



**Le traitement irrégulier appliqué
aux peuplements de douglas ou de pins
purs et mélangés en Bourgogne**

Bilan de la convention 2010 - 2012

Nicolas RASSE
CRPF de Bourgogne
Octobre 2012



Le traitement irrégulier des résineux appliqué aux peuplements de douglas ou de pins purs et mélangés en Bourgogne

Bilan de la convention 2010-2012

présenté par

Nicolas RASSE

Centre Régional de la Propriété Forestière de Bourgogne

Octobre 2012

Rapport d'étude réalisé avec le soutien financier
du Conseil régional de Bourgogne et du Conseil général de Côte d'Or

SOMMAIRE

Avant-propos	1
Introduction	2
I. La futaie irrégulière résineuse et mélangée	3
1. La question de l'irrégularisation des peuplements résineux	3
2. Un réseau expérimental au service des propriétaires et des gestionnaires	4
II. Les grands principes de la futaie irrégulière résineuse	7
1. Les principes de gestion	7
2. Concentrer la production sur les gros bois de qualité	8
3. Un couvert permanent étagé et discontinu dans l'espace	11
3.1. Régénérer naturellement par îlots	11
3.2. Pérenniser le peuplement : le passage à la futaie	12
3.3. Travaux économes pour produire des bois de qualité	13
3.4. Favoriser le mélange des essences	14
III. La mise en œuvre pratique	17
1. La coupe jardinatoire	17
1.1. Atteindre ou maintenir un capital sur pied optimal	17
1.2. Définir un prélèvement et une fréquence de passage	18
1.3. Choisir les arbres à marteler	18
2. Concilier exploitation et mécanisation	20
3. Les soins culturaux : accompagner la dynamique naturelle par la main du forestier	24
3.1. Diagnostic de la dynamique naturelle	24
3.2. Des interventions ciblées à adapter selon le stade de développement de l'arbre	25
IV. Synthèse : comment passer d'une plantation à une futaie irrégulière ?	29
4.1. Cas des peuplements de douglas	29
4.2. Cas des peuplements de pins	33
Bibliographie	35
ANNEXES	37
I. Bilan des travaux	
II. La communication	
III. Les articles de presse	
IV. Protocoles d'installation	
V. Le catalogue des dispositifs	

Avant-propos

Le présent document présente les travaux sur les traitements irréguliers résineux et mixtes réalisés par le Centre Régional de la Propriété Forestière de Bourgogne. Cette action, financée par le Conseil Régional de Bourgogne et le Conseil Général de Côte d'Or, s'est déroulée d'octobre 2010 à juillet 2012.

Au cours de ces travaux, un grand nombre de forêts a été visité en France et à l'étranger. Ce document synthétise d'une part les enseignements techniques recueillis auprès de nombreux praticiens, spécialiste du traitement irrégulier résineux et d'autre part la recherche bibliographique de documents techniques et scientifiques. Il fait également état du réseau de références mis en place en Bourgogne et des premiers enseignements qui en sont issus. Au sein de ce réseau constitué de 36 placettes suivies, 21 parcelles de démonstration servent et serviront d'outil de formation et de sensibilisation pour les gestionnaires, les propriétaires et les écoles forestières. Ce réseau constitue également une base technique dont le suivi permettra d'enregistrer les données nécessaires à la connaissance des peuplements et de leur évolution. Il constitue l'outil indispensable pour affiner la sylviculture des traitements irréguliers.

Les objectifs de ce document sont d'informer et d'expliquer aux propriétaires forestiers et aux gestionnaires la démarche à suivre pour entamer et suivre une procédure d'irrégularisation. Ils visent également à faire un point sur l'ensemble des actions entreprises et financées dans le cadre de ces travaux.

Introduction

Dans les peuplements de douglas, la méthode majoritairement pratiquée consiste à récolter par coupe rase les peuplements vers 45-50 ans pour produire des bois moyens répondant aux usages industriels courants. La technique passe par la plantation, les entretiens, deux ou trois éclaircies et la coupe rase suivie d'une nouvelle plantation. Dans les années 1990, le CRPF de Bourgogne a mené des travaux sur la régénération naturelle du douglas afin de proposer une alternative de gestion aux propriétaires et aux gestionnaires. Des travaux menés dans le Morvan sur des peuplements de douglas traités en régulier ont montré que couper un peuplement avant 60 ans sur sol granitique risquait, en peu de générations, d'appauvrir irrémédiablement le sol par des exportations d'éléments minéraux plus importantes que les restitutions. Plus récemment, des travaux menés en Bourgogne sur la nécrose cambiale en bande du douglas ont montré que le phénomène est largement présent et concerne, selon une intensité variable, trois peuplements sur quatre.

Pour faire face à ces effets négatifs et améliorer l'adaptabilité des peuplements à la modification du climat, des méthodes alternatives de gestion émergent : régénération lente et irrégularisation.

Les pins sont souvent plantés dans les conditions stationnelles les moins fertiles sur des sols très variables. Le pin sylvestre s'accompagne souvent d'un mélange de chêne sur sol acide dans des contextes d'hydromorphie d'intensité variable. Sur sol calcaire, le pin noir s'accompagne souvent d'un mélange de pin sylvestre avec en sous étage du hêtre. Dans les peuplements en mélange, les pins non élagués ont en général une forme et une branchaison de meilleure qualité que celles des pins non élagués en peuplements purs. Pour bénéficier de ce constat et profiter au mieux de l'adaptation des essences localement, les gestionnaires s'orientent vers l'irrégularisation.

Le présent document traite de la gestion en irrégulier dans les peuplements de douglas ou de pins purs et mélangés.

I. La futaie irrégulière résineuse et mélangée

1. La question de l'irrégularisation des peuplements résineux

La Bourgogne a connu de grandes vagues de boisements résineux qui ont concerné essentiellement deux essences : le douglas et les pins. Privés à plus de 80 %, les peuplements résineux couvrent 154 000 hectares soit près de 20 % de la surface boisée mais assurent près de 25 % de la production.

Introduit en Morvan dès le début du XX^{ème} siècle, le douglas s'est particulièrement bien acclimaté à la région. Essence hautement productive, il a été introduit massivement dans les années 60-70. Les douglasiaies couvrent actuellement 73 000 hectares¹ soit 47 % de la surface boisée résineuse plaçant ainsi la Bourgogne au 2^{ème} rang national. Chaque année, près de 315 000 mètres cubes sous écorce sont transformés en Bourgogne². La majorité de ces peuplements ont entre 30 et 40 ans (*figure 1*) et la décision liée à leur récolte commence à se poser. Selon l'étude de l'Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement, si l'ensemble des peuplements de Bourgogne s'exploitait à un diamètre de 40 à 50 cm, cela générerait un pic de récolte dans les 15 ans à venir suivi d'un effondrement qui poserait de grandes difficultés à la filière bois résineuse bourguignonne. L'étalement de la récolte permettrait d'assurer un approvisionnement plus pérenne des industries de transformation.

A cette situation, s'ajoute les problèmes liés aux dégâts occasionnés par les tempêtes, les sécheresses, l'épuisement des sols, la difficulté de reboiser (changement climatique, printemps secs, forte variation de température journalière, pression cynégétique forte) et récemment, la sensibilité du douglas face au stress hydrique. Le douglas, grand consommateur d'eau, est particulièrement sensible aux sécheresses prolongées. Pour permettre une meilleure gestion dans le temps de la ressource résineuse et d'améliorer l'adaptabilité des peuplements à la modification du climat, des méthodes alternatives de gestion émergent.

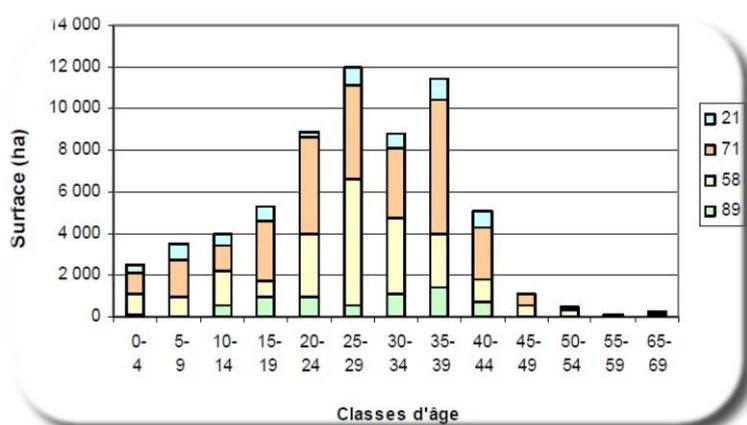


Figure 1. Répartition en classe d'âge de la superficie occupée par le douglas (d'après Ferron, formation IDF 2011).

Avec environ 40 000 hectares, les pins couvrent plus du tiers de la surface de résineux dont plus de la moitié a été introduite en Côte d'Or dans les années 1930-1940³. Ces boisements, en valorisant des

¹ source : Memento Agreste Bourgogne, situation en 2011

² source : Aprovalbois, moyenne sur les années 2007, 2008, 2009 et 2011

³ source : Inventaire Forestier National, campagnes 2004 à 2011

sols ingrats et peu productifs abandonnés par l'agriculture, avaient pour vocation première de répondre à la demande en bois de mines. Aujourd'hui, ce débouché n'existe plus. Le revenu principal est actuellement surtout lié à la chasse. Les sols sur calcaire dur, à l'origine d'argile de décarbonatation, offrent une grande variabilité de possibilités de prospection racinaire favorable au mélange d'essences. De ce constat émerge une volonté de la part des gestionnaires forestiers de diversifier et, dans la même logique, d'irrégulariser ces peuplements afin d'assurer une production plus en phase avec le marché.

2. Un réseau expérimental au service des propriétaires et des gestionnaires

Le protocole d'étude

Le réseau s'appuie sur un protocole d'installation qui sert, parallèlement au recensement et au suivi de références, à recueillir des données susceptibles d'expliquer, ou au moins d'observer et d'analyser, l'obtention et le développement de la régénération naturelle.

Ce protocole, présenté en annexe IV, repose sur trois niveaux :

- **Niveau 1 ou peuplement signalé** : il s'agit d'un recensement de peuplements potentiellement intéressants (mêlés, hétérogènes en diamètre, peuplements non encore éclaircis ou fermés) qui peuvent s'irrégulariser en fonction des interventions futures. Une description visuelle sommaire selon un cheminement permet d'apprécier la composition en essences, le capital, la qualité, la structure, l'étagement et la régénération. Il s'agit d'un dispositif souple et léger qui permet de garder une image chiffrée d'une zone jugée intéressante.
- **Niveau 2 ou peuplement référence - inventaire** : il s'agit de peuplements qui présentent une hétérogénéité dans les diamètres, un mélange d'essences et, si possible, la présence de régénération, de gaules et de perches. On y effectue un suivi dendrométrique par inventaire périodique, intégrant les données fournies par le passage en coupe, et surtout un enregistrement des données économiques (production par catégorie de produit, recettes, dépenses, temps de travail). Ce niveau a pour but d'illustrer la méthode de gestion ou de conversion en futaie irrégulière (état du peuplement, passé sylvicole, interventions programmées ou possibles).
- **Niveau 3 ou peuplement référence AFI ou référence type AFI ou référence inventaire cartographique** : les placettes permettent un suivi individuel des principales caractéristiques des arbres (diamètre, hauteur totale, qualité, houppier) et un suivi précis de la régénération. Ce niveau a pour but de suivre la croissance en diamètre et la compétition entre les arbres. Les placettes cartographiées servent aussi de dispositifs de démonstration et de support pour la pratique du martelage.

Ce référentiel a été constitué à partir de la visite de 165 peuplements parmi lesquels 78 ont été retenus (cf. carte ci-après).

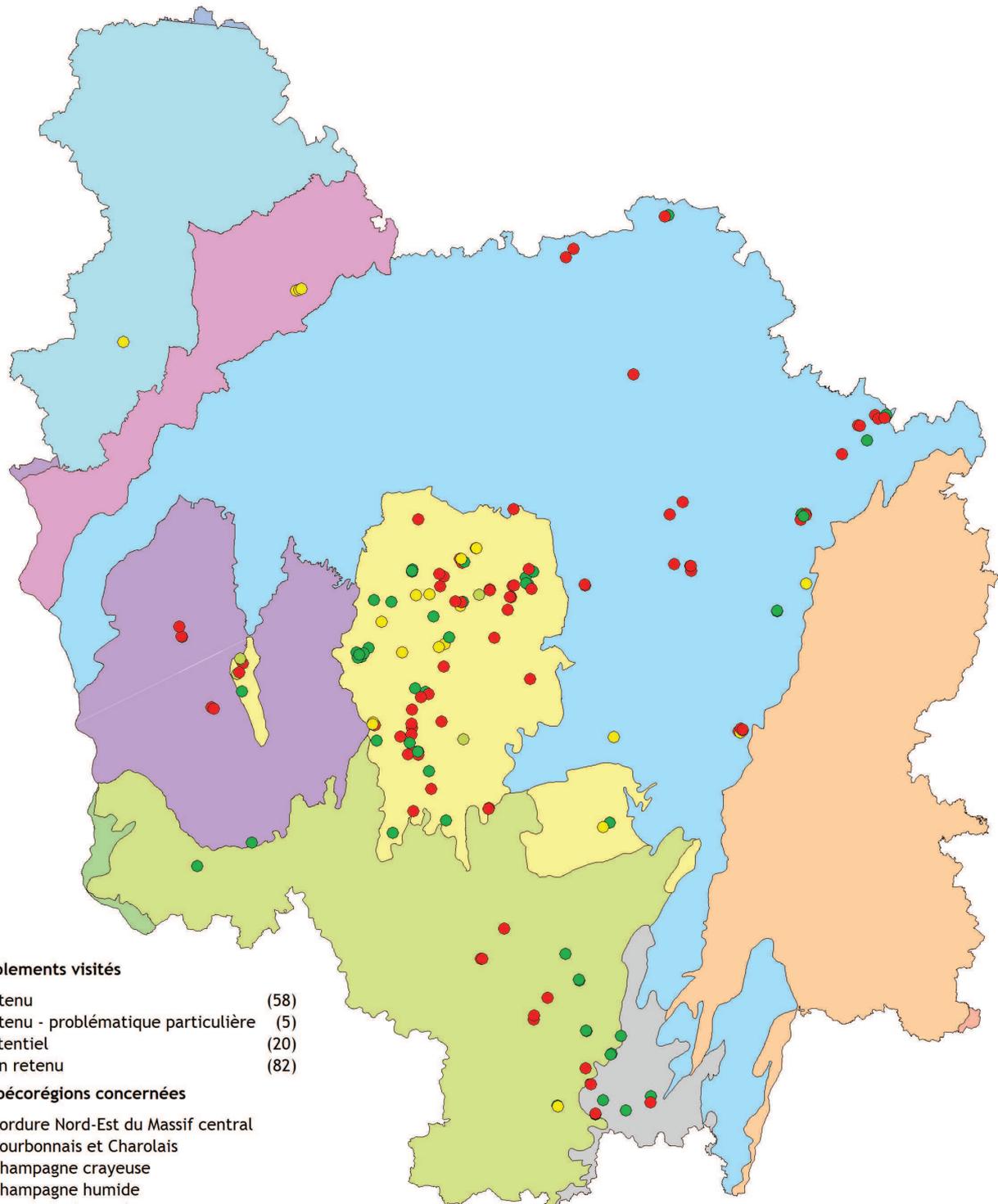
Le réseau du CRPF Bourgogne

Le réseau CRPF (cf. carte ci-après), mis en place à l'aide des gestionnaires et des propriétaires forestiers, est actuellement constitué de 22 peuplements signalés et 36 références (cf. tableau ci-

Peuplements visités pour les travaux irréguliers résineux



© IGN BD Parcellaire n°2008/C/SE/29-38, Scan25© © IGN Paris 2006, © SIG - CRPF Bourgogne 2012



Peuplements visités

- Retenu (58)
- Retenu - problématique particulière (5)
- Potentiel (20)
- Non retenu (82)

Sylvoécoringions concernées

- Bordure Nord-Est du Massif central
- Bourbonnais et Charolais
- Champagne crayeuse
- Champagne humide
- Morvan et Autunois
- Pays d'Othe et Gatinais oriental
- Pays-Fort, Nivernais et plaines prémorvandelles
- Plaines alluviales et piémonts du Massif central
- Plateaux calcaires du Nord-Est
- Premier plateau du Jura
- Saône, Bresse et Dombes



après) présentés dans le catalogue des dispositifs situé en annexe V. Parmi les références, 20 placettes permettent un suivi individuel des arbres et 12, cartographiées, peuvent servir de marteloscope (dispositif permettant des exercices pratiques de marquage des coupes et une analyse détaillée des résultats).

A partir des parcelles les plus représentatives et les mieux situées géographiquement, quatre grands pôles de démonstration ont été mis en place et servent d'outil de formation et de sensibilisation pour les gestionnaires, les propriétaires et les écoles forestières. Le pôle de Selongey, Côte d'Or, est axé sur la gestion des pins noirs et sylvestres. Trois autres pôles sont axés sur l'irrégularisation et la diversification des peuplements de douglas :

- Saulieu, Côte d'Or
- Montreuillon, Nièvre
- Dompierre les Ormes, Saône et Loire

Esence et station	N°	Forêt	Communes	Dépt	Thématique
Douglas sur granite					
	28	Bois de Taulé	Larochemillay	58	Gestion de la ronce
	38	Bois du Grand Champ	Montsauche les Settons	58	
	50	Bois de la Tour	Saint Firmin	71	Peuplement en bandes – soins cultureux
	52	Bois d'Esmyards	Montagny sur Grosne	71	Soins cultureux
	55	Bois de la Fayolle	Dompierre les Ormes	71	Peuplement en bandes – soins cultureux
	67	Forêt de Montlay	Montlay en Auxois	21	
	69	Forêt de Juillenay	Juillenay	21	Soins cultureux
	97	Forêt de Saint Andeux	Saint Andeux	21	Peuplement en bandes - soins cultureux
	109	Forêt des Vernets de Sonne	Lormes	58	
	110	Bois du Four	Lormes	58	
	150	Bois de la Montée	Brassy	58	
	163	Bois de la Revenue	Marigny l'Eglise	58	
Douglas sur grès					
	19	Bois de Grandlandes	Mornay	71	Soins cultureux
	56	Bois de Grandlandes	Mornay	71	Soins cultureux
	62	Forêt de Cressu	Martigny le Comte	71	
	120	Forêt de Cressu	Martigny le Comte	71	
Douglas sur roches volcaniques					
	26	Bois de Semelay	Semelay	58	Peuplement en bandes – gestion de la ronce
	89	Bois de Vannes	Vauclaix	58	Gestion de la ronce
	90	Forêt des Lambes	Montreuillon	58	
	139	Forêt de Montreuillon	Montreuillon	58	
	140	Forêt de Montreuillon	Montreuillon	58	
	141	Forêt de Montreuillon	Montreuillon	58	

Localisation des références CRPF



© IGN BD Parcellaire n°2008/C/SE/29-38, Scan25® © IGN Paris 2006, © SIG - CRPF Bourgogne 2012

Types de placette

- Références - AFI (4)
- Références - type AFI (4)
- Références - inventaire cartographique (12)
- Références - inventaire (16)
- Signalés (22)

Essence dominante

- Douglas (50)
- Pin noir (8)

 Pôle de démonstration



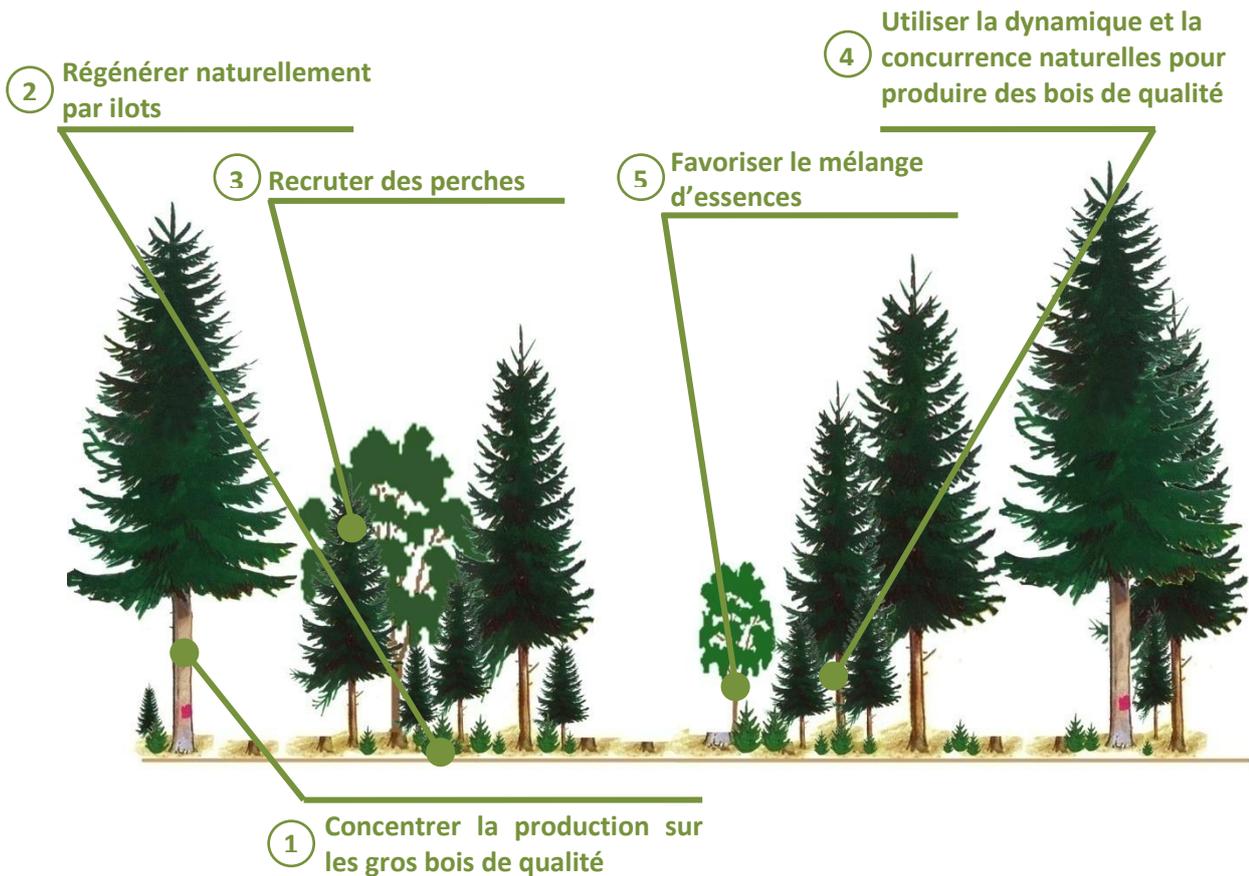
<i>Essence et station</i>	<i>N°</i>	<i>Forêt</i>	<i>Communes</i>	<i>Dépt</i>	<i>Thématique</i>
Pin noir et pin sylvestre sur calcaire					
	18	Forêt de La Faas et de l'Aubépine	Selongey	21	Gestion du mélange résineux-feuillus
	83	Forêt de La Faas et de l'Aubépine	Selongey	21	
	84	Forêt de Chevaillon	Echevannes	21	Gestion du mélange résineux-feuillus
Mélange résineux sur granite					
	25	Bois de la Comme de la Vouavre	Sermages	58	
	45	Forêt de Chantalouette	Gibles	71	
Mélange résineux sur grès					
	111	Forêt de Montlay	Montlay en Auxois	21	
Mélange résineux sur roches volcaniques					
	23	Bois de la Vieille Gravelle	Villapourçon	58	
Mélange résineux-feuillus sur argile					
	22	Forêt d'Avril sur Loire	Avril sur Loire	58	
	68	Forêt de Mouille Segrain	Montlay en Auxois	21	
Mélange résineux-feuillus sur granite					
	98	Forêt de Saint Franchy	Saint Franchy	58	
	102	Forêt de Breuil Chenue	Dun les Places	58	
	161	Bois de la Revenue	Marigny l'Eglise	58	
	162	Bois de la Revenue	Marigny l'Eglise	58	
Mélange résineux-feuillus sur grès					
	153	Forêt de la Merlière	Champvert	58	

II. Les grands principes de la futaie irrégulière résineuse

1. Les principes de gestion

En futaie irrégulière, le semis apparaît et se développe de manière discontinue dans l'espace et des arbres de toutes essences et toutes dimensions se partagent l'espace vertical (la hauteur du peuplement).

Un couvert permanent étagé et discontinu dans l'espace permet de :



① Concentrer la production sur les gros bois de qualité

Un arbre est maintenu tant que sa valeur commerciale augmente et qu'il ne gêne pas un autre arbre de meilleure qualité. Les coupes favorisent les plus beaux arbres aussi longtemps qu'ils présentent une bille de pied de qualité et un houppier en croissance.

Un couvert permanent étagé et discontinu dans l'espace

- ② Régénérer naturellement par îlots

Le martelage se réalise au profit de la qualité sans se préoccuper de la répartition spatiale des arbres afin de favoriser différentes situations de lumière et permettre ainsi un dosage de la lumière en alternant des zones plus sombres et d'autres plus claires. Cette variation de luminosité, associée à une concurrence latérale, stimule la croissance en hauteur des arbres et favorise ainsi une différenciation.

- **3 Pérenniser le peuplement : le passage à la futaie**

La pérennisation du peuplement est assurée par le recrutement de 2 à 5 perches par hectare et par an. Ce recrutement est possible grâce aux variations de lumière sous couvert apportées par des prélèvements (passage en coupes) faible mais fréquent. Ces passages en coupes favorisent également une meilleure réaction des arbres.

- **4 Travaux économes pour produire des bois de qualité**

Sous couvert, les branches sont plus horizontales et moins vigoureuses dans des conditions de lumière plus faible. Cette luminosité limitée, couplée à une concurrence latérale, stimule la croissance en hauteur de la régénération et favorise ainsi une différenciation entre les jeunes tiges de vitalité différente. La concurrence latérale exercée par les jeunes tiges favorise la formation de petites branches fines qui ne peuvent se développer et sèchent donc rapidement. Cette compression latérale permet également de limiter la grosseur de bois juvénile qui se forme au cœur du bois pendant les 20 premières années.

- **5 Favoriser le mélange d'essences**

La variation de lumière sous couvert permet de favoriser et de maîtriser la composition en essences selon leur vigueur. Le mélange d'essences contribue également à l'étagement du peuplement. Favorisant ainsi le dosage de la lumière, il améliore la qualité des arbres d'avenir et crée un microclimat favorable au développement de la régénération.

2. Concentrer la production sur les gros bois de qualité

Gros bois : une croissance soutenue et un gain annuel par arbre élevé

Le calcul du volume d'un arbre ($\text{diamètre médian}^2 \times \pi \times \text{hauteur bois d'oeuvre} / 4$) intègre un diamètre élevé au carré. Par conséquent, le volume progresse plus vite que l'accroissement en diamètre. Pour un douglas, il faut 35 à 40 ans pour atteindre 1 m³ mais chaque m³ supplémentaire s'acquiert en moins de 10 ans et ce jusqu'à 100 ans (figure 2).

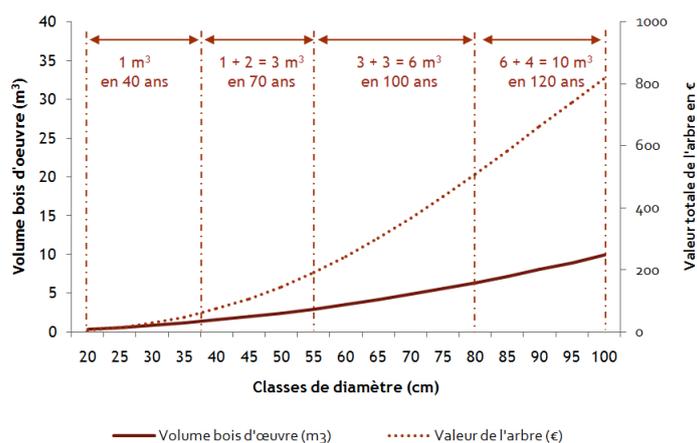


Figure 2. Progression du volume et de la valeur du douglas en fonction du diamètre.

Le sylviculteur a tout intérêt à laisser grossir quelques belles tiges de douglas à l'hectare (figure 3). En comparant un arbre exploité à 50 cm de diamètre avec le même exploité à 80 cm, ce dernier, même s'il n'est pas encore valorisé à un prix correspondant à sa qualité réelle, aura pratiquement triplé son

volume pendant la trentaine d'années où il aura été conservé : soit un gain annuel de 8 € par an alors qu'avant il n'était que de 2,3 € par an. Les gros bois trouveront toujours preneur dans la mesure où le diamètre d'exploitabilité ne dépasse pas 1 mètre⁴.

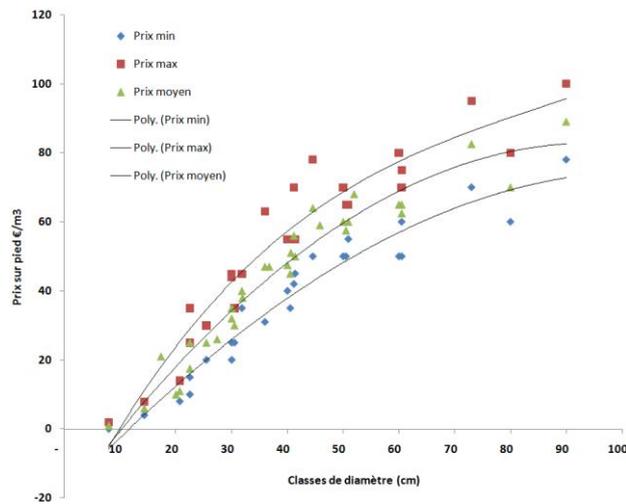


Figure 3. Mercuriales de prix du douglas
(d'après Vanstaevel, CRPF Antenne de la Nièvre, FOGEFOR professionnalisation 2011)

Pour une valorisation optimale, les gros bois doivent être exempts de nœuds avec une faible décroissance. Pour le douglas, ils doivent également présenter une forte proportion de bois de cœur (duramen)⁵. La qualité des bois s'améliore en grossissant. En revanche, selon la provenance et surtout la sylviculture pratiquée, les branches peuvent tomber ou casser naturellement ou bien se maintenir assez longtemps avec une section importante, l'arbre en grossissant fait disparaître extérieurement les défauts. Dans ce dernier cas, un arbre de belle qualité apparente, peut comporter de nombreux défauts internes (comme des nœuds noirs) entraînant un déclassement (figure 4). Ces défauts cachés expliquent la grande variabilité des prix des gros bois (figure 3).



Figure 4. Une grume de douglas de 80 cm de diamètre de très belle qualité extérieure (classé en catégorie A sur pied) n'est pas synonyme de belle qualité interne. En haut à droite, le premier avivé est de très belle qualité. Dès le deuxième avivé, en bas à droite, de nombreux nœuds noirs apparaissent.

⁴ Scierie GARMIER, Scierie DUBOT & Patrice HALDRIC, Eurodouglas, communication personnelle

⁵ Daniel BRIZARD, scierie BRIZARD, communication personnelle

Au contraire comme pour le pin ci-dessous, un petit nœud apparent n'entraîne pas forcément un déclassement. Pour s'en assurer, il suffit de gratter l'écorce afin de vérifier si le nœud persiste dans le bois ou non pour s'assurer de la qualité⁶ (figure 5). Seul un élagage « de finition » assure la production de bille de pied sans nœuds (cf. partie II.3.3. et III.3.2.).



Figure 5. Si la trace du nœud sur l'écorce de ce pin disparaît en grattant, le cœur du bois est exempt de nœud

Gros bois : un potentiel de valorisation

Pour les essences résineuses, la principale utilisation du bois d'œuvre reste la construction. Le marché actuel est surtout demandeur de bois de 1,5 à 2,5 m³. Les procédés de sciage sont optimisés pour des petits et moyens bois qui permettent de produire des sections répondant à la grande majorité des demandes des marchés^[1].

L'innovation conduit progressivement à substituer l'utilisation du bois massif par du bois reconstitué qui offre une stabilité dimensionnelle et une meilleure maîtrise des performances mécaniques des éléments de structure. L'utilisation de gros bois duraminisé et de qualité (exempt de nœuds) permet de produire des lames de lamellé-collé plus résistantes au fléchissement et plus rigides qu'à partir de bois de qualité moyenne, de bois juvénile ou d'aubier^[2]. Le bois juvénile se situe au cœur du bois et présente des propriétés mécaniques faibles. Indépendamment de la vitesse de croissance, le passage au bois adulte se fait progressivement. Pour le douglas, il faut environ 20 ans pour voir disparaître les caractéristiques du bois juvénile^[3]. Deux facteurs peuvent influencer sur la proportion de bois juvénile : la croissance dans le jeune âge (phase de compression) ou le diamètre d'exploitabilité (les gros bois comporteront moins de bois juvénile). A ceci s'ajoute l'importance du duramen⁷ (ou bois « parfait » durable et de meilleure qualité). Pour le douglas, un cerne prend entre 15 et 20 ans pour se duraminiser (la lignine et les tannins ferment progressivement les vaisseaux). En d'autres termes, en partant de l'écorce, le bois final apparaît entre le 15^{ème} et le 20^{ème} cerne. La production de gros bois cylindriques exempts de nœuds reste la manière la plus sûre de valoriser les résineux afin de profiter de l'effet favorable de l'âge sur la qualité du bois. Par ailleurs, les recherches récentes laissent présager un développement du lamellé-collé dont les performances peuvent encore être améliorées

⁶ Alain GIVORS, Expert forestier, communication personnelle

⁷ Mot qui vient du latin « *durare* » qui signifie durer, ce qui est particulièrement vrai pour le douglas

en utilisant des bois feuillus de qualité (frêne, hêtre, chêne, châtaignier, robinier) dans les parties tendues des poutres ou en renforcement aux jointures, voire pour l'ensemble des pièces ^[2]. Ce constat incite à diversifier les essences à produire.

Des études menées dans le Beaujolais et dans le Morvan sur des peuplements de douglas traités en régulier ont montré que couper un peuplement avant 60 ans sur sol granitique risquait, en peu de générations, d'appauvrir irrémédiablement le sol par des exportations d'éléments minéraux plus importantes que les restitutions (*figure 6*). Pour le douglas, la masse minérale est deux fois plus élevée dans 1 m³ de 25 ans que dans 1 m³ de 50 ans. La duraminisation du douglas, qui prend entre 15 et 20 ans, entraîne une migration des éléments minéraux vers le bois vivant. L'arbre subvient en partie à ses besoins d'où une diminution des prélèvements dans le sol avec la maturité de l'arbre. Par ailleurs, pour un douglas de 50 ans, la concentration en éléments minéraux est 10 fois plus importante dans les branches et l'écorce, et 40 fois plus importante dans les aiguilles que dans le tronc ^[3].

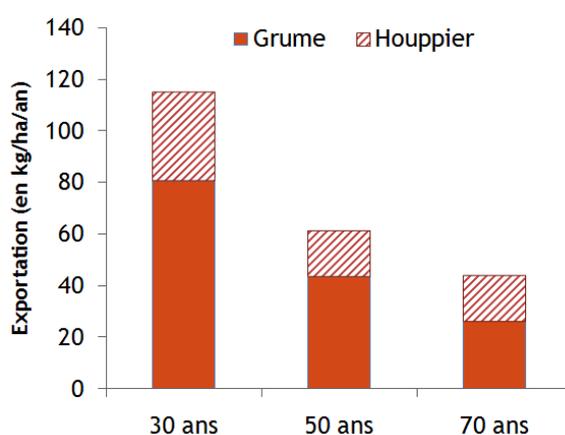


Figure 6. *Eléments minéraux prélevés sur la vie d'un peuplement de douglas pour 3 âges d'exploitation différents* ^{[4] modifié}

3. Un couvert permanent étagé et discontinu dans l'espace

3.1. Régénérer naturellement par îlots

La production de gros bois est un objectif sylvicole qui peut être poursuivi en améliorant la qualité du peuplement par des éclaircies prélevant parmi les arbres codominants et dominants de moins bonne qualité tout en favorisant les dominés de qualité. Une proportion plus importante de gros bois concourt à augmenter significativement la hauteur dominante du peuplement et facilite ainsi la régénération du fait d'une lumière plus abondante et diffuse. De plus, le douglas ou les pins produisent des graines abondantes et fertiles à partir de 40 ans ^[6] sous nos latitudes et pendant très longtemps. Le couvert permanent modifie le microclimat en diminuant l'évapotranspiration et en réduisant les variations de températures. Cet abri végétal, en maintenant une humidité atmosphérique et en régulant la température, offre des conditions favorables à la survie et au développement des semis.

La récolte au profit de la qualité et selon les diamètres d'exploitabilité sans se préoccuper de la répartition spatiale des arbres contribue à favoriser différentes situations de lumière. Cette

ouverture discontinue du couvert, dite en « peau de léopard »⁸ (comparable aux ocelles sur le pelage d'un léopard), favorise l'alternance de zones plus sombres et d'autres plus claires. Cette variation de luminosité permet le développement d'une régénération répartie par ilots et non par grandes plages. Cette luminosité limitée, couplée à une concurrence latérale, stimule la croissance en hauteur et favorise ainsi une différenciation entre les tiges de vitalité différente. D'autre part les conditions de croissance sont conditionnées par l'augmentation progressive de la lumière captée au fur et à mesure que l'arbre accède aux parties supérieures.

Cependant, le recourt à la plantation peut être nécessaire dans l'optique de diversifier le matériel génétique du peuplement ou lorsque la régénération est difficile à obtenir ou si l'envahissement du sol par une végétation herbacée ou semi-ligneuse (graminées, ronce, fougère, genêt, framboisier) crée une situation de blocage défavorable à l'installation et au développement des semis.

3.2. Pérenniser le peuplement : le passage à la futaie

Les relevés sur le réseau du CRPF de Bourgogne, les données bibliographiques [7] [8] [9] [10] et les échanges avec les praticiens, du moins pour le douglas, suggèrent une faible marge de manœuvre au niveau du matériel sur pied pour pérenniser le peuplement. A titre indicatif, les valeurs entre 23 et 27 m² par hectare avant coupe peuvent être proposées pour permettre au peuplement de perdurer. Dès que le capital sur pied dépasse un certain seuil, la croissance en diamètre des petits bois commence à ralentir. Ils sont les premiers à subir l'effet de la concurrence. Le réseau du CRPF de Bourgogne permettra d'affiner ces seuils, les accroissements par catégorie de diamètre et la dimension des houppiers pour l'évaluation du couvert.

A partir de ces différents paramètres, il est possible de modéliser l'évolution de peuplements irréguliers et de comparer différentes structures ainsi que d'évaluer le nombre de perches nécessaire (figure 7).

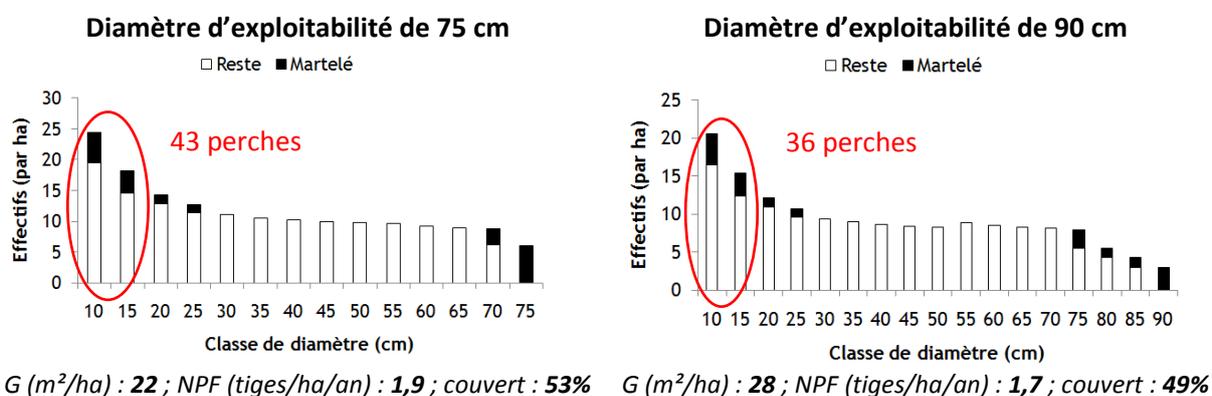


Figure 7. Exemple de peuplements irréguliers à différents diamètres d'exploitabilité.
Les catégories de perches et petits bois sont plus importantes pour permettre une sélection au forestier

La pérennisation du peuplement passe par le recrutement de perches. Le réseau AFI a montré qu'en futaie irrégulière « constituée » l'accroissement sur le diamètre est sensiblement constant quelle que soit la catégorie de diamètre. En théorie, lorsque qu'un très gros bois est récolté, il ne devrait être remplacé que par un seul petit bois. Ainsi, la courbe de distribution des bois est relativement plate.

⁸ Marc-Etienne WILHELM, Office National des Forêts, communication personnelle

Cependant, pour tenir compte des pertes (mortalité, accidents d'exploitation) et pour permettre une sélection des arbres d'avenir, il est nécessaire d'avoir un nombre de petits bois suffisants. Les chiffres énoncés proposent 2 à 5 tiges par hectare et par an. Les simulations (*figure 7*) montrent que le passage à la futaie doit être d'autant plus élevé que le diamètre d'exploitabilité est faible. Ces observations tendent à confirmer qu'un traitement irrégulier avec un passage à la futaie raisonnable n'est envisageable qu'avec un diamètre d'exploitabilité relativement élevé. Un diamètre d'exploitabilité élevé permet donc de réduire le nombre de perches nécessaire dans le peuplement. A titre indicatif, les valeurs seuils comprises entre 50 et 60 % de couvert cumulé ainsi que 75 % de la surface terrière répartie en gros et très gros bois peuvent être proposées. Les gros bois représenteraient ainsi 1 tige sur 2 dans le peuplement. Seule une proportion de gros bois suffisante permet de disposer d'un capital important tout en permettant d'assurer le renouvellement continu du peuplement. Dans ces conditions, il suffit d'un passage à la futaie de deux tiges par hectare et par an à partir d'un stock d'une quarantaine de perches par hectare.

3.3. Travaux économes pour produire des bois de qualité

Education par le couvert (effet du peuplement sur les jeunes tiges en sous-étage)

Le couvert discontinu intercepte une partie de l'éclairement favorisant différentes situations de lumière. Le mélange d'essences, en améliorant l'étagement conditionné par des hauteurs variées et des houppiers plus ou moins perméables selon les essences, favorise un meilleur filtrage de la lumière (*figure 8*). Chaque essence possède une tolérance à l'ombrage différente. Selon un certain seuil d'éclairement, variable en fonction des essences, l'arbre sera plus ou moins vigoureux voire, en dessous d'un certain seuil, s'étiolera et mourra. Sous couvert, une lumière tamisée stimule la croissance en hauteur des jeunes arbres, désavantage la croissance en diamètre et réduit le nombre et la dimension des branches. Ces conditions contribuent à contenir le développement du bois juvénile (cf. partie II.2.2.) et ainsi à en réduire la proportion dans le bois final. Cette approche est d'autant plus intéressante que des travaux récents remettent en question une partie de l'effet de l'élagage pratiqué sur des branches vivantes sur l'accélération de la transition de formation de bois juvénile en bois mature^[11].



Figure 8. Education par le couvert du peuplement : la pénombre, en favorisant des branches très fines en jeunesse, permet la formation de bois d'excellente qualité plus tard.

« Qualification » des jeunes tiges par la concurrence (phase de compression)

La formation d'une bille de pied de qualité est possible par la compression latérale ininterrompue exercée par la concurrence qu'exercent entre elles les jeunes tiges. Ce collectif, ainsi constitué, favorise la croissance en hauteur et limite le développement des branches. Cette compétition s'accompagne d'une réduction de la lumière au niveau des branches les plus basses. Privées de lumière, ces branches finissent par sécher et peuvent plus facilement tomber. Cette phase de compression, favorable à un élagage naturel, est appelée « qualification ». Une tige d'une essence donnée ne peut être qualifiée que par une essence au moins aussi tolérante qu'elle à l'ombrage. Il en résulte que la qualification s'améliore avec le mélange d'essences. C'est ainsi que le douglas peut être qualifié par un douglas mais également par le sapin pectiné qui tolère mieux l'ombrage (cf. partie III.3.2.). Ou encore, le chêne qualifie les pins, essences peu tolérantes à l'ombrage.

3.4. Favoriser le mélange des essences...

Le mélange d'essences permet non seulement de diversifier les revenus du propriétaire et de mieux s'adapter aux fluctuations du marché mais apportent aussi de nombreux effets sylvicoles bénéfiques au peuplement.

... contribue à l'étagement du peuplement et facilite l'installation des semis

La régénération naturelle dans un peuplement mélangé est plus facile à obtenir et mieux assurée. Pour le douglas, la régénération est facilitée sur les pentes, les croupes et les sols acides. En revanche, en bas de pente, sur les stations riches ou de fond de vallon, la régénération est plus difficile à obtenir. En fonction de ces conditions de station, l'intensité lumineuse conditionne l'envahissement du sol par une végétation herbacée ou semi-ligneuse (graminées, ronce, fougère, genêt, framboisier) défavorable à l'installation et au développement des semis ^[5] ^[6] ^[13] pouvant entraîner des situations de blocage. L'étagement, conditionné par des hauteurs variées et des houppiers plus ou moins perméables selon les essences, filtre la lumière créant ainsi des conditions lumineuses défavorables aux espèces héliophiles (graminées en particulier). Cependant, certaines espèces envahissantes comme la ronce arrivent à se développer malgré un faible éclairage ^[8]. La présence d'un mélange et d'un sous-étage feuillu, en créant des conditions de lumière variées, limite la vigueur de la ronce et permet ainsi le développement des semis.



Figure 9. La présence de feuillus contribue à l'amélioration de l'étagement du peuplement favorisant ainsi le développement de la régénération.

La réceptivité du sol, facteur essentiel dans le processus du développement de la régénération naturelle, influe directement sur la suite ou l'arrêt du processus de la germination de la graine. A titre d'exemple, la callune et la myrtille inhibent la germination et la croissance des semis de douglas. Les semis de pins n'apparaissent que sur les litières peu épaisses ou plus facilement sur le sol décapé ou brassé volontairement ou non (crochetage, exploitation du bois, retournement par les sangliers). En effet, les semis de pins s'installent facilement sous le bouleau ou le chêne. L'impact de la litière de ces essences est localisé à l'endroit où les arbres se situent. A proportion équivalente, il faut privilégier un mélange par pied d'arbres ou par bouquet ^[9]. Le mélange d'essences, en stimulant l'activité de la faune du sol, améliore la réceptivité de la couche humifère ^{[16] [11]}. Ce n'est pas tant la diversité au sein du mélange qui est à rechercher mais plutôt de favoriser les essences dont la vitesse de décomposition de la litière est rapide (charme, bouleau, saule, merisier, sorbier) ^{[9] [12] [13]}.

... contribue à une meilleure utilisation des ressources du sol

La ressource en eau constitue un des facteurs déterminants de l'adaptation des peuplements forestiers à la modification du climat. Chaque essence possède des caractéristiques racinaires qui lui sont propres et qui influent directement sur la capacité de colonisation du sol et par conséquent sur l'utilisation de la ressource en eau. Par ailleurs, certaines essences, comme le douglas, ont la capacité de s'entraider en mettant en commun leurs racines : on parle d'anastomose racinaire (*figure 10*). En saison de végétation, le douglas peut consommer jusqu'à 50 m³ d'eau par hectare et par jour. Pour faire face à des fortes chaleurs, il sollicite l'eau stockée dans ses tissus. Cependant, cette grande consommation d'eau, à laquelle s'ajoute une régulation tardive de la transpiration, peut conduire l'arbre, dans le cas de sécheresses exceptionnelles, à un état de déshydratation tel qu'il peut s'accompagner d'altérations physiques graves.



Figure 10. Anastomose : les connexions racinaires avec les arbres voisins permettent à cette souche de douglas de survivre et cicatriser.

Le sol se comporte comme une éponge. Selon ses caractéristiques (texture et teneur en pierre), il constitue une réserve plus ou moins importante d'eau pour les besoins de l'arbre. Cette réserve est réalimentée par la pluie. On estime que le douglas est hors station optimale lorsque celle-ci est inférieure à 250 mm pour les mois de juin, juillet et août cumulés ^[4]. L'éclaircie est l'un des seuls actes sylvicoles par lequel le forestier peut améliorer la recharge en eau du sol, limiter l'interception des pluies et réduire la « masse foliaire évapotranspirante ». Par ailleurs, la recharge en eau du sol s'améliore également par la mixité des peuplements (*figure 11*). Face à la sécheresse, chaque essence répond différemment. Le bouleau s'arrête rapidement de transpirer alors que le chêne peut

aller chercher l'eau profondément ^[20]. Une situation défavorable pour une espèce peut ainsi être compensée par les caractères et les modes de réaction des autres essences. Cette complémentarité entre essences améliore l'adaptation des peuplements face à des contraintes climatiques changeantes.

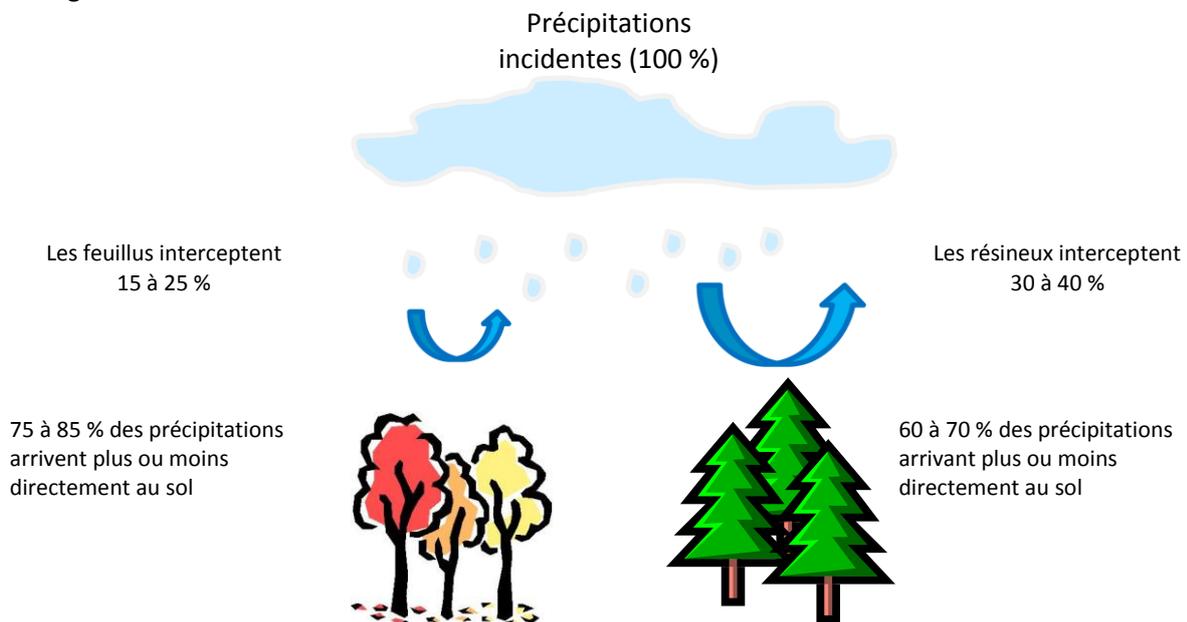


Figure 11. Incidence du mélange résineux-feuillus sur l'alimentation en eau du sol ^{[3] modifié}

La plupart des espèces ont des caractéristiques différentes au niveau de l'architecture de leur système racinaire ou par rapport à leur besoins en nutriments ^{[21] [22]}. Selon les essences, ces caractéristiques peuvent être complémentaires. Ainsi, le sol peut être assimilé à un « réfrigérateur » où chaque essence exploite un compartiment. Cette complémentarité par rapport à l'exploitation des ressources profite aux deux essences et se traduit par un accroissement en surface terrière significatif. A titre d'exemple, la productivité du mélange chêne sessile – pin sylvestre est supérieure à celle d'un peuplement pur ^[23].



Figure 12. En traitement irrégulier résineux, le mélange avec du feuillus contribue à l'étagement et facilite le dosage de la lumière, crée un microclimat favorable au développement de la régénération et améliore la redistribution en eau du sol en cas de sécheresse.

III. La mise en œuvre pratique

1. La coupe jardinatoire

1.1. Atteindre ou maintenir un capital sur pied optimal

Le bon fonctionnement d'un peuplement dépend directement de la gestion de l'éclairement, facteur clé dans l'acquisition de la régénération et l'obtention de perches. Trop sombre, la régénération ne peut apparaître. En revanche, un trop fort éclairement favorise soit une régénération sur de très grandes plages soit la prolifération de la végétation herbacée et semi-ligneuse bloquant l'installation des semis.

La surface terrière, mesure facilement réalisable sur le terrain à l'aide d'appareil simple, traduit en partie cette notion d'éclairement. Elle correspond à la surface de la section horizontale des arbres à 1,30 m et s'exprime en mètre carré par hectare. Elle constitue l'un des facteurs à observer dans le dosage de la lumière et, à titre indicatif, avant coupe, les valeurs suivantes peuvent être proposées :

- douglas : entre 23 et 27 m²/ha
- pin sylvestre associé au chêne : entre 14 et 18 m²/ha

A partir de ces valeurs, le volume bois d'œuvre à l'hectare peut être approché. Pour le douglas, il faut multiplier la surface terrière par un tiers de la hauteur totale dominante.



Figure 13. L'allongement de la pousse terminale permet de quantifier la lumière.
La lumière est suffisante si l'allongement de la pousse terminale (A)
est plus grand que l'allongement des pousses du premier verticille (B)^[14]

Ces seuils peuvent être affinés sur le terrain par l'observation du développement de la végétation (tableau 1) : allongement (figure 13) et répartition des semis, colonisation des herbacées et des semi-ligneux. Le renouvellement du peuplement est assuré par des tiges performantes, dominantes à croissance soutenue. A titre indicatif, dans le cas du pin, un allongement inférieur à 30 cm compromet son bon développement et la possibilité de constituer un futur arbre du peuplement^[24]. Pour le douglas, ce seuil est de 20 cm.

Tableau 1 : Evaluation du niveau de matériel sur pied en résineux par des observations de terrain^[14]

Niveau de matériel sur pied	Elancement des semis	Répartition du semis	Présence d'herbacées et de semi-ligneux
Trop faible	Semis en général moyennement différenciés	Semis sur de très grandes plages	Végétation envahissante, dense et haute
Optimum	Semis en général élancés et différenciés, à allongement de la pousse apicale plus grand que l'allongement des pousses du premier verticille	Semis par îlots de 50 à 1000 m ²	Végétation bien présente mais pas en excès et basse
Trop élevé	Semis en général peu élancés, peu différenciés, à allongement de la pousse apicale équivalent ou plus petit que l'allongement des pousses du premier verticille	Semis épars	Végétation absente

1.2. Définir un prélèvement et une fréquence de passage

La production du peuplement sert de référence. L'accroissement qu'il est possible de récolter sans nuire au capital et sans compromettre la pérennité du peuplement guide le prélèvement et la fréquence de passage en martelage. Le prélèvement ne peut excéder plus de 20 % de la surface terrière du peuplement au risque de le déstabiliser et d'entamer le capital⁹. Ce seuil maximal permet également de constituer un volume de bois susceptible d'intéresser un acheteur.

Le contrôle de la production peut être assuré soit par comparaison d'inventaires pied à pied soit par placettes permanentes. A défaut, l'accroissement des peuplements résineux peut être estimé à 3 % par an de la surface terrière du peuplement avant martelage^[7].

Si le volume par hectare est très important et est alimenté par un accroissement annuel par hectare élevé, il est nécessaire de se fixer une rotation courte de l'ordre de 3 à 4 ans pour maintenir l'effort de prélèvement sans prélever plus de 20 % de la surface terrière du peuplement avant martelage. A l'opposé, si le volume par hectare du peuplement est faible, les prélèvements seront modérés et les rotations seront longues, de l'ordre de 7 à 8 ans.

1.3. Choisir les arbres à marteler

Le martelage des coupes s'organise d'après les stades de développement des arbres (cf. partie III.3.2.) et leur imbrication.

Perches et petits bois

L'objectif recherché est la future production de bois d'œuvre de qualité, c'est-à-dire la recherche d'une bille de pied exempte de nœud, élaguée. Pour favoriser l'élagage naturel, il s'agit de maintenir une compression latérale afin de favoriser la formation de petites branches fines qui ne peuvent se développer et sèchent donc rapidement.

⁹ François LEFORESTIER, Expert forestier, communication personnelle

L'éclaircie « par le haut » est pratiquée, une fois la hauteur de bille de pied souhaitée atteinte (cf. partie III.3.2.) afin d'aérer le houppier et lui donner toute la place dont il a besoin pour se développer et maintenir les branches vivantes.

Bois moyens, gros bois

Plus un arbre grossit, plus sa valeur au mètre cube est élevée et plus sa croissance en volume est forte. La conjonction de ces deux caractéristiques génère un gain financier plus important pour les gros bois que pour les catégories inférieures. Même des tiges de qualité moyenne ou médiocre méritent parfois de grossir. C'est la qualité qui doit guider le choix sylvicole. Un arbre ne doit être enlevé seulement s'il en gêne un meilleur que lui.

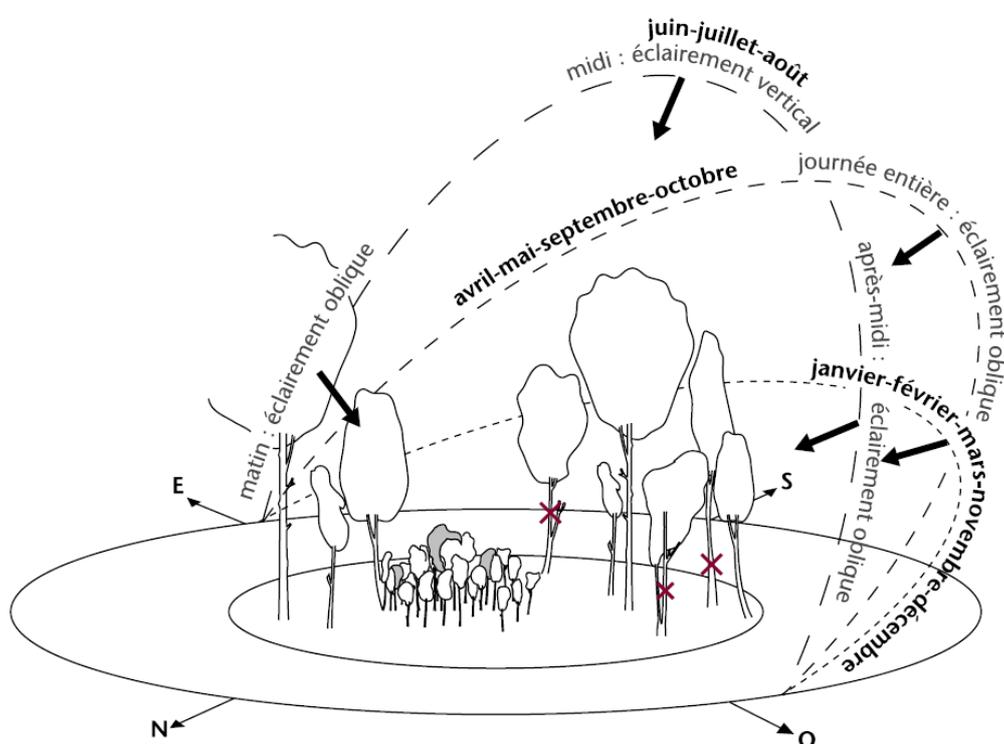


Figure 14. Marquage du sous-étage (perches, brins de taillis) et de la futaie en fonction de l'éclaircie qui provient majoritairement du sud sous nos latitudes ^[14].

Le diamètre d'exploitabilité de l'arbre est fixé en fonction de l'essence et surtout de la qualité (cf. partie II.2.) La régénération n'est pas une fin en soi. Elle est une résultante de la récolte, de l'amélioration des bois et de la gestion du couvert qui régulent l'éclaircie. Un arbre de bonne qualité ne doit pas être récolté avant son terme au profit de la régénération. Ce n'est pas la lumière directe qui est à rechercher mais plutôt la lumière diffuse qui est à privilégier afin de permettre au semis de bénéficier d'une période plus longue de lumière (figure 14).

2. Concilier exploitation et mécanisation

En traitement irrégulier, les coupes sont fréquentes mais légères. Les rotations seront d'autant plus courtes que le peuplement sera à décapitaliser et que l'accroissement sera important (cf. partie III.1.2.). La mécanisation de l'exploitation et les rotations courtes conduisent à un passage plus fréquent de matériels lourds susceptibles, en l'absence de précautions, de tasser les sols dans les peuplements. Ces tassements du sol, préjudiciable au système racinaire, ont de multiples conséquences sur la régénération forestière (germination et croissance des semis), la productivité des peuplements (notamment réduction de la croissance en diamètre), la stabilité des arbres et la biodiversité floristique ^[15] ^[16]. Seules quelques essences comme le sapin pectiné, le pin sylvestre, l'aulne glutineux ou le tremble, sont capables de prospector des horizons relativement tassés et de participer au rétablissement de la structure des sols ^[15]. Le mélange d'essences permet ainsi d'atténuer la déstructuration des sols.

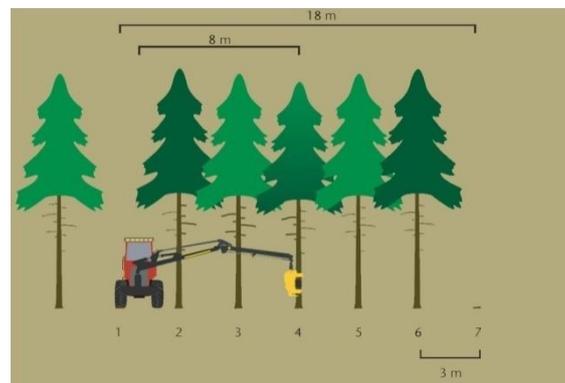


Figure 15. Réalisation d'un cloisonnement en vue d'une exploitation mécanisée.

Plantation résineuse avec un écartement entre les lignes de 3 m.

Dans l'optique d'irrégulariser le peuplement et de maintenir les bois à environ 8 mètres de la machine, il faut supprimer une ligne sur six. Les entres-axes sont de 18 mètres et la surface parcourue de 33 %. Dans le cas d'entre-axes de 15 mètres, soit une ligne sur cinq, la surface parcourue atteint 40 % ^[16] modifié.

Lors de chantiers d'exploitation, le passage d'engins provoque non seulement une compaction du sol dans les premiers horizons mais également en profondeur. Des études montrent que le premier passage d'engin induit 60 à 80 % du tassement du sol ^[16]. La mise en place de cloisonnement (figure 15) permet de réduire la surface parcourue par les engins d'exploitation en concentrant leur effet sur certaines zones et de préserver ainsi un maximum de surface ^[17]. Leur installation conditionne de manière durable les exploitations futures.



Figure 16. Matérialisation des cloisonnements à la peinture

Le traitement irrégulier, en orientant la production vers les gros bois, induit une exploitation des grumes en grandes longueurs (jusqu'à 18 m) et augmente le risque de frottement sur les arbres voisins de la piste de débardage. S'il ne peut être possible de toutes les éviter, il est préférable de concentrer les blessures sur quelques arbres au bord du cloisonnement que de déprécier l'ensemble du peuplement. Le marquage, en alternant la couleur de peinture, permettra de maintenir les cloisonnements visibles sans confusion possible notamment lorsque les peuplements ont un sous étage particulièrement important comme la ronce (*figure 16*).



Figure 17. Abattage mécanisé d'une coupe jardinatoire

En plus de préserver le sol et le peuplement, une exploitation soignée permet de préserver les collectifs de semis, les perches et petits bois d'avenir qui assurent la pérennité du peuplement. L'abattage mécanisé (*figure 17*) permet non seulement de diriger la chute des arbres, préservant ainsi par exemple une perche d'avenir, mais également de démembrer le houppier sur le cloisonnement. Le « tapis » de rémanents ainsi constitué limite l'impact du passage des engins. A partir d'un certain diamètre, l'abattage devient difficilement mécanisable du fait de l'empatement des arbres. Le passage anticipé d'un bûcheron permet d'égobeler les arbres, les rendant ainsi accessibles à l'abatteuse, et améliore la productivité de la machine ainsi que la présentation des grumes¹⁰.

Tous les modes de ventes sont possibles comme la vente de bois sur pied ou la vente de bois abattus et débardés mais le système de prévente apparaît comme une alternative intéressante permettant une meilleure maîtrise du suivi des coupes¹¹. Un contrat de vente prévoyant des clauses assez strictes peut être établi dans le cas particulier de coupes jardinatoires, pour limiter les dégâts, notamment à la régénération sous couvert. Ces contrats¹² visent notamment le respect :

- des cloisonnements pour limiter le tassement et les dégâts de la régénération
- du débardage dans un délai minimum pour permettre à certains semis couchés par l'abattage de se redresser
- d'un type de matériel adapté
- des modalités d'abattage
- des clauses particulières pour l'exploitation lors de la présence d'une régénération naturelle ou artificielle sous le couvert du peuplement (*figure 18*)

¹⁰ Laurent BACHELIN, Entrepreneur forestier, communication personnelle

¹¹ Claude COURVOISIER, Société Forestière de la CDC, communication personnelle

¹² Christophe PANKERT, Cantonnement de Bullange, Wallonie, journée CoForKo du 13 septembre 2011

Clauses spéciales pour la vente de bois dans des peuplements Pro Silva (en complément des clauses générales et particulières du cahier des charges)

L'objectif de ces clauses spéciales est d'éviter au maximum des dégâts tant aux arbres réservés, à la régénération naturelle ou artificielle en sous-étage qu'au sol forestier sur et en dehors des layons de débardage.

Méthode

Pour répondre au mieux à cet objectif, le vendeur a fait appel à la concurrence auprès de plusieurs exploitants forestiers qu'il a préalablement sélectionnés. Le résultat des remises de prix désigne la société pour l'abattage, l'ébranchage et le débardage des bois au prix de €/m³ + TVA.

Remarque : Le montant total que l'adjudicataire devra payer à l'exploitant pour régler les frais d'exploitation se calcule de la façon suivante : (..... €/m³ + TVA) x le volume indiqué au catalogue pour ce lot.

N.B. : l'adjudicataire devra payer ce montant à l'exploitant dans le mois qui suit la date du procès-verbal relatif à la décharge d'exploitation. La caution bancaire exigée de l'adjudicataire ne sera libérée qu'après fourniture de la preuve de paiement.

L'adjudicataire s'engage par le fait de son offre à utiliser exclusivement les services de

cette société pour abattre, débusquer, ébrancher et débarder les bois de ce lot au prix fixé ci-dessus et d'accepter toutes les conditions de vente et d'exploitation décrites pour ce lot.

Adjudicataire et exploitant s'engagent à respecter scrupuleusement les conditions du présent marché, les conditions du cahier des charges et les instructions écrites et verbales du service forestier.

L'adjudicataire accorde à l'exploitant un délai de 2 mois pour commencer l'exploitation du lot. Le délai d'exploitation estimé par l'exploitant pour ce lot est de jours ouvrables environ (sans tenir compte des interruptions de l'exploitation pour des raisons climatiques défavorables ou autres ordonnées par le service forestier).

Abattage

Les travaux d'abattage s'effectueront selon les consignes du service forestier qui aura notamment la faculté de déterminer la direction de la chute des bois. L'abattage, l'ébranchage et le débardage des bois se feront de manière simultanée : chaque bois abattu et ébranché devra être immédiatement évacué de la coupe via les layons de débardage. Avant débusquage, chaque arbre devra être préalablement ébranché de manière à

rassembler au maximum les branches sur les layons de débardage.

Débardage

Aucune machine récolteuse, ébrancheuse ou débardeuse n'est autorisée en dehors des layons. Toute machine doit être équipée de pneus larges à basse pression. Sur les sols secs, les machines disposeront de roues d'une largeur d'au moins 600 mm. Sur les sols humides, les roues devront avoir une largeur minimale de 700 mm et (selon les conditions climatiques et topographiques) être équipés de trackeurs. Des engins chenillés sont également acceptés pour autant qu'ils disposent d'une largeur de chenilles d'au moins 600 mm.

Dans le cas de l'utilisation de débardeuses ou porteurs du type « forwarder », les engins devront posséder 6 roues pour les déplacements sur terrains secs et 8 roues sur des sols humides (et équipement avec trackeurs ruban « bogie », voir photo).

Les bois seront recoupés en tronçons de 20 m (maximum) avant débusquage. Dans le cas d'une exploitation de bois longs, ceux-ci seront câblés ou débusqués avec l'aide d'une grue (montée sur récolteuse ou porteur) à partir des layons de débardage. Pour le câblage, l'utilisation de chevalets est

obligatoire (voir photo). Ceux-ci seront mis à la disposition de l'exploitant par l'administration venderesse.

Garanties

Caution bancaire

Sur demande du Receveur des Domaines, l'exploitant déposera une caution bancaire qui correspond à au moins 2500,- euros et au maximum à 35 % du montant total des travaux d'exploitation soumissionnés. Cette caution est destinée à servir de garantie à la réparation de dommages causés lors de l'exploitation à la forêt ou qui n'auraient pas été spontanément réparés par l'adjudicataire à la satisfaction du service forestier.

Exclusion de la coupe

Le service forestier pourra exclure du parterre de la coupe toute personne ou engin, si la qualité de travail n'est pas satisfaisante ou si l'équipement technique des machines ne correspond pas aux critères exigés.

Pour éviter tout malentendu, l'exploitant mentionnera dans sa soumission le type des machines utilisées, l'équipement des engins (largeur de pneus, équipement avec trackeurs, treuil, pince...) et la ou les techniques d'exploitation appliquées pour répondre aux exigences mentionnées ci-dessus.

Figure 18. Matérialisation des cloisonnements à la peinture

(d'après Pankert, Cantonnement de Bullange, Wallonie, tournée forestière du projet CoForKo 2011)

3. Les soins culturaux : accompagner la dynamique naturelle par la main du forestier

3.1. Diagnostic de la dynamique naturelle

L'éclaircissement et la sylviculture qui permet d'en assurer la gestion jouent un rôle primordial dans la différenciation de la régénération et l'obtention de 2 à 5 petits bois par hectare et par an en moyenne (cf. partie II.3.2.). Cependant, selon la vigueur des essences et des objectifs fixés, le forestier peut être amené à accompagner la dynamique naturelle afin d'assurer l'obtention et le maintien d'un stock suffisant de perches et de gérer le mélange d'essences. Lors du martelage les plus belles tiges (celle qui ne faut absolument pas abimer à l'abattage) sont repérées à la peinture sans souci de répartition spatiale et de densité. Le choix des options (arbres de qualité et de vigueur supérieures qui pourraient potentiellement participer au peuplement futur), s'effectue 2 à 3 ans après la coupe, où l'état et la dynamique de la régénération ont permis la cicatrisation de la « casse » liée à l'exploitation.

Une méthode simple de diagnostic consiste, muni d'un compteur multiple (selon les essences) et d'une bombe de peinture, à emprunter les cloisonnements espacés de 15 à 18 mètres et d'examiner les tiges performantes et bien conformées dans lesquelles seront choisies les options en suivant un raisonnement du type de celui qui est résumé dans la clé suivante (figure 19) :

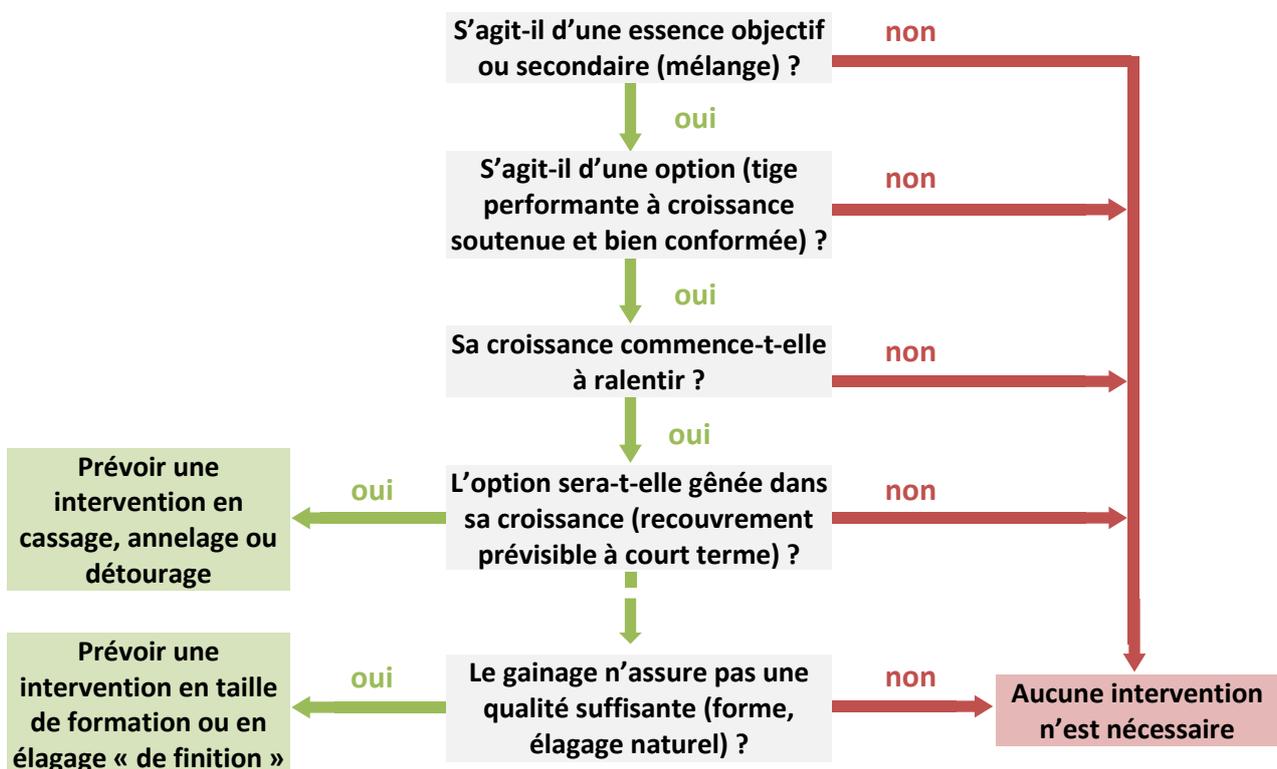
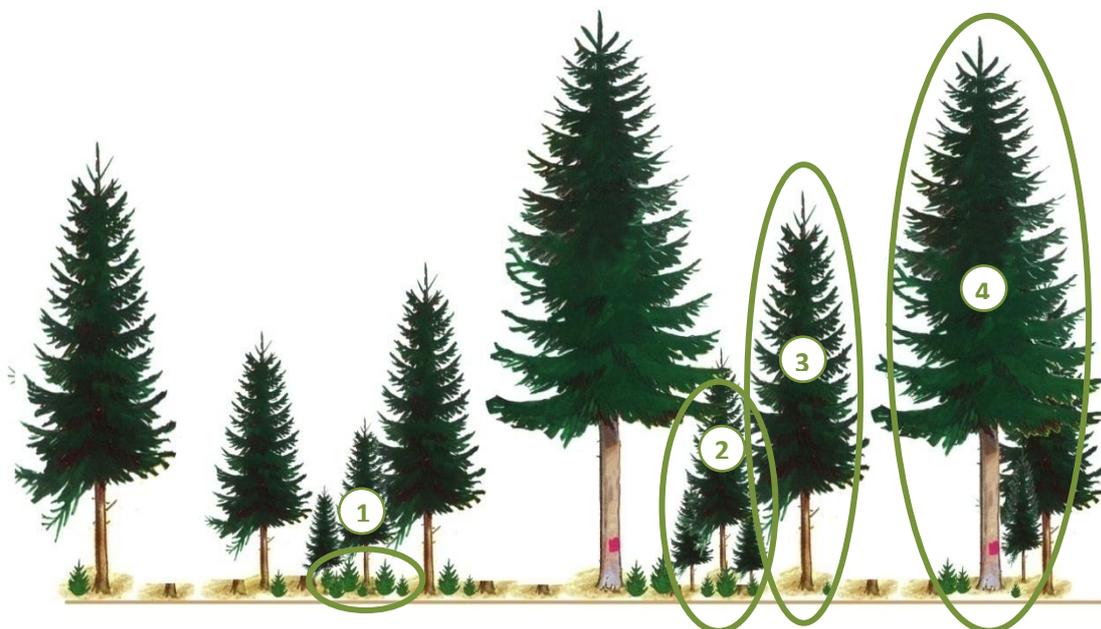


Figure 19. Questions à se poser à chaque tige performante examinée pour juger si une intervention est nécessaire ou non¹³.

¹³ François MOYSES, Animateur sylvicole et formateur, communication personnelle

3.2. Des interventions ciblées à adapter selon le stade de développement de l'arbre

La vie d'un arbre peut être schématisée en quatre stades : l'installation, la compression-qualification, l'expansion-grossissement et la récolte (figure 20) :



①	②	③	④
Phase d'installation constitution	Phase de compression qualification	Phase d'expansion grossissement	Phase de maturation, exploitation et renouvellement
Semis	Semis...Fourré...Gaule...Perche	Perche.....Bois moyens	Bois moyens.....Très gros bois
Stratégie d'installation	Stratégie de croissance maximale annuelle en hauteur	Stratégies d'expansion latérale sur branches maîtresses et prise de diamètre du tronc	Stratégies de croissance maximale et de renouvellement
Acquisition du mélange	Compression latérale interrompue exercée par les jeunes tiges : différenciation entre les tiges de vitalité différente et rapidité de la formation de la bille de pied	Expansion continue et régulière des branches maîtresses, aucun retour de la compression sur les tiges désignées	Atteinte du diamètre d'exploitabilité, exploitation, renouvellement ponctuel

Figure 20. Schématisation du développement d'un arbre ^[18] modifié.

Stade fourré, gaule, perche

De nombreuses observations de terrain ^[19], surtout dans le cas des semis sous couvert, ont montré qu'il n'était pas nécessaire de réaliser des dépressages et des dégagements en plein pour que les jeunes arbres se différencient. Dans un collectif de semis sous couvert d'un peuplement, certains individus dominent d'eux-mêmes et d'autres régressent pour ensuite disparaître naturellement.

Chaque essence possède des caractéristiques compétitives différentes et des dynamiques de croissance qui lui sont propres (figure 21).

Alisier blanc	3 à 4	2	Pas de donnée
Alisier torminal	3 à 4	2	3
Aulne	3	4	2
Bouleau verruqueux	1 à 2	5	1 à 2
Charme	5	3	4
Châtaignier	5	4 à 5	4
Chêne pédonculé	2 à 3	3	1
Chêne sessile	3	2	2
Cormier	2	2	1
Douglas	3	3 à 4	2 à 3
Épicéa commun	4	4	3
Érable champêtre	3	3	3
Érable plane	3	4	3
Érable sycomore	3	4	3
Frêne	2	4 à 5	2
Hêtre	5	3	5
Mélèze d'Europe	1	4	1
Merisier	3	4	2
Noisetier	4	3 à 4	4
Pin noir	2	3 à 4	2
Pin sylvestre	2	3	2
Sapin pectiné	5	3	5
Tilleul	4	3	3
Tremble	1 à 2	5	1 à 2

■ Pouvoir ombrageant

= pouvoir concurrentiel :

note de 1 (peu ombrageant) à 5 (très ombrageant) correspond à l'ampleur et l'imperméabilité du houppier à la lumière.

■ Dynamique de croissance :

note de 1 (peu dynamique) à 5 (très dynamique) il s'agit de la vigueur juvénile dans les stations qui conviennent et en relatif par rapport aux autres essences représentées.

■ Tolérance à la concurrence :

note de 1 (peu tolérant, essence de lumière stricte) à 5 (très tolérant, essence d'ombre) c'est aussi le potentiel de croissance dans un environnement concurrentiel, notamment sous couvert*.

Figure 21. Eléments de synécologie pour les principales essences forestières au stade juvénile ^[20].

Des interventions anticipatives légères et ciblées sont parfois nécessaires pour accompagner, voire stimuler, cette dynamique naturelle de différenciation sociale (figures 22, 23 et 24). Elles consistent principalement à casser ou anneler les tiges concurrençant les options. Le cassage se pratique de juillet à août sur les tiges n'excédant pas 4 à 5 cm de diamètre. Pour les tiges devenues résistantes, le cassage est facilité par un trait de scie préalable au niveau où l'on cherche à apporter de la lumière et arrêter le gainage. L'annelage s'effectue, quant à lui, sur les tiges de plus de 5 cm de diamètre et se pratique toute l'année. Cette opération vise à apporter progressivement et en douceur de l'espace et surtout de la lumière à l'option.

Des travaux de taille de formation peuvent compléter ces interventions mais ils doivent rester l'exception.



Figure 22. Travaux ciblés anticipatifs pour accompagner la dynamique naturelle de différenciation. Le cassage.

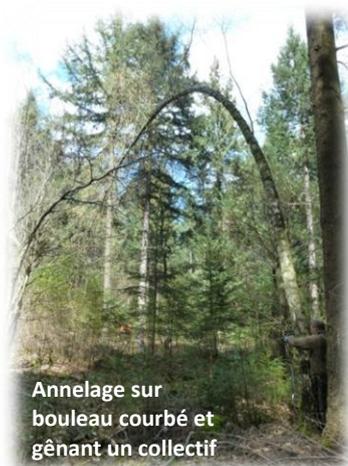


Figure 23. Travaux ciblés anticipatifs pour accompagner la dynamique naturelle de différenciation. L'annelage, à la chaîne à anneler, apporte progressivement et en douceur, de l'espace et surtout de l'énergie lumineuse.



Figure 24. Taille de formation réalisée pour corriger la qualification défectueuse. Les arbres, dont la croissance en hauteur est stimulée, plient facilement.

Stade perche, petit bois

L'objectif recherché est l'obtention d'une longueur minimum de bille de pied sans nœud. La stratégie vise à libérer le houppier en éliminant la concurrence sur son pourtour dès que la hauteur de bille de pied est atteinte. La longueur optimale des houppiers à branches vivantes pour les pins et le douglas ne devrait pas être inférieure à la moitié de la hauteur totale. Plus l'arbre est jeune meilleure est sa réaction. En revanche, le pin sylvestre atteint son maximum d'accroissement très tôt et au-delà d'un certain âge, il n'a plus la capacité à réoccuper l'espace après éclaircie. Il convient, surtout sur station de faible fertilité, de ne pas rater cette phase optimale de réactivité (*figure 25*) au risque de ne jamais atteindre les diamètres objectif ou d'en reporter très sensiblement les délais d'obtention. Cette phase équivaut à une hauteur de 6-7 m de hauteur élaguée soit une intervention à 12-14 m de hauteur. Pour le douglas, rien ne s'oppose à une intervention plus tardive du fait de sa capacité à refaire des branches juvéniles¹⁴.

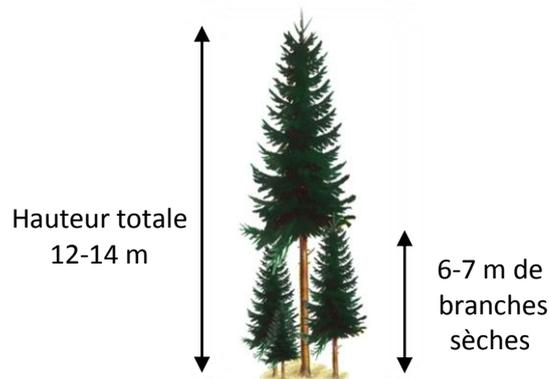


Figure 25. Compression forte par les dominés

L'élagage naturel des branches résulte de la compétition latérale entre les arbres à laquelle s'ajoute une réduction de l'intensité lumineuse au niveau des branches basses. Ces branches, privées de lumière, sèchent et finissent par tomber sous l'effet du vent, de la neige ou des éclaircies. Ce n'est que lorsque les branches basses ont été éliminées que l'arbre produit un bois sans nœud. L'élagage naturel peut être complété par un élagage artificiel de « finition » (*figure 26*).



Figure 26. Elagage artificiel de « finition ».

¹⁴ Marc-Etienne WILHELM, Office National des Forêts, communication personnelle

IV. Synthèse : comment passer d'une plantation à une futaie irrégulière ?

4.1. Cas des peuplements de douglas

Les grands principes

L'objectif n'est plus de couper à blanc le peuplement à 45 ou 50 ans mais de le prolonger jusqu'à 80 ans et plus en concentrant la production sur des gros bois de bonne qualité. L'étalement de la récolte passe par des techniques d'amélioration du peuplement et permet l'utilisation des semis naturels qui s'installent plus facilement dans ces conditions. La régénération sous couvert est en effet plus facile lorsque le peuplement comporte une proportion plus importante de gros bois, avec une hauteur totale plus importante. Le rendement financier est le même pour les deux méthodes, mais le fait de retarder l'âge d'exploitation permet de prolonger la période de revenus (*figure 27*). Dans le scénario coupe progressive, après la 14^{ème} éclaircie (E14), il reste environ 400 m³ sur pied d'une valeur estimée à 28 000 € alors que dans le scénario coupe rase, on réinvestit dans une plantation.

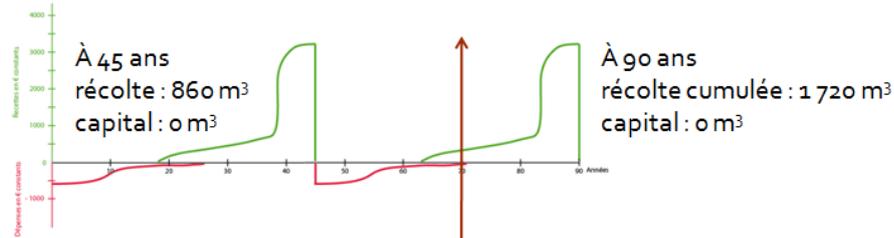
Scénario coupe rase à 45 ans				Scénario coupe progressive			
Opérations	Dépenses (€)	Revenus éclaircie (€)	Observations	Opérations	Dépenses (€)	Revenus éclaircie (€)	Observations
Installation + dégagements	3 500			Installation + dégagements	3 500		
E1 (20 ans) + élagage	600	300	60 stères x 5 € 100 tiges x 6 €	E1 (20 ans) + élagage	600	300	60 stères x 5 € 100 tiges x 6 €
E2 (26 ans)		1 600	80 m ³ x 20 €	E2 (26 ans)		1 600	80 m ³ x 20 €
E3 (32 ans)		2 400	80 m ³ x 30 €	E3 (32 ans)		2 400	80 m ³ x 30 €
E4 (38 ans)		3 200	80 m ³ x 40 €	E4 (38 ans)		3 200	80 m ³ x 40 €
CF (45 ans)		27 500	550 m ³ x 50 €	E5 (45 ans)		4 500	90 m ³ x 50 €
Installation + dégagements	3 500			E6 (50 ans)		4 500	90 m ³ x 50 €
				E7 (55 ans)		4 500	90 m ³ x 50 €
				E8 (60 ans)	500	5 400	90 m ³ x 60 €
				E9 (65 ans)	500	5 400	90 m ³ x 60 €
E1 (20 ans) + élagage	600	300	60 st x 5 € 100 tiges x 6 €	E10 (70 ans)	500	5 400	90 m ³ x 60 €
E2 (26 ans)		1 600	80 m ³ x 20 €	E11 (75 ans)	500	6 300	90 m ³ x 70 €
E3 (32 ans)		2 400	80 m ³ x 30 €	E12 (80 ans)	500	6 300	90 m ³ x 70 €
E4 (38 ans)		3 200	80 m ³ x 40 €	E13 (85 ans)	500	6 300	90 m ³ x 70 €
CF (45 ans)		27 500	550 m ³ x 50 €	E14 (90 ans)	500	6 300	90 m ³ x 70 €
TOTAL		61 800				54 800	
						+ 28 000	400 m ³ x 70 €

Figure 27. Comparaison du rendement financier d'une plantation de douglas que l'on coupe à blanc à 45 ans ou que l'on continue à éclaircir.

Il faut de 35 à 40 ans à un douglas pour atteindre 1 m³ mais chaque m³ supplémentaire s'acquiert en moins de 10 ans et ce jusqu'à 100 ans. Cet accroissement, d'environ 16 m³/ha/an, permet, en moins de 30 ans, de générer un revenu équivalent à celui d'une coupe rase tout en maintenant le capital producteur du peuplement (*figure 28*).

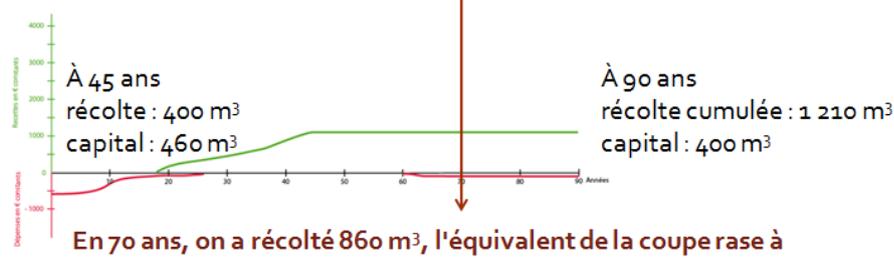
scénario révolution 45 ans (x2)

À 90 ans, récolte : 19m³/an (36 €/m³) et capital : 0 m³



scénario coupe progressive ou irrégulier

À 90 ans, récolte : 14m³/an (46 €/m³) et capital : 400 m³



En 70 ans, on a récolté 860 m³, l'équivalent de la coupe rase à 45 ans tout en maintenant notre capital producteur à 500 m³.

Figure 28. Retour sur capital d'une plantation de douglas.

Le cas d'un jeune peuplement jusqu'à la première éclaircie (< 18 m de hauteur dominante)

Dans une plantation ou dans une régénération naturelle, les dégagements sont réservés à certains cas particuliers d'envahissement par une végétation concurrente comme la ronce, la fougère aigle ou le genêt. Les travaux visent à accompagner la dynamique naturelle et de favoriser l'acquisition et le maintien du mélange. Ils consistent principalement à casser ou anneler les tiges concurrentes les options.

Pour une régénération naturelle, des cloisonnements sylvicoles seront ouverts tous les 7 à 8 m d'axe en axe afin de rendre pénétrable le peuplement.

Situation de départ :

Peuplement de 18 m de hauteur dominante
 Désignation de 80 à 100 arbres de place par hectare

Critères de choix :

- pour la première catégorie (60 %) dominance, qualité, espacement ;
- pour la deuxième catégorie (40 %) dominé, qualité, proportion de cime vivante > 30 %, espacement



Avant éclaircie

Première éclaircie :

- ouverture d'un cloisonnement d'exploitation en récoltant une ligne sur 5 ou 6 ;
- martelage de un à deux arbre(s) concurrent(s) par arbre de place



Après éclaircie

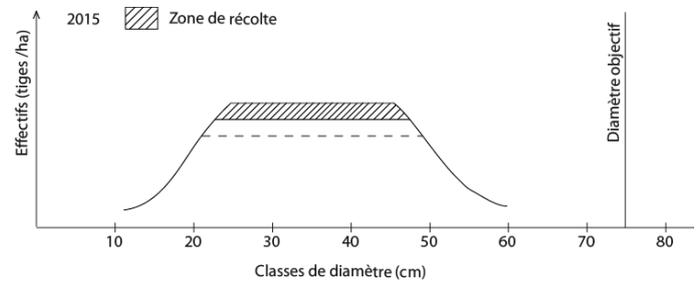
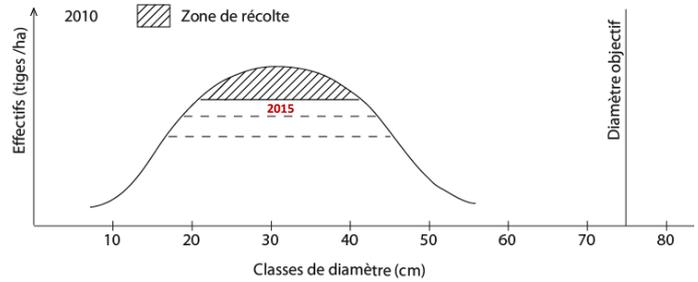
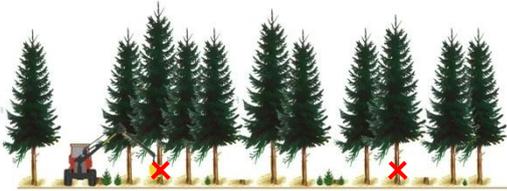
Le cas des jeunes peuplements (< 40 ans)

Première étape :

Eclaircie parmi les arbres codominants et dominants de moins de bonne qualité : on parle d'« éclaircie négative par le haut ». Recherche de la dispersion des diamètres afin de préparer l'étalement futur des récoltes.

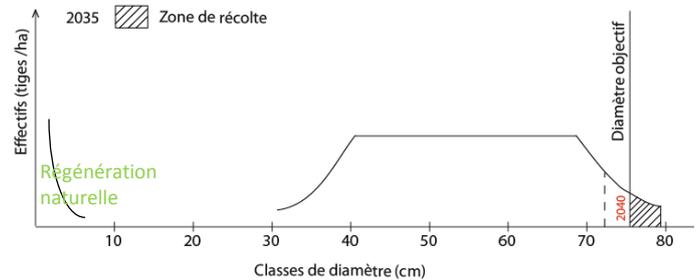
Critères de choix :

- arbre de mauvaise qualité au profit d'un meilleur que lui sans tenir compte de l'espacement
- prélèvement maximum de 20 % de la surface terrière

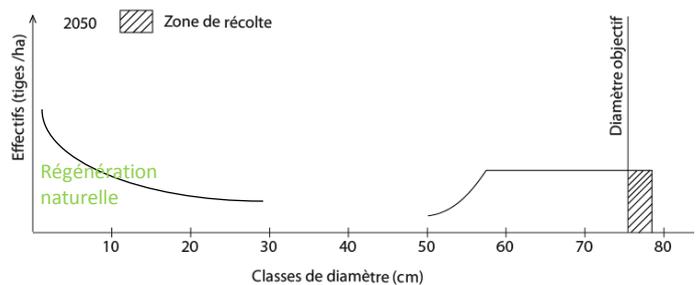


Etapes suivantes :

Il s'agit de pérenniser le plus longtemps possible le peuplement en économisant le nombre de tiges. Cela revient à récolter l'accroissement en axant le martelage sur les plus gros arbres (en priorité ceux de moins bonne qualité) : on parle d'« exploitation par dimension cible »



Situation après 40 ans



Le cas des peuplements adultes et vieux (> 40 ans)

Première étape :

Récolte progressive du peuplement par dimension cible. Eclaircie « négative » par le haut (récolte des gros bois de mauvaise qualité).



Situation de départ, présence ou non de semis

Prélèvement maximum de 20 % de la surface terrière soit environ 6 à 9 m²/ha (70 à 100 m³/ha)



Situation après 20 ans



Situation après 20 ans

Etapes suivantes :

Maintien du couvert aussi longtemps que possible (minimum 20 ans) pour permettre à la régénération de se différencier



Situation après 40 ans



Situation après 40 ans

4.2. Cas des peuplements de pins

Le cas des peuplements mélangés chêne sessile – pin sylvestre

En Champagne Humide et en Sologne Bourbonnaise, de nombreux peuplements de chêne sessile ont été enrichis à la fin du 19^{ème} siècle par des bouquets de pin sylvestre dans des peuplements en partie ruinés par la combinaison d'une exploitation intensive pour le bois de feu et des pâtures. Ces peuplements mélangés reposent sur une gamme de sols acides avec des engorgements marqués par place.

Les peuplements ont des proportions en nombre de tiges et en surface terrière très variables. Les pins sont soit disséminés dans les peuplements soit regroupés par bouquets régularisés en petits ou moyens bois. En mélange, ces deux essences sont complémentaires. Les travaux récents de l'IRSTEA et de l'ONF ont mis en évidence l'intérêt de favoriser le mélange chêne sessile et pin sylvestre. En mélange, le pin sylvestre atteint sa plus belle qualité et la productivité est meilleure pour les deux essences qu'en peuplement pur.

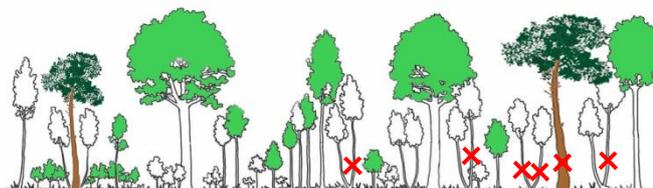
Contrairement au douglas qui peut être considéré aujourd'hui comme une essence de demi-lumière, le pin se régénère mieux dans des conditions de pleine lumière. L'existence du pin sylvestre en traitement irrégulier ne peut se concevoir que lorsqu'il est minoritaire dans un peuplement à couvert et capital faibles. A titre indicatif, les valeurs entre 14 et 18 m²/ha peuvent être proposées. Le renouvellement des gros pins passe par l'ouverture discontinue du couvert, dite en « peau de léopard », pour permettre une régénération progressive en abaissant localement la surface terrière entre 8 et 12 m²/ha avec un maintien des chênes.

La conversion vers un traitement irrégulier mixte chêne sessile – pin sylvestre peut s'envisager dans les stations chênaie-chênaie ou chênaie-charmaie diluée. Il est à éviter dans les contextes de la chênaie-hêtraie ou chênaie-charmaie où la dynamique des essences est très concurrentielle à celle du pin et ne pourra être contrôlée à des coûts supportables.

Première étape :

Première éclaircie :

- ouverture d'un cloisonnement tous les 20 à 25 m.
- création de trouées par la récolte des gros bois de mauvaise qualité et furetage dans le taillis



Prélèvement maximum de 20 % de la surface terrière soit environ 5 m²/ha (40 à 60 m³/ha)

Etapes suivantes :

Coupe jardinatoire avec possibilité de création de trouées dite « en peau de léopard » qui favorisent le développement de la régénération de pins.



Le cas des peuplements de pin noir

Sur sols calcaires, le traitement de type irrégulier pied à pied s'orientant vers un mélange résineux-feuillu peut être envisagé pour les peuplements d'une hauteur dominante minimum de 18 m reposant sur une argile de décarbonatation épaisse (> 40 cm) recouverte ou non d'un substrat à dominante limoneuse avec une pluviométrie importante (> 800 mm). Dans ces sols, la carbonatation ne se manifeste qu'au niveau de la roche sous-jacente, un calcaire dur ou un calcaire marneux. En dehors de ces conditions, il est difficile d'envisager une sylviculture rentable comportant du pin noir.

La valorisation de ces sols, caractérisés par une grande variabilité des possibilités de prospection racinaire, doit être recherchée par la diversification des essences. Naturellement les essences feuillues comme le hêtre, le chêne, les érables (châpêtre, plane et sycomore) ou les alisiers (blanc et torminal) se réinstallent en sous-étage. D'autres essences peuvent être favorisées ponctuellement comme les résineux (douglas, sapin pectiné ou encore mélèze d'Europe) ou certains feuillus comme le robinier.

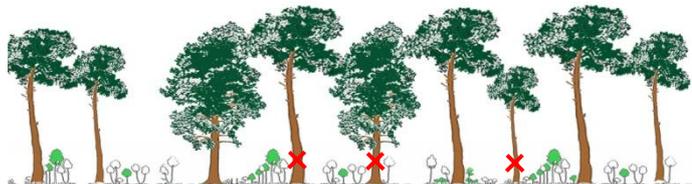
Première étape :

Première éclaircie :

- ouverture d'un cloisonnement tous les 12 à 15 m.
- création de trouées par la récolte des gros bois de mauvaise qualité et éclaircie

Critères de choix :

- travailler au profit des plus beaux arbres, qualité, proportion de cime vivante > 30 %
- prélèvement maximum de 20 % de la surface terrière soit environ 4 m²/ha (30 à 40 m³/ha)
- maintien de quelques gros bois même de qualité moindre comme semenciers et pour favoriser l'étagement du peuplement



Étapes suivantes :

Coupe jardinatoire avec possibilité de création de trouées dite « en peau de léopard » qui favorisent le développement de la régénération de pins ou d'essences de lumière (mélèze) ou de demi-lumière (douglas)



Bibliographie

- [1] COLLET R., 7ème Université d'été de la forêt de bourgogne. Les avancées technologiques dans l'utilisation du bois sont-elles une réponse ?, 2011.
- [2] SCHUTZ J.-P. and GEHRI E., "Plaidoyer pour la production de gros bois," *Revue Forestière Française*, no. 6, pp. 555-562, 2006.
- [3] de MELO MOURA J. D., "Utilisation en structures des résineux à faible densité : conséquences technologiques de scénarios sylvicoles extrêmes.," Université Henri Poincaré, Nancy I, Thèse de doctorat 1996.
- [4] RIOU-NIVERT P., *Les résineux. Tome II : Ecologie et pathologie.*, 2005.
- [5] ANGELIER A., *Douglasaies françaises*, Guide des sylvicultures ed.: Office National des Forêts, 2007.
- [6] RIOU-NIVERT P., *Les résineux. Tome I : Connaissance et reconnaissance.*, 1996.
- [7] BAAR F., *Le martelage en futaie irrégulière feuillue ou résineuse*, DGARNE SPW, Ed., 2010.
- [8] LANDRE F. and BALANDIER P., "Potentialités de régénération naturelle des feuillus sous épicéas ou douglas," *Forêt Entreprise*, no. 168, pp. 56-59, 2006.
- [9] HALE S., "Managing light to encourage natural regeneration in British conifer forests," Forestry Commission, Edinburgh, Information Note 63 2004.
- [10] CAMERON A.D. and HANDS M.O.R., "Developing a sustainable irregular structure: an evaluation of three inventories at 6-year intervals in an irregular mixed-species stand in Scotland," *Forestry*, vol. 83, no. 5, pp. 469-475, September 2010.
- [11] GARTNER B.L., NORTH E.M., JOHNSON G.R., and SINGLETON R., "Effects of live crown on vertical patterns of wood density and growth in Douglas-fir," *Canadian Journal of Forest Research*, no. 32, pp. 439-447, 2002.
- [12] SEVRIN E., "Un renouvellement diffus et en douceur.," *Forêt Entreprise*, no. 189, pp. 19-22, 2009.
- [13] WOHLGEMUTH T., "Evolution de la régénération et de la végétation dans les peuplements touchés par les tempêtes en Suisse.," *Forêt Entreprise*, no. 183, pp. 37-40, 2008.
- [14] JOANNIN H. and FARINOTTI S., "Renouvellement naturel des peuplements de douglas.," *Forêt Entreprise*, no. 188, p. 37, 2009.
- [15] GILLARD M., "Développement de la ronce (*Rubus fruticosus*) en fonction de la disponibilité en lumière dans le sous-bois forestier.," IUT, Brest, Rapport de stage 2010.
- [16] AUBERT M., MARGERIE P., ERNOULT A., DECAENS T., and BUREAU F., "Variability and heterogeneity of humus forms at stand level : comparison between pure beech and mixed beech-hornbeam forest," *Annals of Forest Science*, no. 63, pp. 177-188, 2006.
- [17] ROUSSET A., *Le Jardinage Forestier - Traité complet théorique et pratique de l'aménagement des forêts en futaie par le jardinage et de l'application de la coupe jardinatoire*, 2nd ed., 1912.
- [18] PONCELET J., "La séquestration du CO2 par la forêt et le bois : quelques éléments de calculs et quelques réflexions," *La Forêt Privée*, no. 299, pp. 60-65, 2008.
- [19] PONETTE Q., "Effets de la diversité des essences forestières sur la décomposition des litières et le cycle des éléments," *Forêt Wallonne*, no. 106, pp. 33-42, 2010.
- [20] BONNEAU M. et al., "Effets de boisements résineux purs sur l'évolution de la fertilité du sol," *Revue Forestière Française*, no. 3, pp. 198-207, 1979.
- [21] ZAPATER M. et al., "Evidence of hydraulic lift in a young beech and oak mixed forest using 18O soil water labelling," *Trees. Structure and Function*, vol. 25, no. 5, pp. 885-894, September 2011.
- [22] DRENOU C. (coordinateur), *Les Racines face cachée des arbres.*: IDF, 2006.

- [23] RIDREMONT F., DEGRE A., and CLAESSENS H., "Mieux comprendre et évaluer la réserve en eau des sols forestiers," *Forêt Wallonne*, no. 116, pp. 18-29, Janvier/février 2012.
- [24] PEROT T., DELEUZE C., JARRET P., and MORNEAU F., "Mélange d'essences et productivité : application au mélange chêne sessile - pin sylvestre en forêt domaniale d'Orléans," *RDV techniques - ONF*, no. 33-34, pp. 11-17, été/automne 2011 2011.
- [25] CHABAUD L. and NICOLAS L., *Pineraies des plaines du Centre et du Nord-Ouest*, Guide des sylvicultures ed.: Office National des Forêts, 2009.
- [26] de PAUL M.-A., BAILLY M., and HEYNINCK C., *Le cloisonnement d'exploitation, pour préserver les sols forestiers*, DGO3 SPW, Ed., 2009.
- [27] de PAUL M.-A. and BAILLY M., "Impacts de la mécanisation sur les arbres du peuplement," *Forêt Wallonne*, no. 79, pp. 47-55, 2005.
- [28] MOYSES F., "Optimiser la sortie de la phase de compression des peuplements feuillus mélangés," *La Forêt Privée*, no. 304, pp. 62-69, 2008.
- [29] SCHUTZ J.-P., "Est-il possible de maîtriser les coûts des opérations culturales ? Le rôle primordial des rationalisations biologiques.," *Forêt Wallonne*, no. 78, 2005.
- [30] MESSANT A. et al., *Des travaux économes pour du bois d'oeuvre de haute qualité. Du semis ou de la plantation jusqu'aux premières éclaircies.*, 2012.