées d'un projet ramené à l'année 0. Il permet de comparer des projets de montants voisins et de durées équivalentes :

$$BAo = \sum \frac{(\text{Recette à l'année } i - \text{Dépense à l'année } i)}{(1 + \text{Taux actualisation})^{\text{année } i}}$$

- Le **Bénéfice actualisé (BASIo) à l'année 0 de la séquence infinie** : avec cet indicateur, le projet est reconduit à l'infini. Il permet de comparer des projets de durées et de montants variables :

$$\text{BASIo} = \text{BAo} \times \frac{(1 + \text{Taux d'actualisation})^{\text{Durée du projet}}}{(1 + \text{Taux d'actualisation})^{\text{Durée du projet}} - 1}$$

- Le **taux interne de rentabilité (TIR)** : c'est la valeur du taux d'actualisation pour lequel le BASIo s'annule. C'est le taux exact du fonctionnement du projet. Ce dernier est d'autant plus rentable que le TIR est élevé.

Ces indicateurs reposent sur le choix d'un taux d'actualisation. Le taux choisi est précisé à chaque étape de l'argumentation.

7.1.3- Valeur de la parcelle non éclaircie en fonction de la circonférence moyenne du peuplement

Pour les peuplements non éclaircis, on peut aisément prévoir la valeur de la parcelle en fonction de la circonférence moyenne du peuplement (cf. Figure n°73).

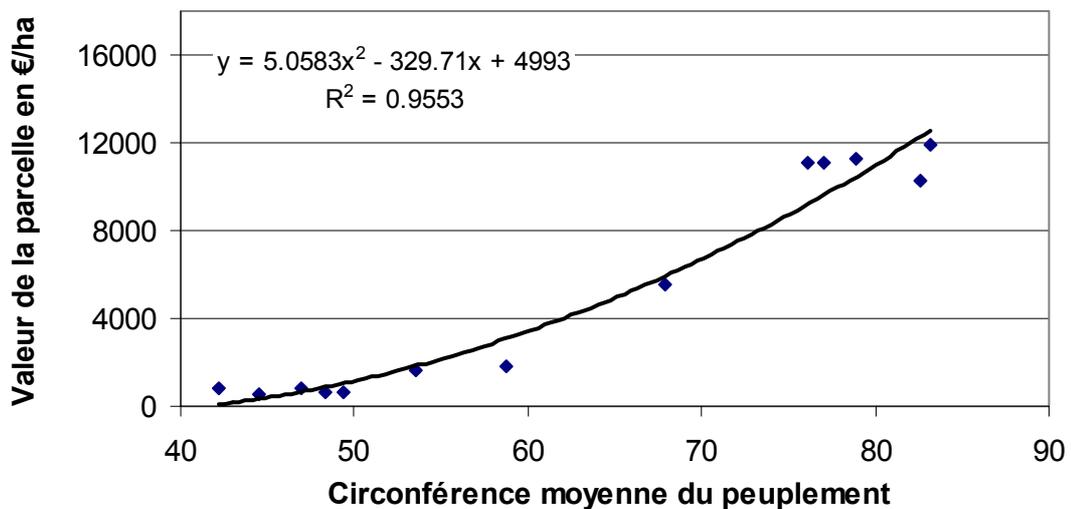


Figure n°73 : Relation entre la circonférence moyenne (cm) et la valeur de la parcelle (€/ha)

Par exemple, d'après notre mode d'évaluation, la valeur sur pied d'un peuplement non éclairci de 67 cm de circonférence (environ 45 ans) est d'environ 5 600 €/ha.

Outre l'intérêt de cette relation pour l'évaluation économique d'un peuplement témoin, elle permet de connaître la recette théorique à escompté d'une éclaircie.

Cette évaluation est quantitative (volume et prix global par classes de circonférence) et ne repose pas sur des critères qualitatifs.

7.2- Rentabilité financière d'un peuplement non éclairci

A un âge donné, il est possible de prévoir la circonférence moyenne du peuplement en fonction de la relation suivante : $C_m = \text{Age} \times 0.914 + 25.37$ ($n=14$, $r^2 = 0.91$). Cette relation fut définie à l'aide d'une régression linéaire à partir des peuplements témoins.

On en déduit alors la valeur de la parcelle à l'aide de la relation définie ci-dessus (cf. Figure n°73).

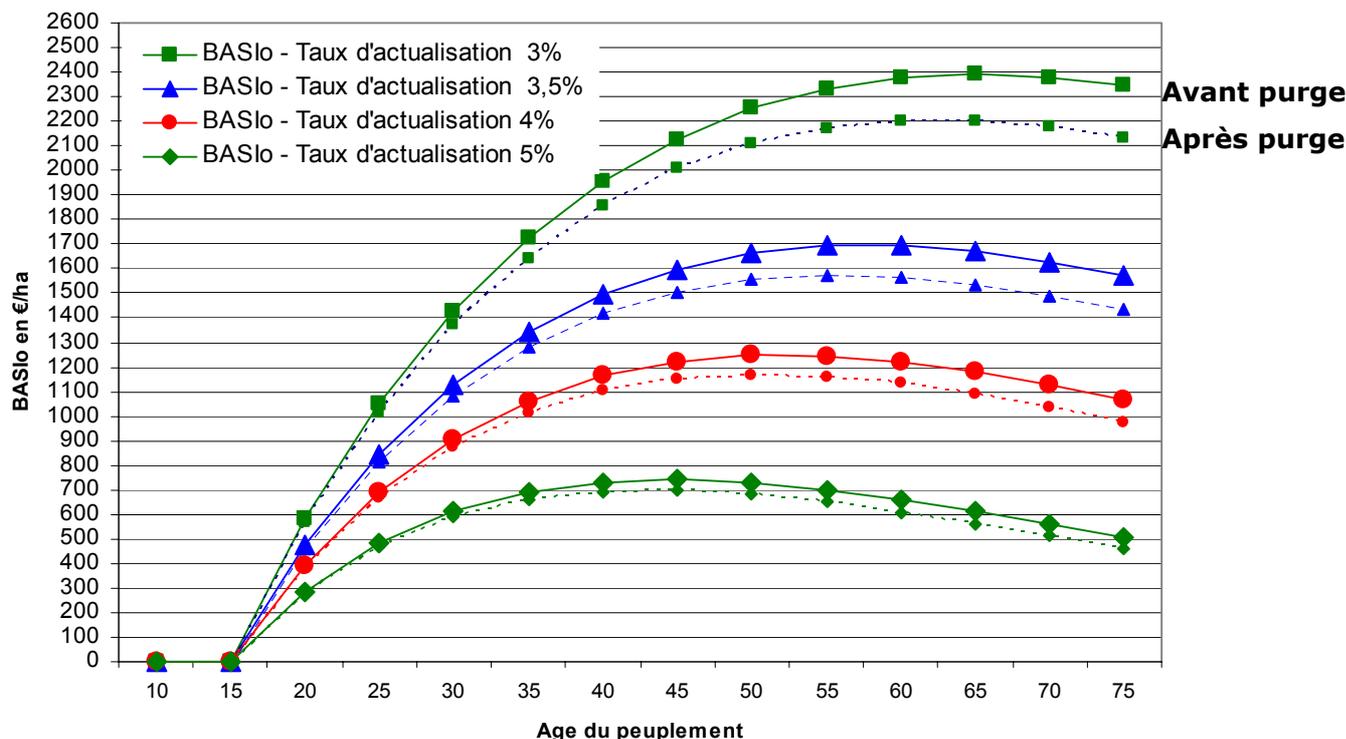


Figure n°74 : Evolution du BASIo en fonction de l'âge du peuplement et du taux d'actualisation
Nota : les courbes représentées en pointillées correspondent à la valeur du BASIo après purge

Le BASIo maximum est atteint entre 45 et 65 ans suivant le taux d'actualisation choisi (cf. Figure n°74).

Ces courbes d'étalonnage permettent la comparaison de la rentabilité de différents itinéraires sylvicoles.

7.3- Rentabilité financière d'un peuplement éclairci

7.3.1- A quel âge doit-on récolter le peuplement pour assurer un BASIo maximal ?

Le bénéfice est d'autant plus important que la croissance est rapide. Celle-ci ne peut être assurée que par une éclaircie forte et précoce. Nous cherchons à déterminer l'âge et la circonférence pour lesquels le BASIo est maximum. Au regard des conclusions précédentes, nous faisons l'hypothèse que le peuplement est éclairci à l'âge de 10 ans et que la densité est ramenée à 200 tiges/ha.

Hypothèses : Age d'exploitabilité = ?

Taux d'actualisation = 4%

Indice trophique : 2.5

% de volume roulé = $0.18 \times (0.006 \times \text{Age} - 0.1 \times \text{I. Trophique} + 0.13 \times \text{Sylvi} + 0.3)$

Accroissement courant après éclaircie = **3 cm/an** en circonférence

Montant de l'intervention (dépressage, éclaircie) : **1500 €/ha**

Taux de prélèvement du volume lors de l'éclaircie : **80%**

Circonférence objective : ?

Densité après éclaircie : **200 tiges/ha**

Nombre de passages : **1**

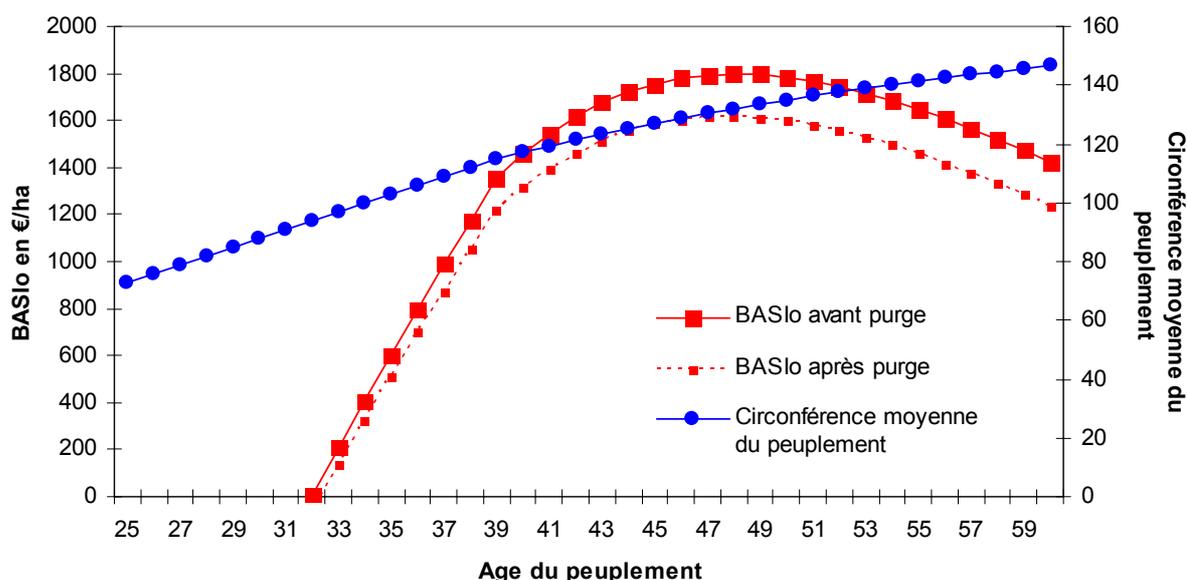


Figure n°75 : Age et circonférence pour optimiser le BASlo

Dans les conditions fixées précédemment (cf. Figure n°75),

le BASlo atteint sa valeur maximale lorsque la circonférence atteint 137 cm et que l'âge est proche de 48 ans.

A ce même âge, pour un taux d'actualisation équivalent (4%), la valeur du BASlo au sein d'un peuplement non éclairci est de 1241 €/ha. **L'éclaircie a permis d'augmenter de 45% le bénéfice actualisé (BASlo) du propriétaire.**

Cette première évaluation rapide nous démontre que l'éclaircie **apporte une réelle plus value au propriétaire**. Seulement, le schéma sylvicole permettant d'optimiser la production et le bénéfice actualisé n'est que rarement suivi. Les contraintes technico-économiques en sont souvent les causes (main d'œuvre pour la réalisation de l'intervention, coût de l'intervention,...)

Dans les prochains paragraphes, nous testerons l'effet de différents scénarios sylvicoles sur le BASlo.

Deux méthodes d'évaluation de la rentabilité financière ont été réalisées :

- la première méthode permet d'évaluer la rentabilité financière d'un projet pour **un âge d'exploitabilité donné** ;
- la seconde méthode permet d'évaluer la rentabilité financière d'un projet pour **une circonférence objective**.

Pour faciliter l'approche économique, la densité finale du peuplement est atteinte en un seul passage.

7.3.2- Calcul de rentabilité à un âge d'exploitabilité fixe

D'après cette méthode, l'âge d'exploitabilité est fixe. On considère que le risque de roulure après 45 ans est trop élevé.

Hypothèses : Age d'exploitabilité = 45 ans

Taux d'actualisation = 4%

Indice trophique : 2.5

% de volume roulé = $0.18 \times (0.006 \times \text{Age} - 0.1 \times \text{I. Trophique} + 0.13 \times \text{Sylvi} + 0.3)$

Accroissement courant après éclaircie = 3 cm/an en circonférence

Montant de l'intervention (dépressage, éclaircie) : 1500 €/ha

Taux de prélèvement du volume lors de l'éclaircie : 80%

Circonférence objective : **Variable**

Densité après éclaircie : **Variable**

Nombre de passages : 1

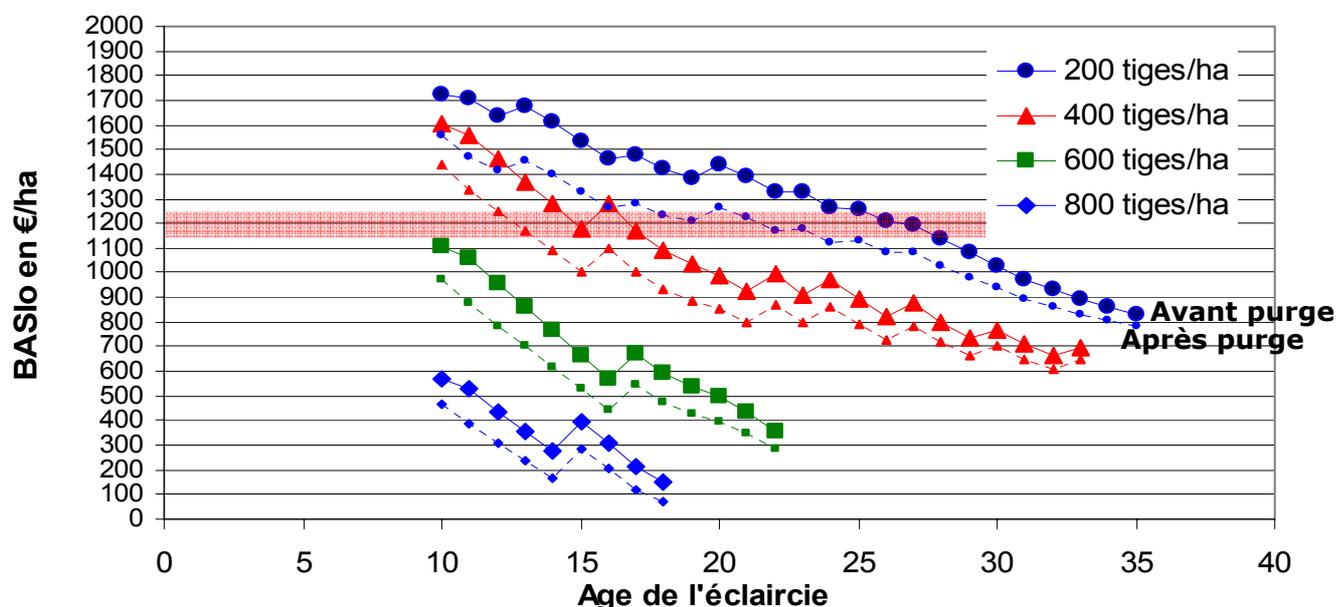


Figure n°76 : Evolution du BASIo en fonction de l'âge de l'éclaircie et de la densité après éclaircie.

Le BASIo d'un peuplement témoin de 45 ans est de 1222 €/ha (1152 €/ha après purge). Ainsi, le dépressage/l'éclaircie apporte une réelle plus value au propriétaire si l'intervention est précoce et forte (cf. Figure n°76)

Dans les conditions préalablement fixées, le dépressage/l'éclaircie maintenant une densité finale supérieure à 600 tiges/ha, quelques soit l'âge de l'éclaircie, est économiquement obsolète. L'augmentation de la croissance engendrée par une éclaircie pas assez dynamique ne permet pas de compenser l'investissement entrepris par le propriétaire.

Pour être économiquement viable, la densité à l'issue de l'éclaircie ne doit pas excéder 400 tiges/ha.

Une intervention à 400 tiges/ha après 15 ans ou une intervention à 200 tiges/ha à 21 ans rend la sylviculture obsolète dans les conditions fixées.

7.3.3- Calcul de rentabilité à circonférence objective

Cette fois-ci, l'âge d'exploitabilité est variable. On considère que le peuplement n'a d'intérêt que si la circonférence moyenne du peuplement dépasse 120 cm.

Hypothèses : Age d'exploitabilité = **variable**

Taux d'actualisation = **4%**

Indice trophique : **2.5**

% de volume roulé = **$0.18 \times (0.006 \times \text{Age} - 0.1 \times \text{I. Trophique} + 0.13 \times \text{Sylvi} + 0.3)$**

Accroissement courant après éclaircie = **3 cm/an** en circonférence

Montant de l'intervention (dépressage, éclaircie) : **1500 €/ha**

Taux de prélèvement du volume lors de l'éclaircie : **80%**

Circonférence objective : **120 cm**

Densité après éclaircie : **200 tiges/ha**

Nombre de passages : **1**

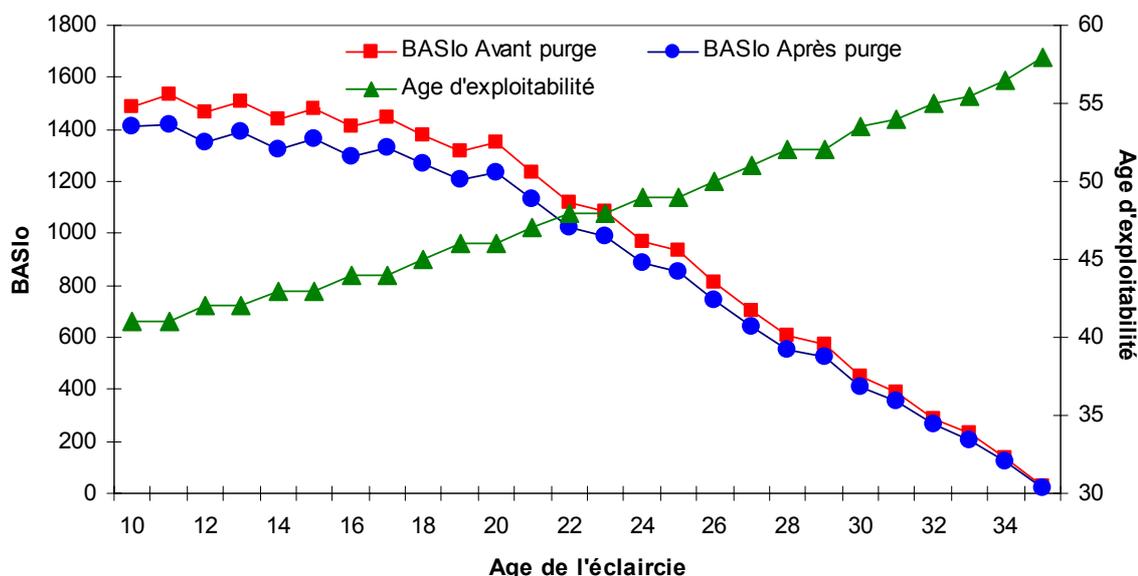


Figure n°77 : Evolution du BASlo en fonction de l'âge de l'éclaircie et de l'âge d'exploitabilité pour une densité de 200 tiges/ha et une circonférence objective de 120 cm.

Bien souvent, la question des éclaircies tardives se posent. Est-il encore opportun d'éclaircir un peuplement âgé de 25 ans ?

En raison des conditions fixées ci-dessus, l'éclaircie n'a pas d'intérêts si elle est réalisée au-delà de 20 ans (cf. Figure n°77).

Au-delà de 20 ans, les éclaircies sont financièrement obsolètes dans les conditions fixées.

7.4- Bilan

Nous réitérons la nécessité de **prendre du recul** face aux évaluations économiques. Dans le cas présent, il est probable que la valeur de la parcelle non éclaircie soit sur estimée.

Au-delà des difficultés inhérentes à ce type d'analyses, ces dernières nous montrent que la sylviculture du châtaignier est rentable. L'éclaircie permet d'augmenter très significativement le revenu du propriétaire dans la mesure où elle est réalisée précocement et vigoureusement. Le tableau ci-dessous synthétise le bénéfice actuel escompté pour plusieurs modalités (cf. Tableau n°25).

Tableau n°25 : Bilan du bénéfice escompté pour plusieurs modalités sylvicoles

Hypothèses :

Age d'exploitabilité = **45 ans**

Taux d'actualisation = **4%**

Indice trophique : **2.5**

Accroissement courant après éclaircie = **3 cm/an** en circonférence

Montant de l'intervention (dépressage, éclaircie) : **1500 €/ha**

Taux de prélèvement du volume lors de l'éclaircie : **80%**

Nombre de passages : **1**

Age éclairci	Densité après Eclaircie	BASlo en €/ha
10	200	1 556
	400	1 439
	600	973
	800	466
15	200	1 000
	400	527
	600	283
	800	<0
20	200	852
	400	398
	600	<0
	800	<0
25	200	789
	400	<0
	600	<0
	800	<0
TEMOIN		1152

La sylviculture dynamique et précoce permet de diminuer le risque de roulure et d'augmenter très significativement le bénéfice du propriétaire.

Partie G

Existe-t-il des outils permettant d'évaluer le risque de roulore dans l'arbre sur pied ?

En complément de l'étude au sujet de "l'impact des éclaircies sur le risque de roulore", nous avons testé trois outils susceptibles de diagnostiquer la présence de la roulore dans l'arbre sur pied :

- le marteau à impulsion
- le résistographe
- l'oreille humaine



Le marteau à impulsion

Cousseau ©

1- Contexte et problématique

Nous avons préalablement discuté de l'utilisation d'un outil de diagnostic de la roulure construit à partir de la description de la station, de la sylviculture et de l'âge. Cet outil statistique, certes valide, connaît ses limites. Il explique environ 60% de la variabilité mais quid des 40 % restant ?

Par ailleurs, la roulure est un phénomène méthodologiquement difficile à étudier. L'abattage de l'arbre est nécessaire et constitue une contrainte majeure. En effet, les difficultés techniques qu'il induit sont nombreuses : disponibilité et coût du bûcheron, accord du propriétaire, évacuation des bois... . Alors, une question s'impose : comment s'affranchir de l'abattage ?

De toute évidence, une question simple découle de ces quelques remarques :

Existe-t-il des outils permettant d'évaluer directement (par mesure) la présence de roulures dans l'arbre sur pied ?

2- Les connaissances acquises

Au regard de l'intérêt suscité par cette problématique, il était envisageable que ce sujet comptabilise bon nombre d'études, de tests, de publications. Il n'en est rien. La littérature est quasi-inexistante. En revanche, c'est un sujet très imprégné d'empirisme.

La bibliographie relative à la roulure peut justifier ce peu d'expérimentations. En effet, elle atteste que la roulure est *a priori* absente de l'arbre sur pied (cf. Partie B 1-2). Par voie de fait, la roulure ne serait donc pas détectable puisque absente de l'arbre sur pied. L'utilisation d'outils de diagnostic serait donc vouée à l'échec.

On peut citer seulement les travaux de Sandoz *et al* (1996), Fonti et Giuduci (1998). Ces derniers ont testé le **sylvatest®** (cf. Figure n°78).

- Le **sylvatest®** est un appareil mesurant la **vitesse de propagation des ultrasons** dans le bois. Les défauts internes du bois entraînent une diminution de la vitesse des ultrasons qui doivent contourner ces tares (cf. Figure n°78).

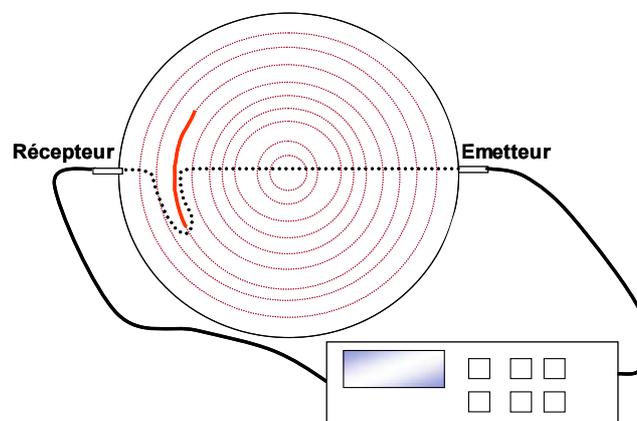


Figure n°78 : Diagnostic de la roulure à partir des ultrasons : le principe du sylvatest®

L'appareil fut testé sur 105 individus issus de deux sites expérimentaux situés dans le Tessin en Suisse. Pour l'un des deux sites, la vitesse de propagation de l'onde est nettement corrélée au nombre de roulures visibles après abattage ($r^2 = 0,82$). Pour le second, cette relation n'est pas vérifiée.

Bien que partiels, les résultats obtenus par cette équipe sont encourageants. **Ils démontrent par cette expérience que la roulure peut être présente dans l'arbre sur pied.**

L'oreille humaine : La plupart des exploitants, des bûcherons, sylviculteurs... affirment la possibilité de détecter la roulure lors du martelage en fonction de la résonance du marteau sur le flachis. Outre la résonance de l'arbre, son aspect est important. Il est fréquent d'entendre « *qu'il existe des peaux (écorces) caractéristiques de la roulure* ». On présume que l'évaluation de la roulure par les professionnels dans un lot de châtaignier sur pied résulte de la synthèse entre la résonance du marteau, l'aspect des arbres, la connaissance de la région,... . La détection de la roulure à partir de l'oreille est ainsi critiquée. **Alors, détection de la roulure à l'aide de l'oreille, mythe ou réalité ?**

3- Existe-t-il d'autres outils ?

Au regard de l'empirisme lié au diagnostic de la roulure par la résonance du marteau et des expériences menées avec le sylvatest®, d'autres outils sont susceptibles d'être utilisés dans le diagnostic de la roulure :

Le marteau à impulsion (cf. Figure n°79) est un instrument né au milieu des années 1980. Il est très couramment utilisé en milieu urbain pour le diagnostic de défauts internes des arbres de parcs et d'alignements. Cet instrument repose sur la vitesse de propagation **d'une onde de choc** dans le bois. Comme pour le sylvatest®, la vitesse est ralentie par la présence de défauts.



Figure n°79 : Le marteau à impulsion

Le résistographe (cf. Figure n°80) est un autre instrument couramment utilisé en "foresterie urbaine". Une mèche s'enfonce à vitesse constante dans le bois et permet ainsi de mesurer la résistance du bois à la pénétration.



Figure n°80 : Le resistographe

4- Stratégie d'échantillonnage

Nous avons choisi d'explorer les perspectives offertes par les outils de diagnostic. Pour cela, nous avons testé trois outils de détection :

- **le marteau à impulsion** a été testé sur 230 individus
- puis, parmi ces 230 individus, 145 ont fait l'objet de mesures à l'aide du **résistographe**
- enfin, 70 individus ont été à la fois testés à l'aide du marteau à impulsion, du résistographe et testés à l'aide de **l'oreille**.

Le tableau ci-dessous fait état du nombre d'arbres testés par outils (cf. Tableau n°26).

Tableau n°26 : Le nombre d'arbres testés par outils de détection

Placettes	Dpt	Nombre d'arbres testés		
		Marteau à ondes sonores	Test à l'oreille	Résistograph©
6001E/6001T/6002E/6002T	60	90	-	25
1401E	14	20	-	-
9501E/9501T	95	40	-	40
7801E	95	40* (33)	35	40
9101E	91	40* (11)	35	40
Total		194	70	145

(*) Parmi les 230 individus testés, 182 données sont disponibles. En effet, des difficultés d'exploitation ont empêché l'abattage de certains arbres.

La méthodologie fut établie par approche successive car la littérature est inexistante au sujet de l'utilisation de ces trois outils dans le diagnostic de la roulure.

5- Tests des outils : le marteau à impulsion

5.1- Principe de la méthode

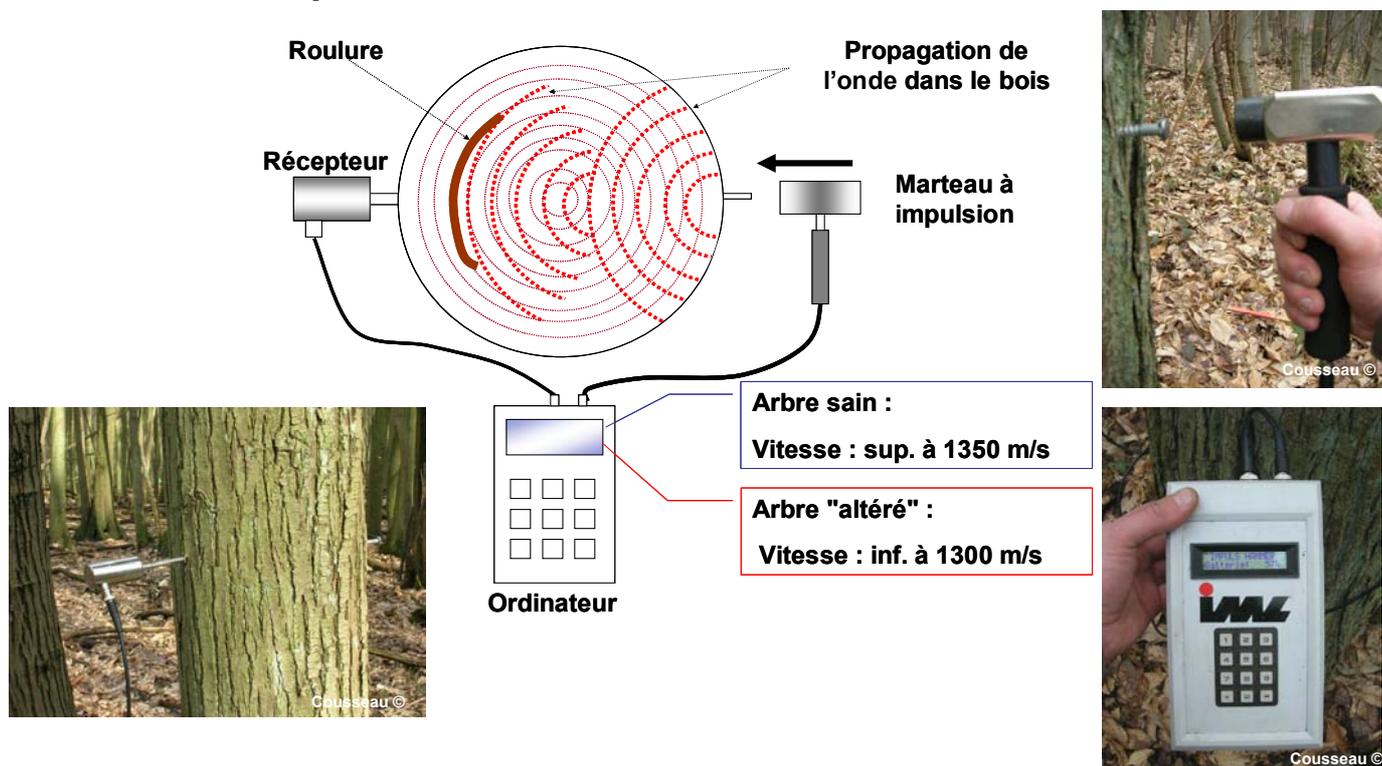


Figure n°81 : Principe du marteau à impulsion pour le diagnostic de la roulore

Le dispositif se compose de trois éléments (cf. Figure n°81) :

- une vis (à tête pleine) transmettant à l'arbre le choc produit par le marteau (émetteur),
- le récepteur, diamétralement opposé à l'émetteur, vissé sur un tire-fond à tête creuse
- ces deux éléments sont câblés à l'ordinateur affichant la vitesse de propagation

L'onde induite par le choc du marteau sur la vis se propage dans l'arbre et est réceptionnée par la cellule diamétralement opposée.

La présence d'une tare à l'intérieur du bois provoque une diminution de la vitesse de propagation de l'onde. En effet, l'onde doit contourner ce défaut. A priori, la vitesse de propagation de l'onde est d'autant plus lente que le défaut est important.

Le principe de fonctionnement du marteau à impulsion est proche de celui du sylvatest®. Seulement, le sylvatest® mesure la vitesse de propagation d'ultrasons suivant un transect. Le marteau à impulsion mesure la vitesse d'une onde de choc se propageant suivant toutes les directions. La réponse du marteau à impulsion est plus globale que celle du sylvatest® quant à elle plus ponctuelle. Le marteau semble a priori plus adapté au diagnostic de la roulore.

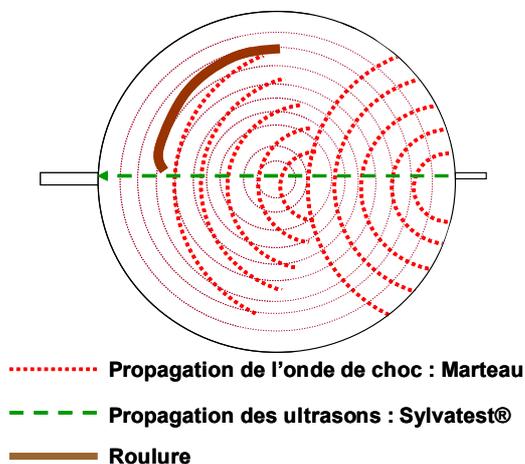


Figure n°82 : Comparaison du marteau à impulsion et du sylvatest®

5.2- Méthodologie

Pour chaque arbre, la vitesse de propagation de l'onde de choc a **systematiquement** été mesurée au moins à **50 cm du sol** suivant deux axes. Le plus souvent, les mesures ont été réitérées à 1,3 m suivant deux directions toujours (cf. Figure n°83).

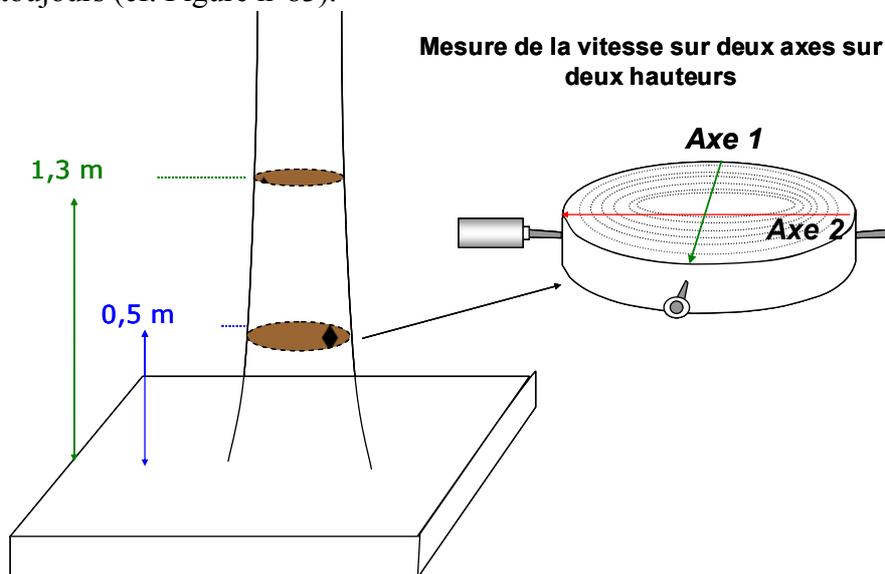


Figure n°83 : Méthodologie pour le diagnostic de la roulure à l'aide du marteau : mesure de la vitesse sur deux axes et sur deux hauteurs (50 et 130 cm)

Pourquoi effectuer le test à 50 cm du sol ? C'est un compromis. D'une part, nous avons cherché à nous affranchir d'éventuels défauts présents au pied de l'arbre tels que les pourritures, les entre-écorces... disparaissant le plus souvent dans les 50 premiers cm. D'autre part, d'après l'étude de la roulure en Limousin (cf. Figure n°51), la roulure est présente au-delà de 50 cm dans 87% des cas (cf. Figure n°84).

Pour chaque axe, **l'impulsion est réitérée trois fois** afin d'éviter les artéfacts de mesures liés à la force du choc produit par l'opérateur. Pour chaque rondelle, on dispose alors de 6 valeurs de vitesse de propagation.



Figure n°84 : Pourriture de cœur se propageant jusqu' 80 cm

Les arbres testés à l'aide du marteau à impulsion sont abattus. L'abattage est suivi de l'observation de la roulure à la hauteur du test puis du prélèvement d'une rondelle à cette même hauteur afin d'y effectuer des observations complémentaires après séchage.

Le marteau à impulsion est accompagné d'un abaque. Ce dernier indique la gamme de vitesse au sein de laquelle un arbre sain peut osciller. Pour le châtaignier, la vitesse de propagation de l'onde de choc dans un arbre sain est comprise entre 1100 et 1500 m/s.

Il faut compter environ 10 min (déplacement compris) pour effectuer les mesures sur une hauteur et deux axes.

5.3- Résultats et discussion

5.3.1 – L'étalonnage de l'appareil

L'étalonnage est une étape primordiale :

A partir de quelle valeur de vitesse de propagation de l'onde considère-t-on un arbre comme roulé ?

Etape 1 :

La vitesse moyenne de propagation d'une onde de choc provoquée par le marteau à impulsion dans un châtaignier sain (observation sur rondelle) est de **1420 m/s**. Cette valeur moyenne oscille entre **1230 et 1615 m/s** (cf. Tableau n°27)

Tableau n°27 : La vitesse moyenne de propagation d'une onde de choc dans un châtaignier sain

n	61
Moyenne en m/s	1422
Minimum	1230
Maximum	1614
Ecart type en m/s	93
C.V. %	7%

L'analyse de la variance nous montre que la variabilité de la vitesse des arbres non roulés s'explique en partie par la circonférence.

Etape 2 :

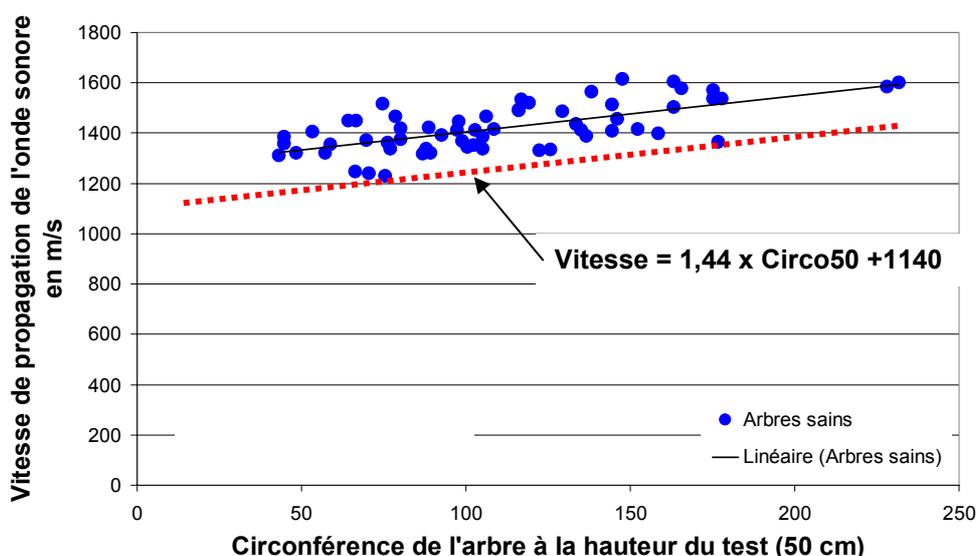


Figure n°85 : Evolution de la vitesse de propagation de l'onde de choc en fonction de la circonférence pour les arbres sains

Il existe une relation nette entre la vitesse de propagation de l'onde et la circonférence à la hauteur du test ($p=0.61^{***}$, $n=63$) (cf. Figure n°85)

Ainsi, une vitesse d'onde supérieure à 1230 m/s (cf. Tableau n°27) ne suffit pas à affirmer que l'arbre est sain. On doit aussi considérer la circonférence à la hauteur du test.

Ainsi, à partir du nuage de points, on peut définir, pour une circonférence donnée, la vitesse de propagation de l'onde en dessous de laquelle le risque de roulore est fort. Cette vitesse minimale est représentée par la droite située à la frange inférieure du nuage de points et définie par *Vitesse minimale théorique* = $1,44 \times \text{Circo} + 1140$.

Ainsi, les arbres sains sont les individus dont la vitesse mesurée est supérieure à la vitesse théorique définie par *vitesse minimale théorique* = $1,44 \times \text{Circo} + 1140$.

Il est vraisemblable que l'impact de la circonférence sur la vitesse de propagation résulte d'un artéfact méthodologique. Nous discuterons des limites du dispositif dans les prochains paragraphes.

5.3.2 – Relation entre la vitesse de l'onde de choc et la roulore

Le graphique ci-dessous fait figurer la relation entre la vitesse de propagation de l'onde pour les arbres sains, les arbres roulés et altérés après abattage (cf. Figure n°86).

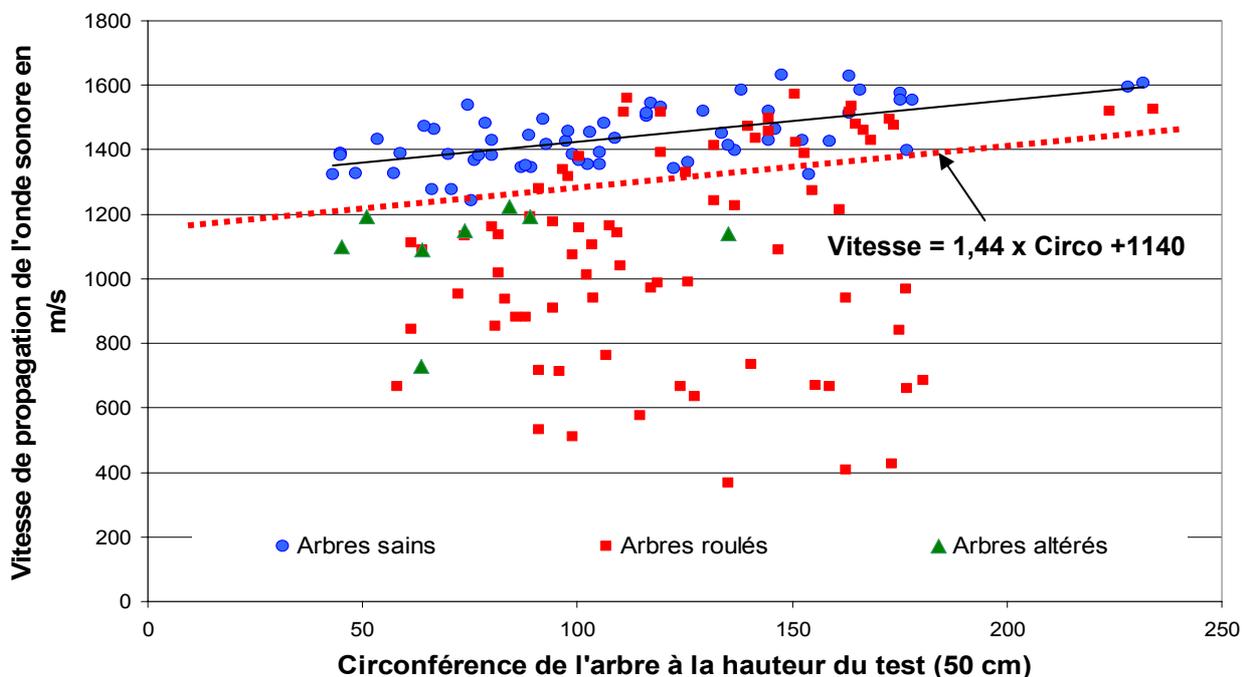


Figure n°86 : Evolution de la vitesse de propagation de l'onde de choc en fonction de la circonférence pour les arbres sains et les arbres roulés

Une partie importante des arbres roulés après l'abattage était diagnostiquée comme tel à l'aide du marteau. Les arbres altérés ont été diagnostiqués sans difficultés à l'aide du marteau à impulsion.

En revanche, on observe que certains arbres dont la vitesse mesurée est supérieure à la valeur minimale théorique sont roulés après l'abattage.

A partir de ces observations, on peut définir la fiabilité de l'appareil :

5.3.3- La fiabilité de l'appareil

5.3.3.1- Proportion d'arbres correctement diagnostiqués

Tableau n°28 : Fiabilité globale du marteau à impulsion pour le diagnostic de la roulore sur pied (n=149)

Diagnostic de la roulore d'après la vitesse de propagation de l'onde	Diagnostic de la roulore d'après l'observation sur les rondelles	Taux de fiabilité	
98 arbres ont été diagnostiqués comme sains (Vobservée > Vthéorique)	parmi ces 98, 66 étaient réellement sains après abattage	67%	81%
	mais 32 étaient roulés après abattage		
84 arbres ont été diagnostiqués comme présentant un défaut interne (Vobservée < Vthéorique)	parmi ces 84, 72 étaient roulés	98%	
	parmi ces 84, 10 étaient altérés (pourritures, cavités)		
	mais 2 ne présentaient aucun défaut		

Dans 98% des cas, l'altération diagnostiquée à l'aide du marteau s'est vérifiée à l'abattage. Cela signifie qu'en dehors de quelques artéfacts méthodologiques, **un arbre altéré ou roulé sur pied est systématiquement diagnostiqué**. A 50 cm du sol, 86% des défauts diagnostiqués s'avèrent être des roulores.

En revanche, 33% des arbres diagnostiqués comme sains à l'aide du marteau se sont révélés roulés à l'abattage. Nous avons précédemment montré que le marteau diagnostiquait avec une fiabilité proche de 100% la présence d'altérations dans l'arbre.

Ainsi, on peut faire l'hypothèse que ces arbres n'étaient pas roulés sur pied mais que la roulore s'est exprimée à l'abattage ou durant le séchage de la grume ou de la rondelle.

Sur l'ensemble de l'échantillon (n=182), 81% des arbres ont été correctement diagnostiqués. Le marteau est fiable à 80% dans le diagnostic de la roulore sur pied.

Au-delà de la fiabilité et de l'intérêt de l'appareil, cette expérimentation montre que 69% des arbres roulés le seraient sur pied. Les 31% restant s'expriment quant à eux à l'abattage.

Cette affirmation doit être prise avec prudence car on ne sait pas si le marteau mesure la roulore où les facteurs qui la prédisposent.

5.3.3.2- La reproductibilité de l'expérience

La figure précédente (cf. Tableau n°28) nous montre que la fiabilité du marteau dépasse 80%. Seulement, cette valeur est obtenue pour l'ensemble des arbres, issus de huit placettes distinctes. Il est important de vérifier si l'on retrouve ce seuil de fiabilité au niveau de la placette. **En d'autre terme, l'expérience est-elle reproductible ?**

Tableau n°29 : Evaluation de la fiabilité du marteau par placette

Code Placette	Arbres diagnostiqués comme sains au marteau			Arbres diagnostiqués comme altérés au marteau				Fiabilité globale
	Arbres sains après abattage	Arbres roulés après abattage	% de fiabilité	Arbres sains après abattage	Arbres altérés après abattage	Arbres roulés après abattage	% de fiabilité	
1401E	2	3	40%	0	0	13	100%	83%
6001E	5	7	42%	0	0	8	100%	65%
6001T	14	2	88%	0	2	2	100%	90%
6002E	10	4	71%	0	2	5	100%	81%
6002T	17	3	85%	0	1	1	100%	86%
9101E	5	3	63%	1	1	1	67%	64%
9501E	5	1	83%	0	0	12	100%	94%
9501T	3	3	50%	1	2	10	92%	79%
7801E	5	6	45%	0	2	20	92%	82%
Total	66	32	67%	2	10	72	98%	81%

L'expérience est bien reproductible. Pour 7 placettes parmi les 9 placettes étudiées, plus de 79% des arbres sont correctement diagnostiqués. Le taux de fiabilité est compris entre 60 et 65% pour les deux autres placettes (cf. Tableau n°29).

Le faible nombre d'arbres pour la placette 9101 (n=11) peut être à l'origine du manque de fiabilité. En revanche, aucun argument ne permet de justifier le manque de fiabilité pour la placette 6001E hormis que ce fut "la placette de démarrage".

5.3.3.3- Altérations et roulures

Le marteau nous informe de la **proportion d'arbres altérés et roulés**. Or, nous nous intéressons seulement aux arbres roulés. Nous savons d'après les données précédentes qu'environ 86% des défauts internes à 50 cm sont des roulures. Par ailleurs, une proportion non négligeable d'arbres roulés s'ajoute après l'abattage. Ainsi,

Proportion de rou lure après abattage = Proportion d'arbres roulés et altérés sur pied – Proportions d'arbres altérés + Proportion d'arbres roulés après abattage.

D'après notre échantillonnage, sur 100 individus observés :

- 37% sont roulés avant abattage
- 17% roulent après abattage
- 42% sont sains
- 5% sont altérés mais non roulés

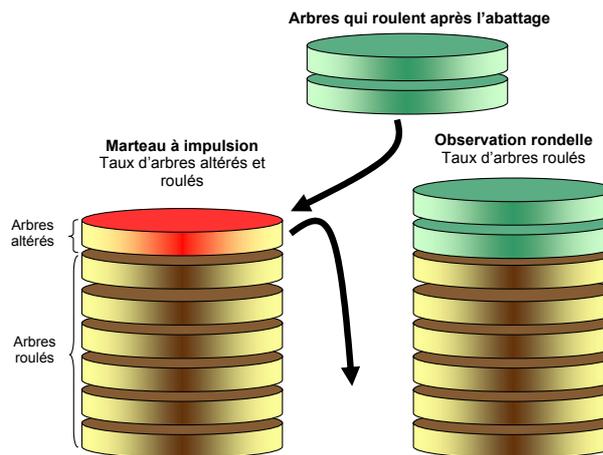


Figure n°87 : Ajustement du diagnostic au marteau

Par conséquent :

Proportion d'arbres roulés après abattage = Proportion d'arbres roulés et altérés d'après le marteau – 5% d'arbres altérés + 17% d'arbres qui roulent après abattage

Soit,

Proportion d'arbres roulés après abattage = Proportion d'arbres roulés et altérés d'après le marteau + 12 %

Nous pouvons vérifier si cette estimation se valide par placette (cf. Tableau n°30).

Tableau n°30 : Ajustement entre le taux de rou lure observé et estimé

Code Placette	Nombre d'arbres	Observation de la rou lure après abattage			Diagnostic à l'aide du marteau				Taux d'arbres roulés d'après le marteau (4) - Taux d'arbres roulés observé (1)
		dont arbres sains	dont arbres altérés	Arbres roulés	Taux d'arbres roulés (1) observé	Taux d'arbres altérés et roulés (2)	Taux d'arbres altérés (3) d'après le marteau	Avec correction (4) : Taux d'arbres altérés(3) + 0.12	
1401E	18	2	0	16	0.89	0.89	0.72	0.84	-0.05
6001E	20	5	0	15	0.75	0.75	0.40	0.52	-0.23
6001T	20	14	2	4	0.20	0.30	0.20	0.32	0.12
6002E	21	10	2	9	0.43	0.52	0.33	0.45	0.02
6002T	22	17	1	4	0.18	0.23	0.09	0.21	0.03
9101E	11	6	1	4	0.36	0.45	0.27	0.39	0.03
9501E	18	5	0	13	0.72	0.72	0.67	0.79	0.06
9501T	19	4	2	13	0.68	0.79	0.68	0.80	0.12
7801E	33	5	2	26	0.79	0.85	0.67	0.79	0.00

La relation est effectivement confirmée. Dans 88% des cas, il y a moins de 12% de différence entre la proportion d'arbres roulés effectivement observé et la proportion d'arbres diagnostiqués comme roulés à l'aide du marteau.

Dans 88% de cas, Proportion d'arbres roulés après abattage = Proportion d'arbres roulés et altérés d'après le marteau – 5% d'arbres altérés + 17% d'arbres qui roulent après abattage. Risque d'erreur <= 12%

5.3.4- La vitesse de propagation de l'onde et le nombre de roulures

Il n'y a pas de relation entre le nombre de roulures observées par arbre et la vitesse de propagation de l'onde de choc. De la même façon, nous n'avons pu établir un lien entre la vitesse de l'onde et deux autres indicateurs de la roulure : la longueur cumulée de roulures par arbre ou bien encore la somme des angles de roulure par individu (cf. Figure n°88).

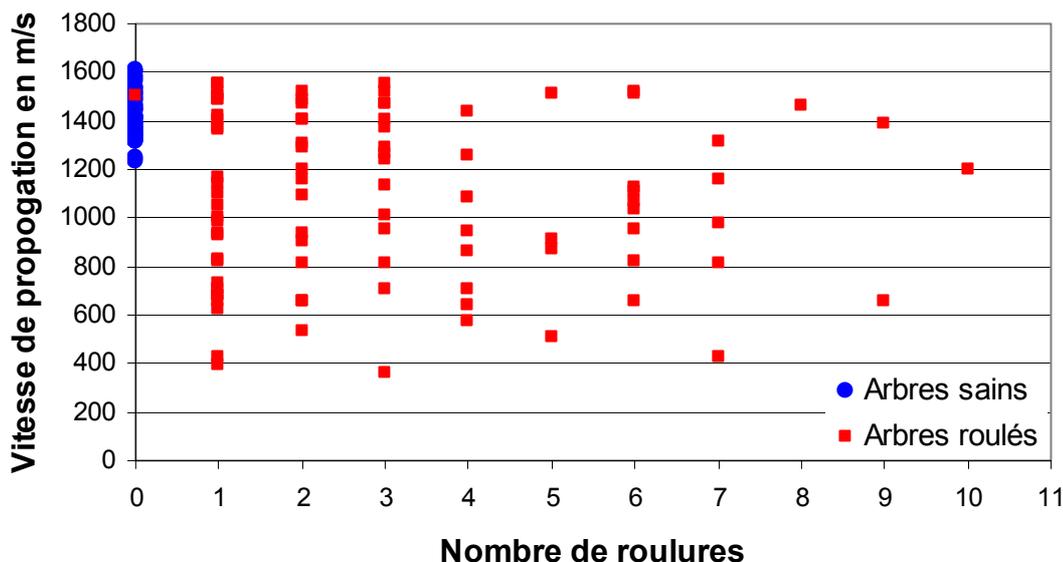


Figure n°88 : Relation entre le nombre de roulures et la vitesse de propagation de l'onde choc

Le marteau ne permet de connaître le nombre de roulures dans l'arbre.

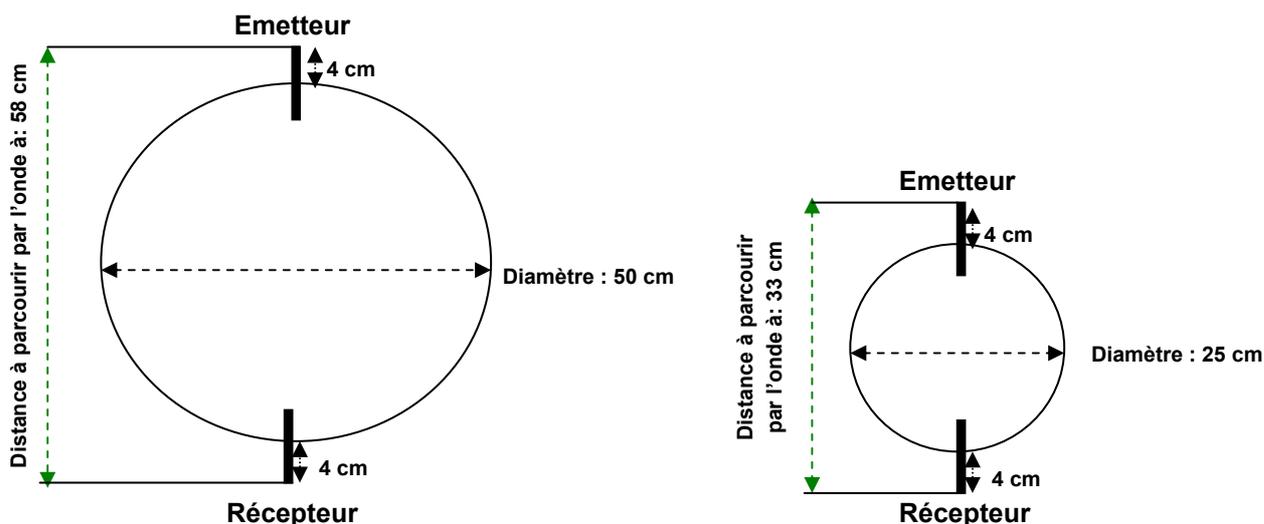
5.3.5- Les limites méthodologiques

5.3.5.1- L'influence de la circonférence sur la vitesse de propagation de l'onde de choc

Pour les arbres sains, la vitesse de propagation de l'onde de choc est inversement corrélée à la circonférence (ou au diamètre) de l'arbre.

Plusieurs raisons sont possibles :

- Les propriétés mécaniques de l'arbre pourraient modifier la vitesse de propagation. Seulement, à diamètre égal, on note que la vitesse de propagation est identique entre les arbres âgés à accroissement fin et les jeunes arbres à accroissement rapide.
- La raison méthodologique est plus probable. Si on considère deux arbres, de diamètre différent, mais aux propriétés mécaniques identiques permettant le déplacement de l'onde choc à 1500 m/s (cf. Figure n°89) :



Cas n° 1 : Diamètre : 50 cm

Temps nécessaire pour parcourir 58 cm à raison de 1500 m/s : **0,000386 s**
 Distance entrée dans l'ordinateur : **50 cm** (diamètre de l'arbre)
 Vitesse annoncée par l'ordinateur : **1295 m/s**

Cas n° 2 : Diamètre : 25 cm

Temps nécessaire pour parcourir 33 cm à raison de 1500 m/s : **0,00022 s**
 Distance entrée dans l'ordinateur : **25 cm** (diamètre de l'arbre)
 Vitesse annoncée par l'ordinateur : **1136 m/s**

Figure n°89: Influence du diamètre de l'arbre sur la vitesse de propagation de l'onde

La distance parcourue par l'onde correspond à la somme du diamètre de l'arbre et de la longueur des deux vis. La longueur relative occupée par ces deux vis est d'autant plus forte que le diamètre est faible. Or, à chaque mesure, on renseigne le diamètre de l'arbre et non pas la longueur cumulée diamètre + vis. Ainsi, pour les arbres de faibles diamètres, on sous estime très nettement la distance à parcourir. On abaisse par voie de conséquence la vitesse de propagation de l'onde.

Comme le montre l'exemple, dans un même matériau permettant à l'onde de parcourir 1500 m/s, la vitesse de propagation de l'onde de choc est plus faible dans l'arbre de petit diamètre.

Les expériences menées par les suisses à l'aide du sylvatest® montrent que la vitesse de propagation d'une onde sonore chez les arbres sains s'établit vers 1800 m/s. Si on utilise cette hypothèse, la vitesse de propagation de l'onde produite par un marteau serait respectivement de 1550 m/s et 1360 m/s pour l'arbre de 50 et de 25 cm de diamètre. Ces résultats seraient compatibles avec nos observations.

Le marteau sous estime la vitesse de propagation de l'onde et cela d'autant plus que le diamètre de l'arbre est petit.

5.3.5.2- La sensibilité de l'appareil

A partir de quelle ouverture de la roulure le marteau est-il sensible ?

Nous avons testé sur bois abattus la vitesse de propagation de l'onde en connaissant exactement la position et l'ouverture de la roulure.

Les résultats sont probants. Le marteau est sensible à des roulures très fines, à peine détectables à l'œil nu. La figure ci-dessus l'illustre (cf. Figure n°90).



Figure n°90 : Le seuil de détection de la roulure à l'aide du marteau à ondes sonores

Dans cet exemple, la roulure est difficilement détectable à l'œil nu. C'est le test au marteau qui nous a permis de la diagnostiquer. La vitesse de propagation de l'onde est de 1294 m/s alors qu'elle devrait en raison de la circonférence de l'arbre être supérieure à 1400 m/s. L'ouverture de la roulure est inférieure au 10^{ème} de mm. Plusieurs exemples vont en ce sens.

Le marteau peut détecter des roulures dont l'ouverture est inférieure au 10^{ème} de mm.

5.4- Les autres usages expérimentaux du marteau

A titre expérimental, l'usage du marteau à impulsion permet d'évaluer la hauteur de propagation de la roulure dans l'arbre.



Figure n°91 : Autres usages expérimentaux : purge de la grume à l'aide du marteau

5.5- Conclusion et prolongement

Le marteau s'avère être un outil pertinent pour évaluer le risque de roulure dans l'arbre sur pied. Dans 88% des cas, le marteau peut approcher la proportion d'arbres roulés au sein de peuplement avec une marge d'erreur inférieure ou égale à 12%. Il est très sensible à la présence d'une fracture dans le bois. La figure n°90 l'illustre et montre qu'il est capable de détecter des fissures inférieures à 1/10^{ème} de mm.

On en vient à s'interroger sur l'affirmation d'après laquelle **la roulure est presque toujours absente de l'arbre sur pied**. D'après le marteau à impulsion, 70% des arbres roulés sont détectés avant l'abattage. On pourrait alors au regard de ces résultats affirmer l'opposé du postulat précédent : **la roulure est le plus souvent déjà présente dans l'arbre sur pied**.

Seulement, une question demeure :

Le marteau mesure-t-il la roulure ou la prédisposition à la roulure ?

Un arbre peut être prédisposé à la roulure sans que celle-ci ne s'exprime. Cette étude nous le montre à plusieurs reprises : certains arbres accumulent les facteurs prédisposant (âgés, installés sur une station médiocre et éclaircis tardivement) mais ne roulent pas. Si l'on fait l'hypothèse que les arbres ne sont pas roulés sur pied, 98% des arbres prédisposés à la roulure sur pied roulent après l'abattage d'après notre étude. Il est peu vraisemblable qu'un événement déterminé se réalise à près de 100%.

L'erreur réside peut être dans le fait d'extrapoler "l'image" de la roulure des arbres abattus aux arbres sur pied. En effet, on peut faire l'hypothèse que bon nombre de roulures sont présentes dans l'arbre sous forme de micro-fractures. Ces fissures sont très fines puisque la cohésion globale de l'arbre maintient les tissus contigus. Celles-ci sont détectables par le marteau comme le montre la figure n°90. Elles s'ouvriront à la faveur de l'abattage.

Cet instrument permet de lever de nombreuses contraintes techniques inhérentes à l'étude de la roulure. Il permet en effet d'effectuer une évaluation de la proportion d'arbres roulés au sein du peuplement en s'affranchissant de l'abattage. Il nous donne la possibilité de systématiser les mesures et d'augmenter significativement l'échantillonnage. Le marteau à impulsion offre de nombreuses perspectives pour l'étude de la roulure.

Le marteau permet aussi de déduire la proportion de volume roulé et la proportion de perte économique grâce aux relations définies ci-dessus. Cela suggère l'usage du marteau en estimation forestière (cf. Figure n°66 e n°67).

Cependant, une utilisation à vocation commerciale (estimation de la roulure dans lot de bois en vente) n'est pas envisageable à ce jour. L'encombrement de l'appareil, le temps de mise en œuvre, sa fragilité..., limitent son usage. Cependant, un travail de développement et d'optimisation de l'appareil permettrait de soulever ces limites.

6- Le diagnostic à l'oreille

6.1- Avant propos

Nous avons mené l'expérience avec deux techniciens d'une coopérative (COFOROUEST).

Sur deux placettes (9101E/7801E), chaque technicien a martelé 35 à 40 individus. A chaque arbre martelé, ils ont indiqué l'importance de la roulure en distinguant quatre classes :

- Classe 1 : "Pas de roulure" ;
- Classe 2 : "Doute, petit risque de roulure, si présente purge facile, moins de 2 m" ;
- Classe 3 : "Purge 3 à 4 m" ;
- Classe 4 : "Grosses roulures, au-delà de 4 m".

Ce sont les techniciens eux-mêmes qui ont créé les classes :

6.2- Résultats

6.2.1- Relation entre le diagnostic auditif et le test à l'aide du marteau à impulsion

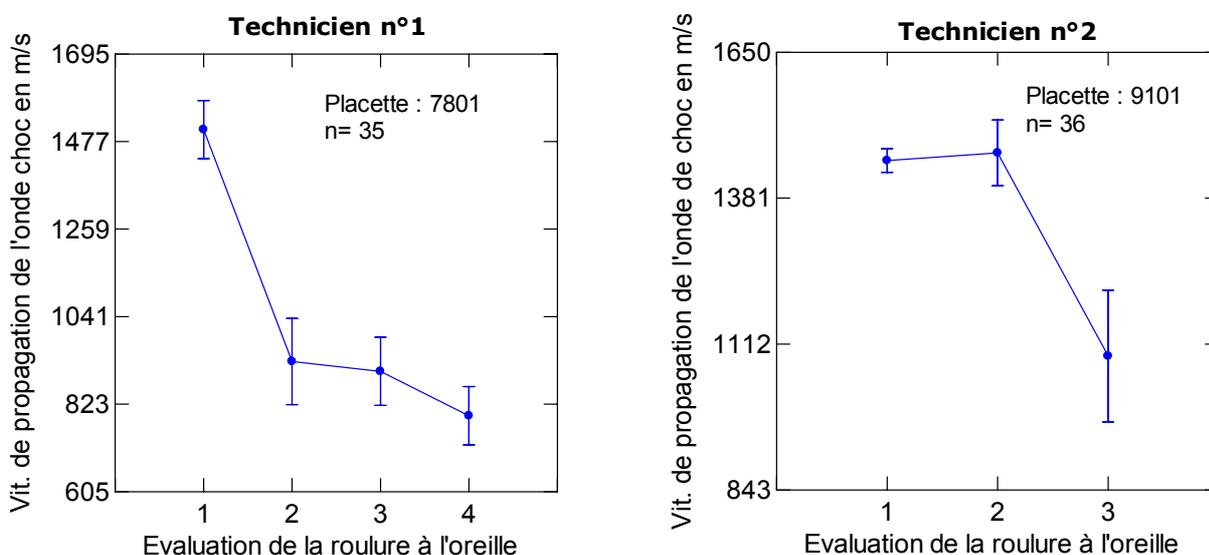


Figure n°92 : Relation entre le diagnostic à l'aide du marteau à impulsion et le test auditif

Nota : 1 : Pas de roulure, 2 : Purge à moins de 2 m, 3 : Purge entre 3 et 4 m, 4 : Grosse purge au-delà de 4 m

Pour la placette 7801E (cf. Figure n°92)

Les arbres diagnostiqués à l'oreille comme non roulés ont une vitesse moyenne de propagation de l'onde de choc supérieure à 1450 m/s. En revanche, les arbres diagnostiqués comme roulés ont une vitesse moyenne inférieure à 1000 m/s. On observe une diminution de la vitesse moyenne de propagation en fonction de l'évaluation auditive.

Le tableau ci-dessus permet d'affiner l'observation graphique.

Tableau n°31 : Relation entre la vitesse de propagation de l'onde sonore et le test auditif

		Diagnostic au marteau		
		Arbres NON roulés d'après le marteau	Arbres roulés d'après le marteau	Total
Diagnostic à l'oreille	Pas de roulure	31% (n=11)	0	31% (n=11)
	"Petite roulure"	0	14% (n=5)	14% (n=5)
	"Roulure, purge 3-4 m"	0	22% (n=8)	22% (n=8)
	"Grosse roulure"	2% (n=1)	28% (n=10)	30% (n=11)
	Total	34% (n=12)	65% (n=23)	100% (n=35)

Le tableau ci-dessus (cf. Tableau n°31) montre qu'il y a une adéquation quasi parfaite entre l'évaluation de la roulure à l'aide de l'oreille et le diagnostic au marteau à impulsion. Le diagnostic auditif des arbres sains est vérifié à l'aide du marteau à impulsion.

Le marteau à impulsion ne permet d'évaluer la hauteur de propagation de la purge. On ne peut donc pas mesurer l'adéquation entre l'estimation auditive et la hauteur de purge. L'abattage des bois répondra à cette question (cf. Figure n°93).

Pour la placette 9101E

La vitesse moyenne de propagation de l'onde ne permet pas d'identifier de différences significatives entre les classes 1 et 2 définies par le test auditif. La classe 3 en revanche se caractérise par une vitesse moyenne de propagation nettement plus faible.

6.2.2- Relation entre le diagnostic auditif et la hauteur de purge observée

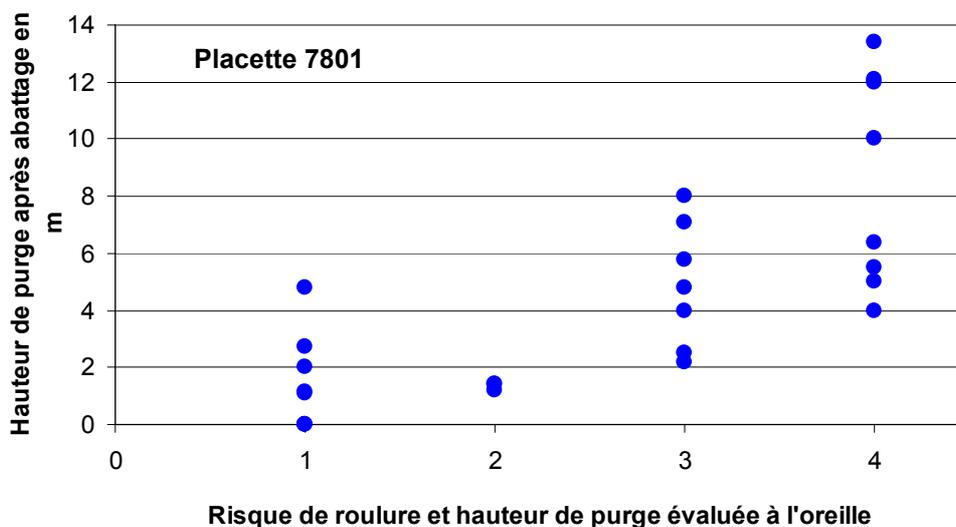


Figure n°93 : Hauteur de purge observée et diagnostic auditif

A l'issue de l'abattage, nous avons pu vérifier l'adéquation **entre la hauteur de purge effective et l'estimation faite lors du martelage.**

D'après le test auditif, les arbres appartenant à la classe 1 sont les arbres *a priori* non roulés sur pied. Or, il s'avère qu'un certain nombre de ces individus diagnostiqués comme sains sont roulés après l'abattage. Comme pour le marteau à impulsion, une partie des arbres roulés ne peut être diagnostiquée à l'aide de l'oreille avant l'abattage.

La hauteur de purge des arbres rangés dans la classe 2 est effectivement inférieure à 2 m.

Pour les arbres de la classe 3 (purge comprise entre 3 et 4 m), la hauteur de purge dépasse le plus souvent 3 m. En revanche dans bon nombre de cas, la roulure se propage au-delà de la limite supérieure de la classe (4 m).

La hauteur de purge réelle des arbres diagnostiqués comme roulés sur au moins 4 m est cohérente avec l'estimation.

Dans le cadre de cette expérimentation, on observe **une corrélation signification entre la hauteur de purge réelle et celle estimée à l'aide de l'oreille.**

6.3- Conclusion et discussion

Il est possible d'évaluer la proportion d'arbres roulés et la hauteur de purge à l'aide de la résonance du marteau sur le flachis comme nous le montrent les figures n°92 et n°93 (Parcelle 7801E). Cela est d'autant plus vrai que les arbres sont âgés et très roulés. Les arbres roulés se caractérisent par un "son sourd et mate" alors que les arbres sains par un "son sec". **Sur des bois plus jeunes**, où la roulure est peu présente le **diagnostic est moins évident** comme l'indique la figure n°92 (Parcelle 9101E).

Ces arguments et l'observation attentive des culées vont dans le sens des conclusions précédentes affirmant la présence de roulures dans l'arbre sur pied.

La participation à cet exercice montre aussi l'importance de l'aspect de l'écorce et de l'arbre dans le diagnostic de la roulure dans l'arbre sur pied.

7- Le résistographe

7.1- Principe de l'appareil

Le résistographe M300 est un outil qui permet de mesurer la résistance du bois au perçage (cf. Figure n°94). Une mèche de 3 mm s'enfonce à vitesse constante dans le bois. Cette aiguille, fixée sur un chariot mobile, est reliée à un stylet traçant à échelle réelle le profil de résistance sur une feuille. On peut ainsi lire en direct l'évolution de la résistance du bois.

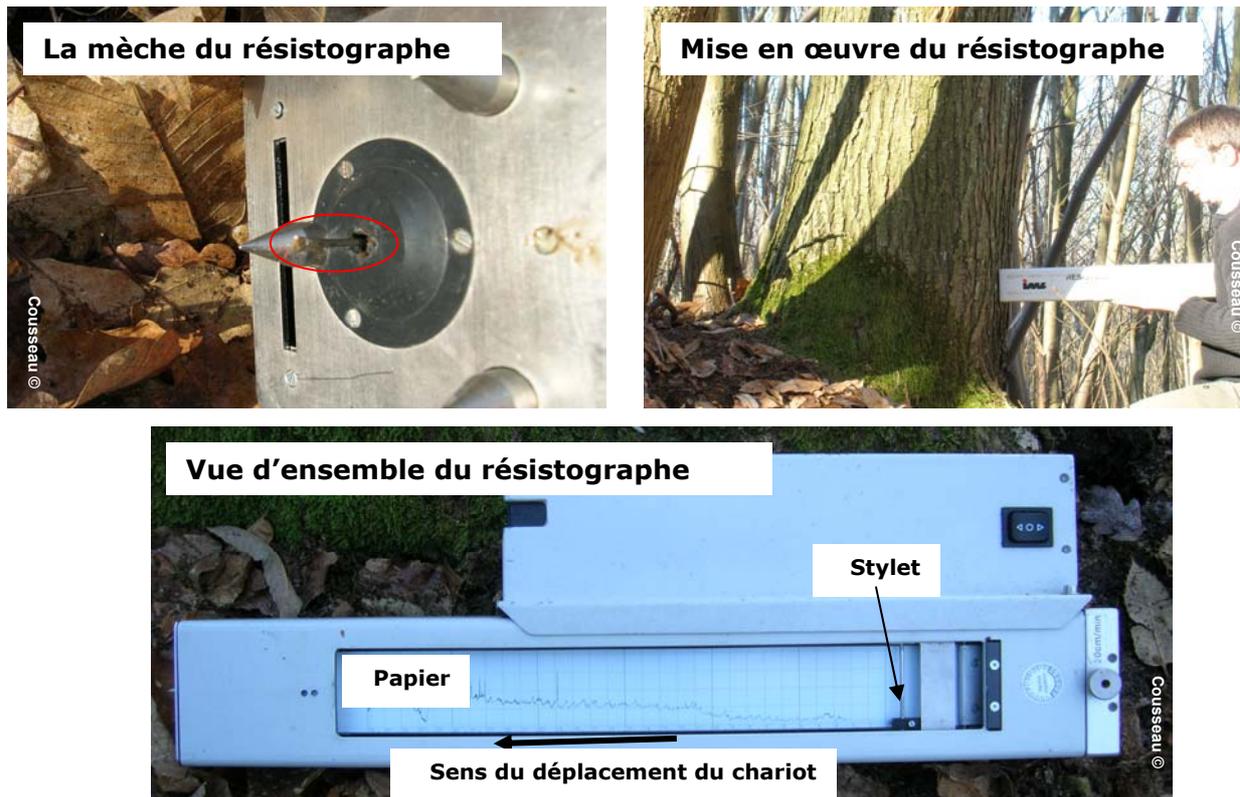


Figure n°94 : L'aiguille du résistographe et la vue d'ensemble de l'appareil

Cet instrument est très couramment utilisé en "foresterie urbaine". La résistance au perçage varie suivant les propriétés mécaniques du bois. Il permet ainsi de diagnostiquer et de localiser les altérations présentes dans le bois. Ces dernières sont identifiées par une discontinuité de la résistance mécanique.

D'après la littérature, le « Résistographe M permet de mesurer une quantité fortement corrélée au travail fourni lors de la flexion radiale conduisant à la fracture » (Mattheck et al, 2000).

Plusieurs vitesses de pénétration de l'aiguille sont proposées : 10 cm/min, 20 cm/min, Le choix de la vitesse de pénétration de l'aiguille est un élément important puisqu'elle conditionne en grande partie la lisibilité de la courbe et le diagnostic des altérations.

L'appareil fonctionne à l'aide d'un accumulateur dont l'autonomie permet de tester 8 à 10 arbres environ.

7.2- Problématique

Le résistographe permet d'affiner le diagnostic effectué à l'aide du marteau en précisant la nature de l'altération.

A ce jour, aucune expérience n'a été effectuée pour diagnostiquer la présence de la rou lure à l'aide du résistographe.

Ainsi, le résistographe est-il pertinent pour le diagnostic de la rou lure ?

L'intérêt de cet outil dépasse le simple diagnostic de la rou lure. Il permet de mettre en évidence en continu la résistance du bois le long de l'axe radial. Nous avons largement discuté dans le présent rapport de l'influence de la résistance mécanique sur le risque de rou lure.

Cet outil donne un éclairage complémentaire à l'étude. Seule une partie des résultats est présentée ci-dessous.

7.3- Méthodologie

145 arbres ont fait l'objet d'un diagnostic à l'aide du résistographe. Les caractéristiques des peuplements sont rappelées au tableau n°10. Le profil résistographique est réalisé à 50 cm du sol à proximité et dans l'axe du test au marteau à impulsion.

Ainsi, pour ces 145 individus, à 50 cm du sol, nous disposons des profils de croissance sur un axe et de la valeur de propagation de l'onde de choc sur deux axes.

7.4- Lecture des profils résistographiques

La lecture du profil de croissance nous fournit de très nombreuses informations. Il y a plusieurs niveaux de lecture (cf. Figure n°95) :

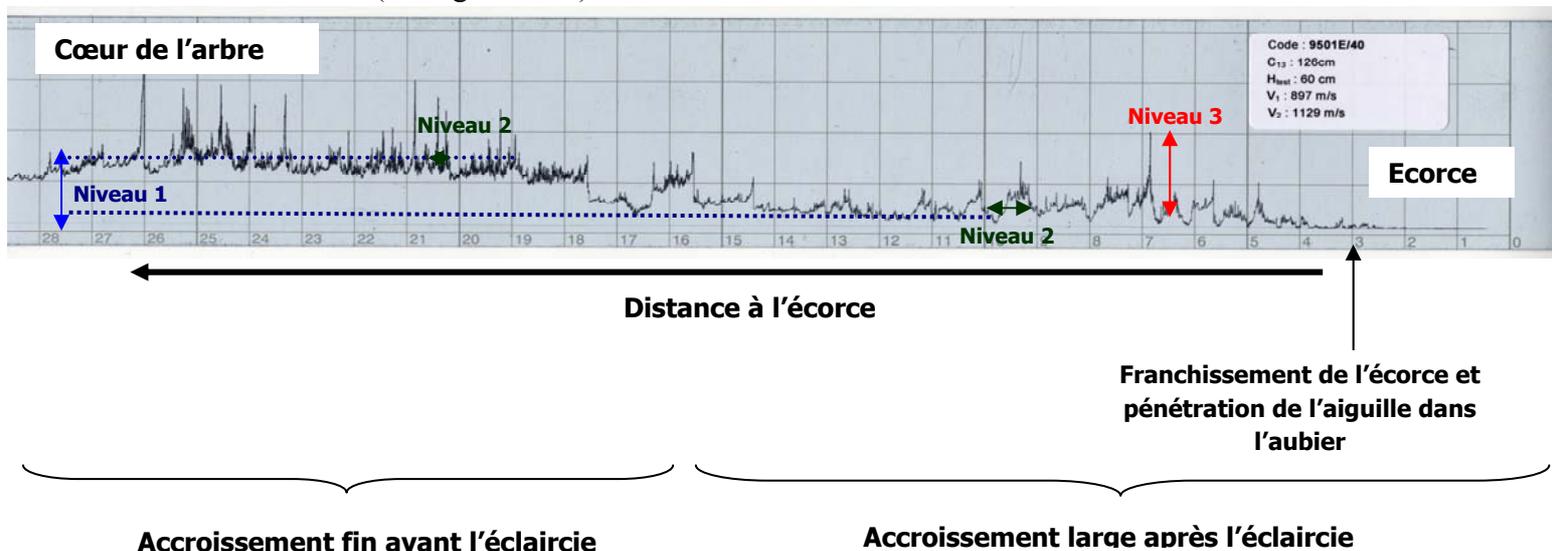


Figure n°95 : Interprétation d'un profil résistographique.

- Niveau n°1 : L'amplitude globale du tracé nous montre l'évolution de la résistance de l'écorce au centre de l'arbre. Dans le cas présent, la résistance augmente de l'écorce vers le centre ;
- Niveau n°2 : A partir de l'amplitude horizontale du signal, on peut évaluer la largeur et ainsi enregistrer d'importantes modifications dans le rythme de croissance ;
- Niveau n°3 : l'amplitude verticale permet de mesurer la variabilité de la résistance au sein d'un cerne. Le pic brutal correspond le plus souvent au bois final. On peut faire dans quelques cas une évaluation de l'âge.

La courbe du résistographe, certes simple, permet d'obtenir de très nombreuses informations sur l'arbre étudié ; vitesse de croissance, hétérogénéité, âge, évolution globale de la résistance mécanique.....

7.5- Etalonnage de l'appareil

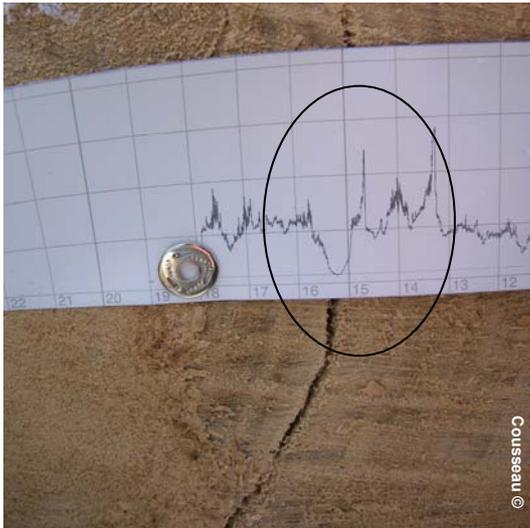
7.5.1- Le choix de la vitesse de propagation

Le choix de la vitesse de pénétration de l'aiguille conditionne la lisibilité et l'interprétation des données. Après plusieurs essais sur bois abattus, **la vitesse d'avancement de l'aiguille retenue est de 20 cm/min**. Chez le châtaigner et suivant nos conditions d'expérimentation, l'amplitude du profil résistographique est diminuée lorsque la vitesse d'enfoncement est de 10 cm/min. La courbe est lissée et une partie importante de l'information est perdue.

A l'inverse, en raison de la dureté du bois de châtaignier, la vitesse de propagation de l'aiguille ne peut excéder 40 cm/min au risque de voir fondre les plombs protégeant l'instrument.

7.5.2- La réponse du résistographe à la roulure

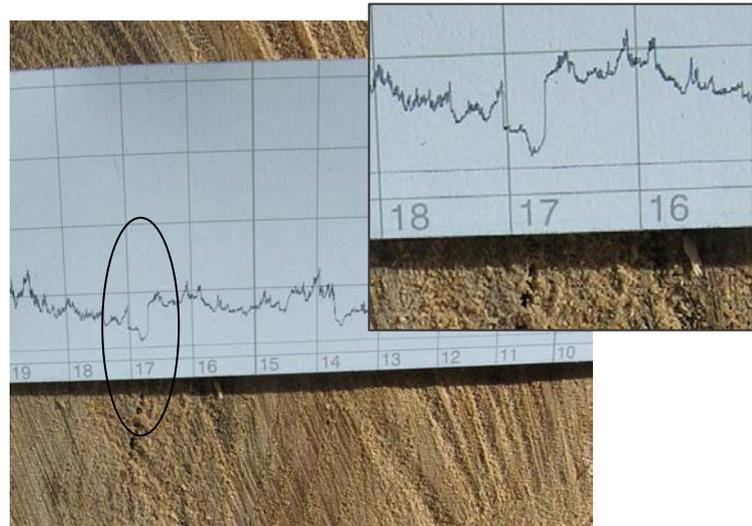
Nous avons testé sur des arbres abattus la réponse du résistographe à la roulure. Nous nous sommes attachés à faire passer l'aiguille dans la roulure afin d'enregistrer le profil résistographique. Plusieurs exemples de profils de résistance sont présentés ci-dessous (cf. Figure n°96) :



Cas n°1 : Roulure largement ouverte

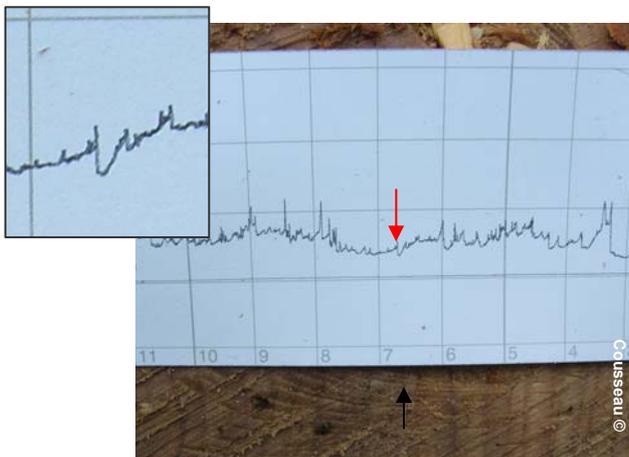
Dans le cas d'une roulure très ouverte, le profil chute brutalement. La lecture est aisée.

On note la présence d'un pic de résistance précédant la roulure.



Cas n°2 : Roulure largement ouverte

De la même façon, on observe un net "décrochement" du profil résistographique. En revanche, on note le long de ce transect plusieurs répétitions de ce "décrochement" sans pour autant observer la présence systématique d'une roulure.



Cas n°3 : Roulure peu ouverte

Pour une roulure peu ouverte, un léger "décrochement" de la courbe est observé. La lecture n'est pas évidente et la confusion avec une variation naturelle de la résistance est possible.

Cas n°4 : Roulure ouverte mais non détectée

Cette fois-ci, la roulure est bien visible mais la réponse du résistographe est nulle. Le "décrochement" observé dans les trois cas précédents n'est pas visible sur le profil.

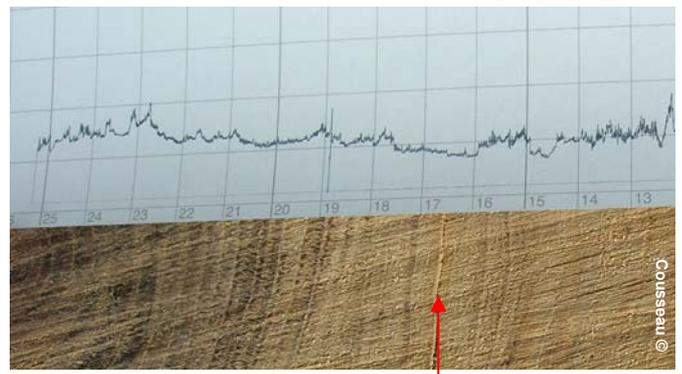


Figure n°96 : La réponse du résistographe à la roulure

Ces quelques exemples illustrent les cas les plus fréquemment rencontrés.

La lecture et l'interprétation du profil résistographique dans le cadre de la détection de la roulure sont souvent difficiles. Les confusions sont possibles.

Quand la roulure est diagnostiquée, elle se caractérise par une chute brutale de la résistance. Il est intéressant de noter que la roulure s'accompagne parfois d'une anomalie de résistance (cas n°1). C'est l'objet de la discussion du paragraphe suivant.

7.6- Résultats : Etude de cas

Dans cette partie, trois profils résistographiques sont présentés. Parmi les trois individus étudiés, deux d'entre eux proviennent du témoin 9501T et le dernier de l'homologue : 9501E.

Cas n° 1 : Arbre n°9501T/90

Circonférence = 100 cm

Vitesse de propagation dans l'axe 1 : 1515 m/s

Vitesse de propagation dans l'axe 2 : 1504 m/s

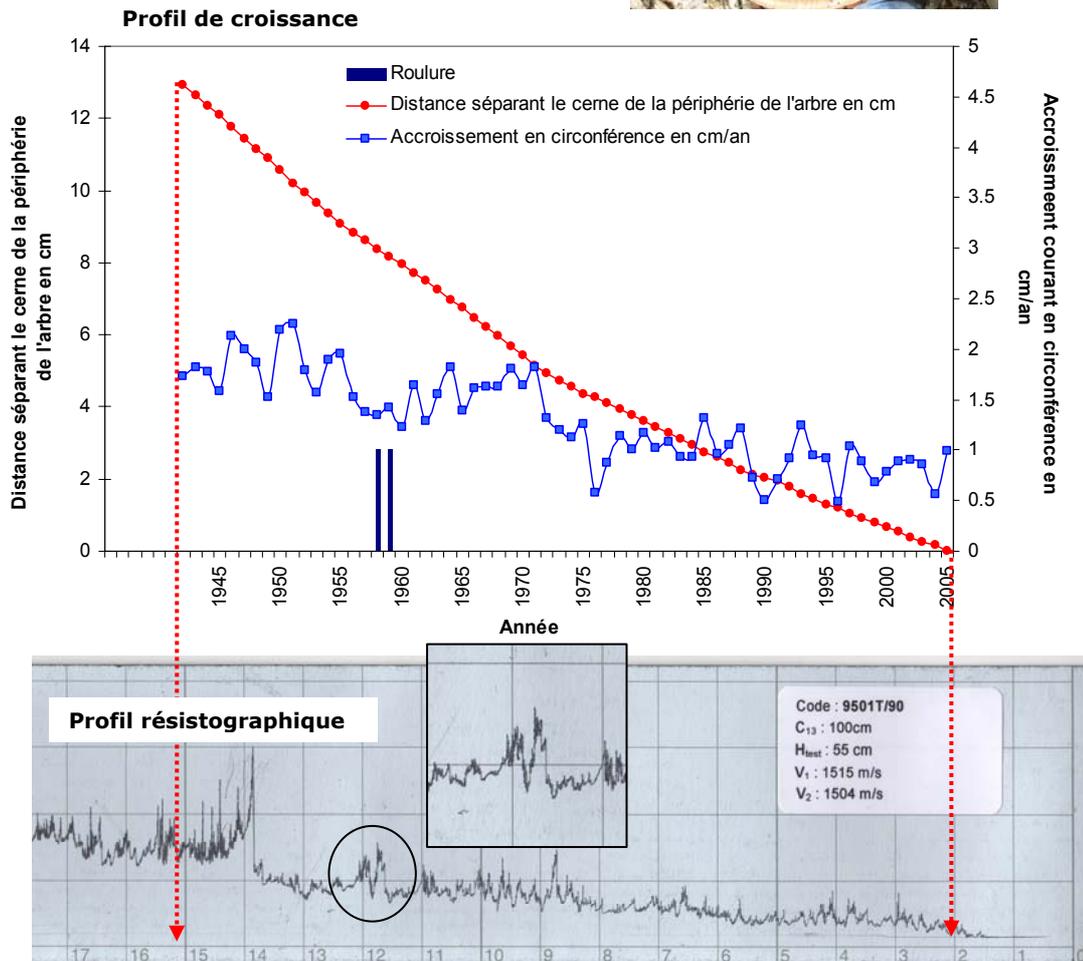


Figure n°97 : Superposition du profil résistographique et de l'évolution de l'accroissement courant en circonférence pour l'arbre n°9501T/90

D'après le marteau à impulsion, l'arbre en question était considéré comme sain (cf. Figure n°97). Il s'est avéré roulé lors de l'abattage. Il est important d'observer la diminution continue de la résistance de l'arbre au cours du temps.

Les roulures se sont exprimées durant les années 1958 et 1959. Il est remarquable d'observer que ces roulures s'accompagnent d'une « anomalie » ponctuelle du profil résistographique. En effet, les roulures sont présentes au niveau du pic maximal de résistance observé sur les 14 premiers centimètres.

Cas n° 2 : Arbre n°9501T/14

Circonférence = 85 cm

Vitesse de propagation dans l'axe 1 : 704 m/s

Vitesse de propagation dans l'axe 2 : 736 m/s

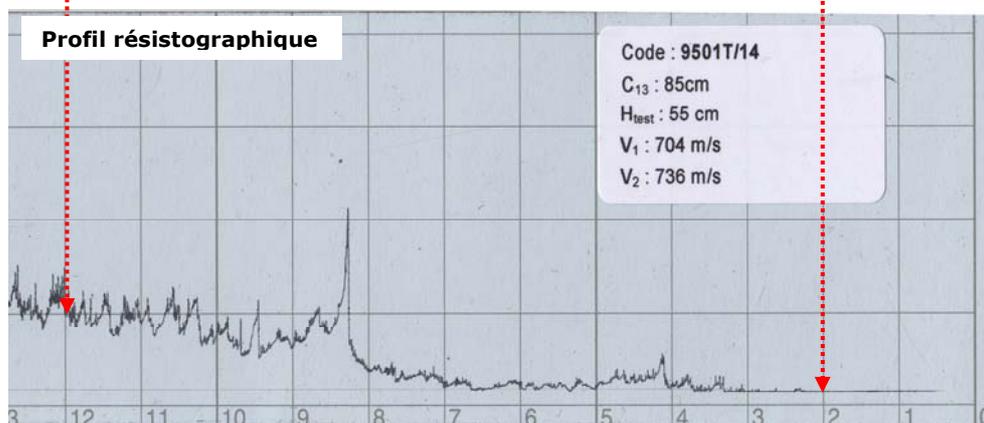
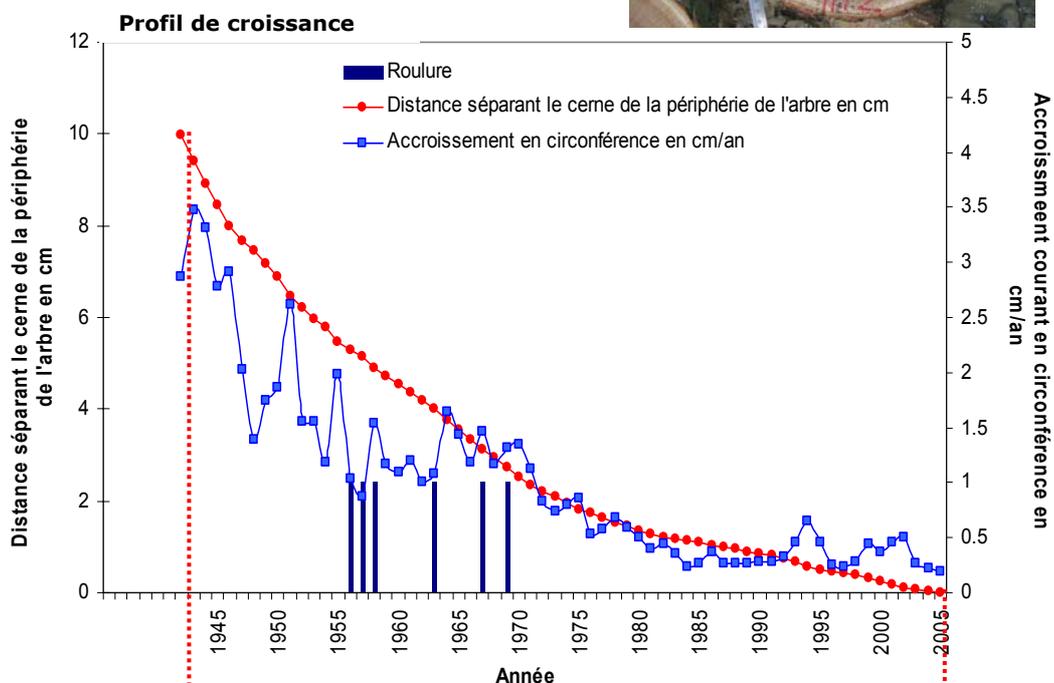


Figure n°98 : Superposition du profil résistographique et de l'évolution de l'accroissement courant en circonférence pour l'arbre n°9501T/14

Cette fois-ci, le marteau à impulsion avait détecté la présence d'altérations dans le bois (vitesse de propagation = 730 m/s).

Les roulures se répartissent durant une période de 15 ans : de 1955 à 1970. Le profil résistographique est quant à lui original. La diminution de la résistance, habituellement continue, est brutale. Cette chute succède à un pic de résistance.

Cas n°3 : Arbre n°9501E/22

Circonférence = 114 cm

Vitesse de propagation dans l'axe 1 : 1525 m/s

Vitesse de propagation dans l'axe 2 : 1424 m/s

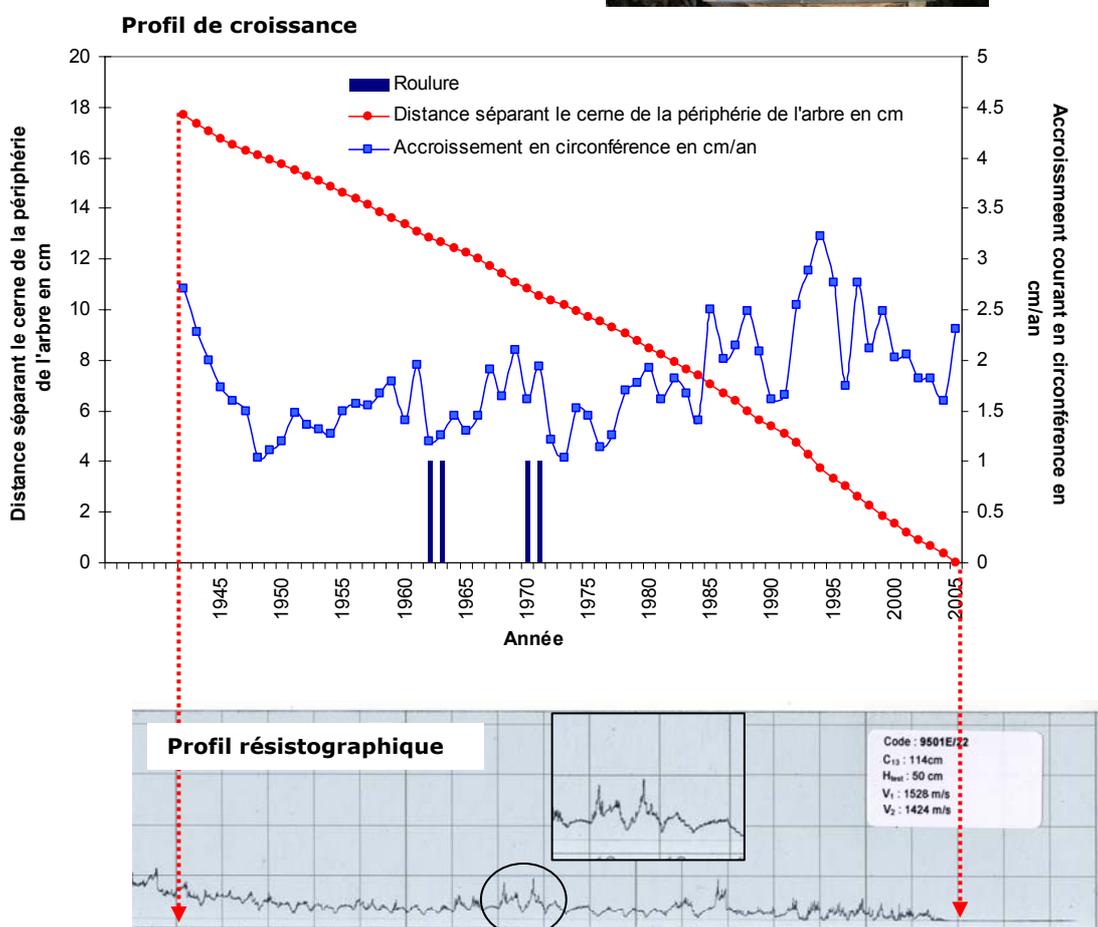


Figure n°99 : Superposition du profil résistographique et de l'évolution de l'accroissement courant en circonférence pour l'arbre n°9501E/22

La courbe résistographique est homogène le long de la vie de l'arbre. Malgré cette relative stabilité, deux pics de croissance sont observés à 13 cm. Bien que l'amplitude soit limitée, ils constituent les points de résistances maximales. A ce niveau, deux des quatre roulures s'expriment.

7.7- Les limites de l'appareil

Les limites d'utilisation du résistographe pour le diagnostic de la roulure sont nombreuses :

- Le signal enregistré par le marteau à impulsion est global. En effet, l'onde se propage dans le bois et est restituée à l'émetteur après avoir parcourue l'ensemble de la section de l'arbre. Les probabilités de révéler l'altération sont fortes. Le résistographe quant à lui fournit seulement une information ponctuelle. Il est possible que la roulure ne soit pas présente sur le transect parcouru par la mèche du résistographe. La figure illustre cette limite (cf. Figure n°100).

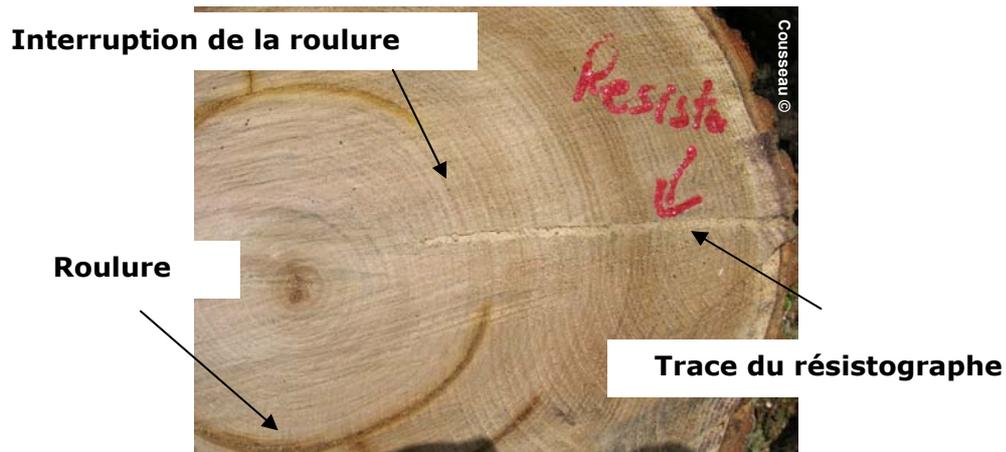


Figure n°100 : Les limites du résistographe : une mesure ponctuelle et aléatoire.

- Les contraintes et les frottements subis par la mèche du résistographe augmentent lors de la progression vers le cœur de l'arbre. Ainsi, les profils résistographiques sont biaisés et devraient être corrigés pour faire une lecture exacte. Cet élément est discuté dans la littérature. Une équipe de chercheur a tenté de corriger cet effet. Il n'en reste pas moins, une fois la correction faite, que la résistance au perçage diminue avec l'âge.
- Dans l'hypothèse où la roulure est présente dans l'arbre sur pied, il est probable que son ouverture ne soit pas suffisante pour être détectée à l'aide du résistographe. La cohésion mécanique globale de l'arbre maintient les parois déchirées rapprochées.

7.8- Conclusions et discussion

L'utilisation du résistographe pour détecter la roulure dans l'arbre sur pied n'est pas satisfaisante. Les limites méthodologiques sont importantes et difficiles à contourner. Il fournit en revanche d'importantes données concernant la résistance mécanique de l'arbre.

Pour la plupart des arbres, au-delà du biais induit par les frottements de la mèche sur le bois, on observe une diminution constante de la résistance mécanique avec l'âge. C'est peut être dans cette observation que réside l'explication de l'augmentation de la roulure avec l'âge. **La résistance de la structure supportant les contraintes de croissance diminue avec l'âge.** Cette fragilisation de la structure permet l'expression et l'augmentation du risque de roulure.

Par ailleurs, les quelques exemples observés ci-dessus nous montrent que la roulure s'accompagne bien souvent d'une anomalie du profil résistographique. Le profil de résistance est par ailleurs nettement lié à la croissance de l'arbre et à son hétérogénéité. Cette observation étaye les conclusions précédentes. L'hétérogénéité de la croissance modifie ponctuellement la résistance du matériau rendant certaines zones plus fragiles que d'autres.

Conclusion

La mise en œuvre technique et méthodologique d'une étude destinée à mieux comprendre les facteurs déterminants la roulure est complexe. Tout d'abord, il faut s'accorder sur la définition même du mot roulure. Ce dernier est un terme générique regroupant des phénomènes aux origines différentes. Une fois le phénomène défini, on peut tenter de comprendre les éléments qui le conditionnent.

La roulure est par nature variable. En effet, cette fente tangentielle est la résultante d'interactions complexes entre l'arbre, son milieu et de caractéristiques intrinsèques de l'arbre. Cela explique en grande partie l'hétérogénéité des résultats et la contradiction des conclusions de différentes études.

Les données bibliographiques nous laissaient envisager un effet bénéfique de l'augmentation de la croissance sur le risque de roulure. En revanche, l'hétérogénéité de la croissance semble être un facteur prédisposant. C'est dans ce contexte méthodologique et bibliographique que nous avons abordé la problématique de l'impact des éclaircies sur le risque de roulures.

L'étude en question apporte des réponses concrètes aux sylviculteurs. Les éclaircies provoquent une augmentation de la proportion d'arbres roulés d'environ 20%. Il est fondamental de rappeler que ces peuplements ont le plus souvent bénéficié d'une éclaircie tardive, voire très tardive. L'à-coup de croissance et l'hétérogénéité de la croissance sont en causes. On peut empêcher l'augmentation du taux de roulure par une intervention précoce (avant 10 ans) et vigoureuse. Cette sylviculture permet par ailleurs d'améliorer le bénéfice escompté par le propriétaire lors de l'exploitation.

Nous avons pu construire des outils d'évaluation de la roulure. Ils permettent d'évaluer *a priori* la proportion d'arbres roulés et d'en déduire la proportion de volume roulé et la perte économique.

Nous avons étayé plusieurs hypothèses susceptibles d'expliquer le mécanisme conduisant à l'augmentation de la proportion d'arbres roulés et à la modification de la distribution de la roulure dans l'arbre. Celles-ci devront être confrontées aux regards critiques des spécialistes de la mécanique de l'arbre sur pied.

Comme pour toutes les études déjà réalisées à ce sujet, l'extrapolation des résultats contenus dans ce rapport doit être prudente. En effet, la variabilité de la roulure et l'échantillonnage, bien que solide, exigent de prendre du recul. Par ailleurs, les résultats sont valides dans la zone dont les données proviennent ; c'est-à-dire le nord ouest de la France. Leurs utilisations en dehors de cette zone doivent être abordées avec un regard critique.

Cette étude remet en cause certaines affirmations reconnues dans la bibliographie. C'est le cas de la question relative à la présence de la roulure dans l'arbre sur pied. Cette question n'est pas fondamentale dans le cadre d'une étude destinée à apporter des réponses technico-économiques aux propriétaires et gestionnaires. En revanche, elle est importante d'un point de vue méthodologique. Elle le devient lorsqu'on tente d'expliquer les mécanismes conduisant à la fente tangentielle.

Cette étude ouvre de nouvelles perspectives.

La plupart des peuplements étudiés dans le cadre de cette étude ont été éclaircis tardivement. Il serait opportun au regard des résultats obtenus de prolonger nos recherches vers les rares peuplements éclaircis précocement. Ce prolongement permettrait de vérifier et d'attester, espérons le, nos conclusions. Cela exige un important travail de prospection. Les questions liées à l'homogénéité de la station, de la présence d'un témoin,...se poseront à nouveau.

Il serait intéressant de s'interroger sur la pertinence de l'installation d'un dispositif expérimental permettant de mesurer dans le temps l'évolution de la proportion et la distribution de la roulure pour plusieurs modalités sylvicoles. Ce type de dispositif est difficile à mettre en œuvre et doit être répété pour assurer la validité mais son intérêt est certain.

Le marteau à impulsion ouvre de nombreuses perspectives. Il permet d'évaluer avec une très bonne fiabilité la proportion d'arbres roulés au sein d'un peuplement. Il permet de s'affranchir de bon nombre de difficultés méthodologiques telles que l'abattage des arbres. On peut ainsi espérer faire diminuer très significativement les moyens, le temps et le coût de mise en œuvre. Cela signifie qu'il offre la possibilité d'augmenter nettement le taux d'échantillonnage avec des moyens équivalents.

A partir du travail réalisé dans le cadre de ce projet, une nouvelle étude démarre dans les prochaines semaines. Elle est pilotée par Guy Costa de la Faculté des Sciences et Techniques de Limoges (Laboratoire de chimie des substances naturelles). Les rondelles prélevées vont être réutilisées. L'axe d'investigation proposé est de rechercher les éventuelles modifications de la composition pariétale à l'aide d'observations microscopiques et d'analyses chimiques. On va ainsi connaître la composition pariétale des arbres roulés, non roulés, éclaircis, non éclaircis... .

Ces approches complémentaires et transversales ainsi que la mise en commun des moyens et de compétences sont en train de nous faire franchir un nouveau pas dans la compréhension du mécanisme de la roulure et dans sa prévention.

Bibliographie

- [1] **ARNOLD M., SELL J.**, 1997, Schweizer kastanienholz für den Fensterbau, Werk und Baustoffe, page 17 à 18.
- [2] **AYMARD M., FREDON J.-J.**, 1986, Etude des relations entre une racine et les rejets de la souche chez *Castanea sativa* Mill., Annales des Sciences Forestières n°43 (3), page 351 à 364.
- [3] **BEDENEAU M.**, 1994, Croissance des taillis de châtaignier en France : utilisation des données de l'Inventaire forestier national, Annales des Sciences Forestières n°51, page 183 à 194.
- [4] **BONEFANT M.**, 1985, Croissance et qualité du châtaignier de futaie en Bretagne. SERFOB Bretagne. Mémoire ENITEF, 123 pages.
- [5] **BOURGEOIS C.**, 1992, Le Châtaignier : un arbre, un bois, Institut pour le développement forestier (IDF).
- [6] **BOURGEOIS C., SEVRIN E., LEMAIRE J.**, 2005, Le Châtaignier : un arbre, un bois, Institut pour le développement forestier, 2^{ème} édition (IDF).
- [7] **CARLIER G.**, 1987, Etude de la sectorisation des souches de châtaignier (*Castanea sativa* Mill) à l'aide d'eau tritiée, Annales des Sciences Forestières n°44 (1), page 85 à 102.
- [8] **CATENA A.**, 2004, Thermographie et dendrodensimètre pour l'évaluation de la stabilité des arbres : comparaison de résultats, Revue Forestière Française LVI n°2, page 164 à 169.
- [9] **CHABRAN P., NOEL M.**, 1983, Valorisation du châtaignier , conditions de production et perspectives d'utilisation en Languedoc-Roussillon, Centre Régional de la Productivité et des Etudes Economiques, 150 pages.
- [10] **CHANSON B.**, 1982, Approche structurale et histophysiologique du bois de châtaignier (*Castanea sativa* Mill). Etude préliminaire à celle de la roulure. DEA en Sciences Forestières, Université de Nancy I, 31 pages.
- [11] **CHANSON B.**, 1988, Etude de la variabilité de quelques propriétés physiques et anatomiques du bois de rejets de taillis de châtaignier (*Castanea sativa* Mill.). Application à l'étude de la roulure, Thèse, Université des Sciences et Techniques de Montpellier, 278 pages.
- [12] **CHANSON B., LEBAN J.M, THIBAUT B.**, 1989, La roulure du châtaignier (*Castanea sativa* Mill), Forêt Méditerranéenne XI n°1, page 15 à 28.
- [13] **CHANSON B., THIBAUT B., BOURGEOIS C.**, 1990, Roulure et roulures : les différents mécanismes conduisant au même défaut, Forêt Entreprise n°69, page 29 à 33.

[14] **CINOTTI B.**, 1990, Le déterminisme de la gélivure des chênes, Revue Forestière Française XLII n°6, page 585 à 598.

[15] **COLIN-BELGRAND M., RANGER J., D'ARGOUGES S.**, 1993, Transferts internes d'éléments nutritifs dans le bois de châtaignier : approche dynamique sur une chronoséquence de peuplements. Distribution des éléments minéraux. Acta oecologica n°14 (5), page 653 à 680.

[16] **Commission du Châtaignier** , 1949, Le châtaignier et sa culture de rapport, Bulletin technique Châtaignier n°5, ENGREF, 78 pages.

[17] **Commission du Châtaignier** , 1951, Semaine Internationale du Châtaignier , Bulletin technique Châtaignier n°3, ENGREF, 174 pages.

[18] **Commission du Châtaignier** , 1958, Congrès Régional du Châtaignier , Bulletin technique Châtaignier n°1, ENGREF, 143 pages.

[19] **COUSSEAU G.**, 2004, Les déterminismes de la roulure dans le Limousin, Mémoire de Maîtrise BPE, Université de Limoges, 56 pages.

[20] **CRPF Nord-Pas de Calais-Picardie**, 2001, Le châtaignier , 17 pages.

[21] **DUMONCEAUD O.**, 2001, Petits bois naturellement durables dans des usages extérieurs en vue de limiter l'emploi des traitements par les pesticides : problèmes posés par l'utilisation du châtaignier (*Castanea sativa* Mill.) et intérêts d'un traitement de type friture à basse température, Thèse, ENGREF Centre de Montpellier, 195 pages

[22] **ELZIERE S.**, 1995, Influence des éclaircies sur des brins de taillis de châtaignier : Analyse de tiges, contraintes de croissance et fissilité du bois, LMGC Université de Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc, Mémoire ENITA Bordeaux, 57 pages.

[23] **FERRAND J.C.**, 1980, La roulure du châtaignier (*Castanea sativa* Mill) : Note préliminaire, INRA-CNRF Station de recherche sur la qualité du bois, 15 pages.

[24] **FIORAVANTI M.**, 1995, Nature and occurrence of juvenile wood in chestnut (*Castanea sativa* Mill) stems from coppice forest, Forêt Méditerranéenne XVI n°1, page 58 à 65.

[25] **FONTI P.**, 2003, Contraintes de croissance longitudinales et roulures dans les arbres de taillis de châtaignier , Forêt méditerranéenne XXIV n°2, page 141 à 147.

[26] **FONTI P., BRÄKER O-U., GIUDICI F.**, 2002, Relationship between ring shake incidence and earlywood vessel characteristics in chestnut wood, IAWA Journal n°23 (3), page 287 à 298.

[27] **FONTI P., FREY B.**, 2002, Is ray volume a possible factor influencing ring shake occurrence in chestnut wood?, Trees n°16, page 519 à 522.

- [28] **FONTI P., GIUDICI F., CONEDERA M.**, 2002, La cipollatura nel legno di castagno : un problema centrale per il rilancio della castanicoltura da legno di qualità, Schweiz. Z. Forstwes n°153, page 430 à 436.
- [29] **FONTI P., MACCHIONI N., THIBAUT B.**, 2002, Ring shake in chestnut (*Castanea sativa* Mill) State of the art, Annales des Sciences Forestières n°59, page 129 à 140.
- [30] **FONTI P., MACCHIONI N.**, 2003, Ring shake in chestnut : Anatomical description, extent and frequency of failures, Annales des Sciences Forestières n°60, page 403 à 408.
- [31] **FONTI P., SELL J.**, 2003, Radial split resistance of chestnut earlywood and its relation to ring width, Wood and Fiber Science n°35(2), page 201 à 208.
- [32] **Forêts de France**, 2004, Châtaignier , l'étoffe d'un feuillu précieux, Forêts de France n°473, page 14 à 15.
- [33] **Forêt-Entreprise**, 2003, Pourquoi et comment cultiver le châtaignier ?, Forêt-Entreprise n°149 (Dossier), page 24 à 39.
- [34] **FOURNIER M., CHANSON B., THIBAUT B., GUITARD D.**, 1991, Mécanique de l'arbre sur pied : modélisation d'une structure en croissance soumise à des changements permanents et évolutifs. 1. Analyse des contraintes de support. Annales des Sciences Forestière n°48, page 513 à 525.
- [35] **FOURNIER M., CHANSON B., THIBAUT B., GUITARD D.**, 1991, Mécanique de l'arbre sur pied : modélisation d'une structure en croissance soumise à des changements permanents et évolutifs. 2. Analyse tridimensionnelle des contraintes de maturation, cas du feuillu standard. Annales des Sciences Forestière n°48, page 527 à 546.
- [36] **FRASCARIA N.**, 1991, Variabilité génétique d'un arbre forestier : le châtaignier (*Castanea sativa* Mill), Thèse, Université de Paris Sud, 122 pages.
- [37] **FRASCARIA N., CHANSON B., THIBAUT B., LEFRANC M.**, 1992, Géotypes et résistance mécanique radiale du bois de châtaignier (*Castanea sativa* Mill). Analyse d'un des facteurs explicatifs de la roulure, Annales des Sciences Forestières n°49, page 49 à 62.
- [38] **FRASCARIA N., LEFRANC M.**, 1992, Le commerce de la châtaigne : un nouvel aspect dans l'étude la différenciation génétiques des populations de châtaignier en France. Annales des Sciences Forestières n°49, page 75 à 79.
- [39] **FREYSSAC V., RAHMANI A., CARLUE M., VERGER JP., MORVAN H.**, 1994, Contribution à l'étude de la roulure chez le châtaignier . Etude expérimentale des conséquences d'amendements calciques. I) Relation entre la composition minérale du milieu et celle des jeunes plants, Annales Scientifiques du Limousin n°10, page 25 à 34.

[40] **FREYSSAC V., LAROCHE A., CARLUE M., MORVAN H.**, 1994, Contribution à l'étude de la roulure chez le châtaignier . Etude expérimentale des conséquences d'amendements calciques. II) Effet du calcium sur le contenu pectique du bois, Annales Scientifiques du Limousin n°10, page 35 à 43.

[41] **FREYSSAC V.**, 1998, Influence de la nutrition calcique sur les contenus ioniques et les pectines de châtaignier. Contribution à la connaissance du métabolisme pectique de vitroplants, Thèse, Université de Limoges, 152 pages.

[42] **GALLEGO HA., ALEJANDRO MARTIN., GERARDO MORENO, SANTA REGINA,** 1998, Nutrient cycling in deciduous forest ecosystems of the Sierra de Gata mountains: nutrients supplies to the soil through both litter and throughfall, Annales des Sciences Forestières n°55, page 771 à 784.

[43] **GRIL J., BERRADA E., THIBAUT B.**, 1993, Recouvrance hygrométrique du bois vert. Variations dans le plan transverse chez le châtaignier et l'épicéa et modélisation de la fissuration à cœur provoquée par l'étuvage. Annales des Sciences Forestière n°50, page 487 à 508.

[44] **Groupe des Producteurs de bois du sud de la Dordogne**, 1989, Etude de la ressource, de l'exploitation, du conditionnement et du marché des bois de taillis feuillis dans le massif forestier de la Dordogne, 45 pages.

[45] **GUIDICI F., FONTI P., POHLER E., SANDOZ JL.**, 2001, Qualità del legname di castagno : diagnosi della cippollatura per mezzo du ultrasuoni, page 259 à 267.

[46] **LACHAUSSEE E.**, 1953, Note sur la roulure et la gélivure du chêne, Société Forestière de Franche –Comté n°12, page 657.

[47] **LAFONT J.P.**, 1993, Le bois de châtaignier , Objet d'un programme communautaire de recherche, Forêts de France n°365, page 30 à 31.

[48] **LAROCHE A.**, 1997, Approches expérimentales de la nutrition du châtaignier : Influence d'apports nutritifs sur la croissance des plants, sur la distribution des éléments minéraux dans les organes et sur les caractéristiques générales des pectines, chez des jeunes arbres cultivés sous serre, Thèse, Université de Limoges, 188 pages.

[49] **LAROCHE A. FREYSSAC V., RAHMANI A., VERGER J.P., MORVAN H.**, 1997, Growth and mineral content of chestnut tress under controlled conditions of nutrition, Annales des Sciences Forestières n°54, page 681 à 693.

[50] **LEBAN J.M**, 1985, Contribution à l'étude de la roulure, Thèse, Institut National Polytechnique de Lorraine, 164 pages.

[51] **LEBRET L.**, 2001, Parc Naturel Régional du Limousin. Le châtaignier , une ressource fragilisée : mythe ou réalité ? Rapport de stage FIF-ENGREF, 99 pages.

[52] **LEFIEVRE J.**, 1998, Guide de gestion des peuplements de châtaignier en Aquitaine, CRPF d'Aquitaine, 26 pages.

[53] **LEONARDI S., SANTA REGINA, RAPP M., GALLEGU HA., RICO M.**, 1996, Biomass, litterfall and nutrient content in *Castanea sativa* coppice stands of southern Europe, Annales des Sciences Forestières n°53, page 1071 à 1081.

[54] **MACCHIONI N.**, 1995, Mechanical strength and ring shake in chestnut (*Castanea sativa* Mill) wood, Forêt Méditerranéenne XVI n°1, page 67 à 73.

[55] **MACCHIONI N., PIVIDORI M.**, 1996, Ring shake and structural characteristics of a chestnut (*Castanea sativa* Miller) coppice stand in northern Piedmont (northwest Italy), Annales des Sciences Forestières n°53, page 31 à 50.

[56] **MARTINIS R.**, 2002, Analysis and development of nondestructive techniques for decay detection in standing trees, Thèse, Université de Florence, 170 pages.

[57] **NEPVEU G.**, 1988, Détermination de la qualité du bois par prélèvement non destructif, Revue Forestière Française XL numéro spécial, page 62 à 70.

[58] **PELTIER E.**, 1995, Analyse qualitative du bois de châtaignier , CRPF Pays de Loire, Mémoire ESB, 38 pages.

[59] **PITTE J-R.**, 1986, Terres de castanide, Homme et paysages du châtaignier de l'antiquité à nos jours, Edition Fayard, 449 pages.

[60] **RANGER J., FELIX C., BOUCHON J., NYS C., RAVART M.**, 1990, Dynamique d'incorporation du carbone et des éléments nutritifs dans un taillis simple de châtaignier (*Castanea sativa* Mill), Annales des Sciences Forestières n°47, page 413 à 433.

[61] **RIOU-NIVERT P., TOURRET V.**, 1989, Le calcul économique en forêt, Forêt-Entreprise n°61, page 12 à 56.

[62] **VERGER J.P., JAVELLAUD J.**, 1986, Etude phytoécologique d'un taillis de châtaignier (*Castanea sativa* Mill.) en forêt domaniale de Pompadour (Corrèze), Annales Scientifiques du Limousin n°2, page 39 à 52.

[63] **VERGER J.P., DOMAIN P., FOURNIER J.M., MAISONIER C., DJOMO J. E.**, 1994, Importance du calcium dans le développement *in situ* du taillis de châtaignier , Annales Scientifiques du Limousin n°10, page 13 à 24.

- [64] **ROMAGNOLI M., NOCETTI M., SARLATTO M., EVANGESLISTA L.**, 2004, Dendrochronological assessment of chestnut (*Castanea sativa* Mill.) for dating purposes in Central Italy, *Dendrochronologia* 21, page 117 à 130.
- [65] **REVEILLAUD L.**, 1979, Enquête sur la roulure du châtaignier dans le Languedoc-Roussillon, Rapport de stage ENITEF, 48 pages.
- [66] **SANDOZ JL., LORIN P.**, 1996, Tares internes du bois : détection par ultrasons, *Revue Forestière Française XLVIII n°3*, page 231 à 240.
- [67] **SEVRIN E.** (coordinateur du dossier), 1999, Châtaignier Sols, sylviculture, chancre, Forêt Entreprise n°128, page 23 à 41.
- [68] **THIBAUT B.**, 1982, Mise en place d'un programme de recherche sur la roulure du châtaignier . Forêt Entreprise n°4.
- [69] **THIBAUT B., FOURNIER M., JULLIEN D.**, 1995, Contraintes de croissance, recouvrance différée à l'étuvage et fissuration des grumes de châtaignier : cas du châtaignier . Forêt méditerranéenne n°16 (1), page 85 à 91.
- [70] **ZÜRCHER E.**, 2001, Variations of wood properties linked to lunar synodic rhythm : traditions and experimental results on Norway spruce (*Picea abies* Karst), Extrait de "First International Conferec of the Euopen Society for wood mechanics", Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, page 59 à 71.
- [71] **ZÜRCHER E., CANTIANI M-G., SORBETTI-GUERRI F., MICHEL D.**, 1998, Tree stem diameters fluctuate with tide, *Nature* 392 (Rubrique: Scientific correspondence), page 665 à 666.
- [72] **ZÜRCHER E., ROGENMOSER C.**, 2005, Forschungsbericht, Schlussbericht, Fällzeitpunkt und holzeigenschaften, Berichet n°2643-SB-01, 98 pages. (en cours de validation)

Listes des figures et des tableaux

n° du tableau	Titres des figures	n° de page
Figure n°1	Récolte de châtaignes en Italie en 1390-1400 (BNF)	7
Figure n°2	Verger de châtaigniers greffés, à Pouzauges en Vendée (85)	7
Figure n°3	L'exigence autécologique de <i>Castanea sativa</i> (Lemaire, 2006)	8
Figure n°4	Une faible proportion d'aubier	9
Figure n°5	Les courbes de fertilité du châtaignier en France. (SUF-IDF)	9
Figure n°6	Le potentiel de production estimée en France : l'accroissement moyen par m ³ ha/an (Lemaire, 2005)	10
Figure n°7	Evolution du prix du châtaignier suivant les catégories de circonférence depuis 1988	11
Figure n°8:	La fente tangentielle	14
Figure n°9	"Overlay" : Cicatrisation des tissus après un traumatisme (FONTI P., MACCHIONI N, 2003)	14
Figure n°10	"Discoloured detachment" : Compartimentation et décoloration après un traumatisme (FONTI P., MACCHIONI N, THIBAUT B., 2002)	14
Figure n°11	Le décollement ou le "detachment"	15
Figure n°12	La cassure ou "crack"	15
Figure n°13	Répartition de la fréquence et des types de roulures par région (CHANSON B., LEBAN J.M, THIBAUT B., 1989).	16
Figure n°14	Evolution de la fréquence absolue de roulure en fonction de l'âge du peuplement (Bonenfant M., 1985).	17
Figure n°15	Pourcentage de billons roulés en fonction de la position du rejet. (CHANSON B., 1988)	19
Figure n°16	Fréquence de la distribution de la roulure suivant le pourcentage du rayon de l'arbre (n=264). (MACCHIONI N., PIVIDORI M., 1996).	20
Figure n°17	Pourcentage d'apparition d'un cerne roulé par tranche « d'âge relatif » du cerne dans l'arbre. Etude de Bonenfant (1985)	20
Figure n°18	Incidence de la roulure exprimée en angle circulaire en comparaison avec la croissance annuelle radiale (FONTI P., BRAKER O-U., GIUDICI F., 2002).	21
Figure n°19	Evolution de la largeur de cernes les cinq années précédent et succédant à un cerne roulé. Région d'étude : Languedoc-Roussillon.(REVEILLAUD, 1979).	21
Figure n°20	Répartition des fentes tangentielles et radiales pour le Châtaignier et le Douglas (<i>Pseudotsuga menziesii</i> Mirb) traités à l'azote liquide. (CHANSON B., THIBAUT B., BOURGEOIS C., 1990).	24
Figure n°21	Relation entre la largeur de cerne et la résistance radiale. (FONTI P., SELL J., 2003).	25
Figure n°22	Relation entre la largeur de cerne, la résistance radiale et la roulure (FONTI P., SELL J., 2003).	25
Figure n°23	Volume de rayon ligneux suivant la présence et l'absence de roulure dans trois peuplements différents. (FONTI P., FREY B., 2002)	26
Figure n°24	Les mécanismes de formation de la roulure (FONTI P., MACCHIONI N., THIBAUT B., 2002).	30
Figure n°25	Fréquence de la roulure en fonction de l'âge et de l'indice de fertilité en Limousin	33
Figure n°26	Relation entre la proportion d'arbres roulés et la proportion de volume roulé.	34
Figure n°27	L'effet de l'humus sur le risque de roulure en Bretagne	34

L'impact des éclaircies tardives sur le risque d'apparition de la roulure

n° du tableau	Titres des figures	n° de page
Figure n°28	L'effet de largeur de cernes sur la résistance mécanique radiale.	35
Figure n°29	Les grandes étapes de la mise en œuvre du projet	38
Figure n°30	Couverture géographique de l'étude	43
Figure n°31	Bilan de la prospection et placettes retenues dans l'échantillonnage	43
Figure n°32	Situation des couples étudiés en fonction de l'âge et des indices de fertilité. Les points encadrés constituent à un couple.	45
Figure n°33	Les limites de l'échantillonnage : l'âge de l'éclaircie. En rouge figure la limite maximale de passage en première éclaircie.	46
Figure n°34	Les grandes étapes du protocole	47
Figure n°35	Le cubage de la grume et mesure de la purge	48
Figure n°36	Les indicateurs de la roulure	48
Figure n°37	Mesure de l'à-coup de croissance sur les arbres éclaircis	49
Figure n°38	Détermination de la fertilité de la station à l'aide de la flore. Exemple de la placette 9503E	51
Figure n°39	L'influence de l'indice trophique sur le risque de roulure ($P < 5\%$)	54
Figure n°40	Répartition du taux de roulure en fonction du gradient trophique de la station.	55
Figure n°41	L'influence de l'âge sur le risque de roulure	56
Figure n°42	L'influence du coefficient d'élanement sur le risque de roulure	57
Figure n°43	Influence de la sylviculture sur le risque de roulure	60
Figure n°44	Comparaison de l'accroissement courant avant l'éclaircie des arbres sains et des arbres roulés pour deux classes d'âge	63
Figure n°45	Distribution de l'accroissement courant avant éclaircie pour les arbres sains (n=52) et les arbres roulés	64
Figure n°46	L'accroissement courant en circonférence après éclaircie pour les arbres sains et les arbres roulés pour deux classes d'âge	64
Figure n°47	L'à-coup de croissance pour les arbres sains et les arbres roulés pour deux classes d'âge	65
Figure n°48	Evolution de l'accroissement courant en circonférence en fonction de l'âge pour deux classes de fertilité et pour des peuplements témoins	67
Figure n°49	Evolution de l'accroissement de la placette 6002E et passage sous le seuil de risque	68
Figure n°50	Relation entre la roulure et le statut social de l'arbre pour les deux classes d'âge et suivant la sylviculture	69
Figure n°51	Distribution de la hauteur de purge mesurée dans le cadre de l'étude FOGFOR (n=159) et dans le cadre de l'étude Limousin (n=176)	70
Figure n°52	Distribution de la hauteur moyenne de purge par placette	71
Figure n°53	Hauteur de propagation (en m) de la roulure en fonction du nombre de roulures observées à la culée	71
Figure n°54	Position relative maximale de la roulure sur le rayon et la hauteur de purge pour les peuplements témoins de plus de 45 ans.	72
Figure n°55	Position relative de la roulure sur le rayon de l'arbre au sein des peuplements témoins	73

L'impact des éclaircies tardives sur le risque d'apparition de la roulure

n° du tableau	Titres des figures	n° de page
Figure n°56	Comparaison de la répartition de la roulure entre les peuplements témoins et les peuplements éclaircis de plus de 45 ans en utilisant l'année d'éclaircie comme point de référence	74
Figure n°57	Comparaison de la répartition de la roulure entre les peuplements témoins et les peuplements éclaircis de moins de 45 ans en utilisant l'année d'éclaircie comme point de référence	74
Figure n°58	Distribution de la roulure et évolution de l'accroissement courant en circonférence pour le couple 9501T/9501E	75
Figure n°59	Distribution de la roulure et évolution de l'accroissement courant en circonférence pour le couple 7902T/7902E	76
Figure n°60	Cinétique de la roulure et effet de l'éclaircie	77
Figure n°61	Relation entre le nombre d'années écoulées depuis l'éclaircie et la différence du taux de roulure TEMOIN-ECLAIRCI	78
Figure n°62	Evolution de la distribution de la roulure en fonction de l'âge parmi les arbres de peuplements non éclaircis	79
Figure n°63	Essai d'explication : Pourquoi l'éclaircie modifie-t-elle la distribution de la roulure dans l'arbre ?	80
Figure n°64	Distribution de la différence entre la proportion d'arbres roulés d'après le modèle et la proportion d'arbres roulés d'après les observations de terrain.	82
Figure n°65	La reproductibilité du modèle : Peut-on étendre le modèle d'évaluation de la roulure à la Bretagne	84
Figure n°66	Relation entre la proportion de d'arbres roulés et la proportion de volume roulé (n=29, P=1/1000).	85
Figure n°67	Relation entre la proportion de d'arbres roulés et la perte de valeur financière (n=29, P=1/100).	86
Figure n°68	Simplification de la clé : définition des niveaux trophiques à l'aide de la flore	88
Figure n°69	Simplification de la clé : relation entre la proportion d'arbres roulés et l'âge	89
Figure n°70	Définition de l'âge d'exploitabilité en fonction de la perte de valeur économique.	90
Figure n°71	Evolution de l'accroissement courant et de la surface terrière en fonction de l'âge.	92
Figure n°72	Densité à ne pas dépasser au risque de voir la concurrence s'exprimer en fonction de la circonférence moyenne du peuplement.	93
Figure n°73	Relation entre la circonférence moyenne (cm) et la valeur de la parcelle (€/ha)	98
Figure n°74	Evolution du BASIo en fonction de l'âge du peuplement et du taux d'actualisation	99
Figure n°75	Age et circonférence pour optimiser la BASIo	100
Figure n°76	Evolution du BASIo en fonction de l'âge de l'éclaircie et de la densité après éclaircie.	101
Figure n°77	Evolution du BASIo en fonction de l'âge de l'éclaircie et de l'âge d'exploitabilité pour une densité de 200 tiges/ha et une circonférence objective de 120 cm.	102
Figure n°78	Diagnostic de la roulure à partir des ultrasons : le principe du sylvatest®	105
Figure n°79	Le marteau à impulsion	106
Figure n°80	Le resistographe	106
Figure n°81	Principe du marteau à impulsion pour le diagnostic de la roulure	108
Figure n°82	Comparaison du marteau à impulsion et du sylvatest®	108
Figure n°83	Méthodologie pour le diagnostic de la roulure à l'aide du marteau : mesure de la vitesse sur deux axes et sur deux hauteurs (50 et 130 cm)	109

n° du tableau	Titres des figures	n° de page
Figure n°84	Pourritures de cœur se propageant jusqu'à 80 m	109
Figure n°85	Evolution de la vitesse de propagation de l'onde de choc en fonction de la circonférence pour les arbres sains	110
Figure n°86	Evolution de la vitesse de propagation de l'onde de choc en fonction de la circonférence pour les arbres sains et les arbres roulés	111
Figure n°87	Ajustement du diagnostic au marteau	114
Figure n°88	Relation entre le nombre de roulures et la vitesse de propagation de l'onde choc	115
Figure n°89	Influence du diamètre de l'arbre sur la vitesse de propagation de l'onde	116
Figure n°90	Le seuil de détection de la roulore à l'aide du marteau à ondes sonores	117
Figure n°91	Autres usages expérimentaux : purge de la grume à l'aide du marteau	118
Figure n°92	Relation entre le diagnostic à l'aide du marteau à impulsion et le test auditif	119
Figure n°93	Hauteur de purge observée et diagnostic auditif	120
Figure n°94	L'aiguille du résistographe et la vue d'ensemble de l'appareil	122
Figure n°95	Interprétation d'un profil résistographique.	123
Figure n°96	La réponse du résistographe à la roulore	125
Figure n°97	Superposition du profil résistographique et de l'évolution de l'accroissement courant en circonférence pour l'arbre n°9501T/90	126
Figure n°98	Superposition du profil résistographique et de l'évolution de l'accroissement courant en circonférence pour l'arbre n°9501T/14	127
Figure n°99	Superposition du profil résistographique et de l'évolution de l'accroissement courant en circonférence pour l'arbre n°9501E/22	128
Figure n°100	Les limites du résistographe : une mesure ponctuelle et aléatoire.	129

L'impact des éclaircies tardives sur le risque d'apparition de la rouleure

n° du tableau	Titres des tableaux	n° de page
Tableau n°1	Evolution de la fréquence absolue de rouleure en fonction de l'âge du peuplement et de l'origine des tiges (Bonenfant M., 1985)	17
Tableau n°2	Valeurs moyennes des différents paramètres des rejets (n=264) et des arbres de franc-pieds (n=26) selon les différentes classes de rouleure. (MACCHIONI N., PIVIDORI M., 1996).	18
Tableau n°3	Données microdensimétriques du cerne roulé et des cernes adjacents suivant le secteur considéré. (LEBAN, 1985)	22
Tableau n°4	Tableau des caractéristiques mécaniques comparées du chêne et du châtaignier (CTBA, 1972, d'après Bourgeois et al, 2004)	24
Tableau n°5	Bilan des facteurs étudiés en liaison aux risques de rouleure	31
Tableau n°6	Clé d'évaluation du risque de rouleure en Bretagne en fonction de l'humus et de l'âge.	35
Tableau n°7	Temps nécessaire à la réalisation du projet	39
Tableau n°8	Moyens humains et matériels nécessaires à la mise en œuvre du projet	39
Tableau n°9	Stratification théorique de l'échantillonnage	42
Tableau n°10	Description des placettes étudiées	44
Tableau n°11	Comparaison entre l'échantillonnage réel et l'échantillonnage théorique	45
Tableau n°12	Jeu de données disponibles	50
Tableau n°13	Grille de prix pour l'évaluation financière de bois sur pied non roulé	52
Tableau n°14	Tableau de corrélations ; Influence des paramètres stationnels sur le risque de rouleure	54
Tableau n°15	Influence des paramètres dendrométriques sur le risque de rouleure	56
Tableau n°16	Comparaison du risque de rouleure au sein de chaque couple	59
Tableau n°17	Comparaison du taux de rouleures suivant le mode sylvicole par gamme d'âge et de fertilité	61
Tableau n°18	Comparaison de l'accroissement courant avant l'éclaircie des arbres sains et des arbres roulés pour deux classes d'âge	63
Tableau n°19	Description du modèle permettant d'évaluer le risque de rouleure	82
Tableau n°20	Proportion d'arbres roulés en fonction de l'âge et d'indice trophique définie à partir de la végétation pour un peuplement non éclairci	86
Tableau n°21	Age à partir duquel le couvert se renferme en fonction de l'âge d'intervention et de la densité objective	94
Tableau n°22	Circonférence moyenne atteinte en fonction de l'âge et de l'intensité de l'éclaircie pour deux âges d'exploitabilité	95
Tableau n°23	Proposition d'itinéraires sylvicoles n'engendrant pas une augmentation du taux de rouleure	96
Tableau n°24	Grille de prix pour l'évaluation financière	97
Tableau n°25	Bilan du bénéfice escompté pour plusieurs modalités sylvicoles	103
Tableau n°26	Le nombre d'arbres testés par outils de détection	107
Tableau n°27	La vitesse moyenne de propagation d'une onde de choc dans un châtaignier sain	110
Tableau n°28	Fiabilité globale du marteau à impulsion pour le diagnostic de la rouleure sur pied (n=149)	112
Tableau n°29	Evaluation de la fiabilité du marteau par placette	113
Tableau n°30	Ajustement entre le taux de rouleure et le taux d'arbres altérés	114
Tableau n°31	Relation entre la vitesse de propagation de l'onde sonore et le test auditif	120