AgroParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET INDUSTRIES DU VIVANT ET DE L'ENVIRONNEMENT
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY FOR LIFE, FOOD AND ENVIRONMENTAL SCIENCES

CNIEFEB

Fabien REBEIROT

Expert Forestier agréé

Etude de la régénération naturelle résineuse

au sein de la futaie jardinée du Haut-Jura

Mémoire de fin d'études

Dominante d'approfondissement :

Gestion Forestière

Loïc CIZABUIROZ

Septembre 2014

Sources photographiques : Loïc CIZABUIROZ

AgroParisTech

Fabien Rebeirot

Expert forestier agréé

Etude de la régénération naturelle résineuse

au sein de la futaie jardinée du Haut-Jura

Mémoire de fin d'études

Dominante d'approfondissement :

Gestion Forestière

Loïc CIZABUIROZ

Septembre 2014

Résumé

La futaie jardinée est le traitement sylvicole le plus pratiqué au sein du massif Jurassien. Bien adapté au contexte local, il possède également un très fort poids historique. Son application repose entièrement sur une régénération naturelle résineuse constante et diffuse à l'échelle de la parcelle. Cependant peu d'ouvrages sur les traitements irréguliers abordent la phase essentielle du développement des semis de sapin et d'épicéa.

Pour tenter de répondre à ce questionnement un inventaire de régénération par échantillonnage statistique a été mis en place, ainsi qu'un réseau de placettes permanentes sur deux forêts aux contextes stationnels différents, l'une appartenant à la région naturelle du Haut-Jura et l'autre au deuxième plateau du Jura. Suite à la récolte des données, des corrélations ont été recherchées entre des variables explicatives stationnelles, structurelles ou historiques et des variables de réponse, de quantité et de qualité de régénération résineuse.

Des données chiffrées notamment en termes de densité de capital sur pied, de proportion de feuillus, de type de peuplement, ou encore de concurrence herbacée, induisant un renouvellement convenable ou non des peuplements, ont été mis en lumière. Ces préconisations, loin d'être exhaustives, permettront peut-être une meilleure prise en compte de la régénération naturelle dans les futaies jardinées jurassiennes.

Abstract

Irregular silviculture is quite spread on the Jura ridge. Well adapted to the local context, it also has a very strong historical weight. Its application is based entirely on a resinous natural regeneration diffuse and perpetual. However, few works talk about this essential phase of seedling development for fir and spruce.

In an attempt to fill this « gap », inventory regeneration by statistical sampling was implemented, as a network of permanent plots on two different forest sites with diverse context, one belonging to the natural region of « Haut-Jura » and another to the « second plateau ». Following the collection of data, correlations were sought between stational, structural and historical explanatory variables, and response variables, like quantity and quality of softwood regeneration.

Encrypted data in terms of intervals of standing capital, proportion of hardwood, forest type, or herbaceous competition, inducing or not a suitable stand renewal were highlighted. These recommendations, far from exhaustive, maybe allow a better consideration of the natural regeneration in Jura forest.

Remerciements

Mes remerciements vont en premier lieu à Fabien Rebeirot et Isabelle Herbert. A Fabien pour avoir répondu favorablement à ma demande, tout en orientant mon travail vers la problématique autant intéressante qu'essentielle du renouvellement résineux. Mais aussi pour la découverte de nombreux aspects du métier d'expert forestier, et le partage de ses connaissances sur un vaste territoire allant de la chênaie Bressane aux pessières du Haut-Jura. Un grand merci également à Isabelle, pour son suivi tout au long de ce stage, de la mise en place du protocole jusqu'aux traitements des résultats et la relecture du rapport. Ses conseils avisés, sa prise de recul ainsi que sa disponibilité ont amplement participé à la réalisation de ce travail.

Merci à Max Bruciamacchie, enseignant AgroParisTech, pour avoir accepté d'être le professeur tuteur de ce stage, ainsi que pour ses avis pertinents sur l'inventaire et l'analyse statistique. Je suis aussi reconnaissant envers tous les enseignants AgroParisTech du centre de Nancy, qui durant plus de 2 ans se sont appliqués à nous transmettre leurs connaissances et expériences.

Je remercie David Gasparotto et Jean Guillot, respectivement « responsable du centre de documentation forestière » et « responsable moyens pédagogiques », pour leur aide durant la phase bibliographique et la mise à disposition du matériel de mesures forestières.

Merci tout particulièrement à ma famille et mes amis, pour leur précieuse aide durant la phase de récolte des données sur le terrain, quelques soit les conditions météorologiques. Mais également pour la relecture du rapport et le soutien durant ces six mois d'étude.

Enfin, merci aux techniciens forestiers Christian Michaud et Olivier Blondeau, pour leur connaissance du milieu forestier jurassien ainsi que leur bonne humeur durant ces nombreuses journées de terrain.

Table des matières

Remerciements 1
Table des matières 2
Index alphabétique des sigles 3
Introduction 4
1. Le Haut-Jura 5
1.1 Contexte climatique 5
1.2 Contexte stationnel 6
1.3 Les peuplements forestiers 8
1.4 La gestion forestière 9
2. La futaie jardinée 10
2.1 Historique 10
2.2 Les grands principes 11
2.3 Prise de recul 12
3. L'inventaire de régénération 13
3.1 L'objectif de l'étude 13
3.2 Le choix des forêts étudiées 13
3.3 Mise en place d'un protocole 15
4. Résultats d'inventaire et commentaires 22
4.1 Résultats globaux sur l'ensemble des deux forêts 22
4.2 Contexte de deuxième plateau : la forêt du Frênois 34
4.3 Contexte du Haut-Jura : la forêt du Chalet brûlé 37
5. Liens avec la gestion forestière 39
5.1 Densité minimale 39
5.2 Arbre de décision 40
5.3 Précision d'inventaire 42
5.4 Différences entre sapin et épicéa 44
5.5 Situations particulières 45
5.6 Pression cynégétique 46
5.7 Changement climatique 47
Conclusion 48
Table des annexes 50

Index alphabétique des sigles

ACP : Analyse en Composantes Principales

ACM : Analyse des Correspondances Multiples

ADEFOR : Association jurassienne de Développement Forestier

AFI : Association Futaie Irrégulière

ANATEF : Association Nationale des Techniciens Forestiers indépendants

ASA : Association Syndicale Autorisée

BM : Bois Moyen, classe de diamètres 30, 35 et 40 cm

CDA : Chambre D'Agriculture

CRPF : Centre Régional de la Propriété Forestière

CV : Coefficient de Variation

ETP : Evapo Transpiration Potentielle

G : Surface terrière

GB : Gros Bois, classes de diamètres 45 cm et plus

Hdom : Hauteur dominante

IFN : Inventaire Forestier National

IGN : Institut National de l'Information Géographique et Forestière

PB : Petits Bois, classes de diamètre 20 et 25 cm

PCQM : Type de placette d'inventaire (Point Centred Quarter Method)

PSG : Plan Simple de Gestion

SRGS : Schéma Régional de Gestion Sylvicole

V : Volume

Introduction

Avant de dominer la canopée, et même parfois devenir « le sapin président », les épicéas et les sapins ont tous débuté par le stade juvénile de semis. Cependant le cheminement est long et de nombreux paramètres peuvent interagir, depuis la dispersion des graines au sol, jusqu'à la maturité et le passage à la futaie. Paraissant paisible et immobile le milieu forestier est en réalité constamment en mouvement, de par cette lutte perpétuelle pour la lumière et l'élévation, mais également dans le but de résister au mieux à tous les facteurs abiotiques. Ainsi aucun renouvellement ne peut être garanti avant la transition vers la catégorie des petits bois, voire des plus gros diamètres.

Les premiers stades de développement de ces deux essences résineuses font donc partie intégrante du traitement jardinatoire, entrepris de longue date par les forestiers jurassiens. Néanmoins, peu d'ouvrage se concentrent sur la régénération naturelle, y compris en futaie irrégulière. L'objectif de ce mémoire est donc de mettre en lumière des variables de causalités, telles que des données stationnelles, structurelles ou historiques, impliquant une réponse en termes de quantité, mais également de qualité de régénération.

L'étude faisant l'objet de ce rapport a été proposée par le cabinet d'expertise forestière de Fabien Rebeirot. Six mois de travail ont été nécessaires à la mise en place d'un protocole, la prise de données sur deux propriétés forestières privées, l'analyse des résultats et finalement la rédaction du présent rapport. Celui-ci est structuré en cinq parties répondant à la problématique précédemment citée.

Pour mieux appréhender le cœur du rapport, les deux premiers chapitres vont tout d'abord situer le contexte de l'étude. La région forestière du Haut-Jura sera ainsi amplement décrite au niveau climatique, stationnel et forestier. Puis, un retour aux prémices du traitement jardiné permettra de mieux comprendre le poids historique de ce type de sylviculture dans le Jura.

La troisième partie retracera le travail de mise en place de l'inventaire de régénération, calibré pour le cas particulier du massif Jurassien. Les choix entrepris seront décrits un à un, en commençant par la sélection des forêts étudiées, jusqu'à une énumération exhaustive des variables relevées pour répondre à la problématique.

Enfin les deux derniers chapitres, relateront l'exploitation des résultats d'inventaire. Le chapitre quatre s'attardera sur l'analyse statistique, une étape essentielle au regard de la quantité de données recueillies (mesures de plus de 4 000 arbres, 300 perches, 1 500 semis, …). Et pour finir, il parut important de rattacher les tendances observées avec la gestion sylvicole pratiquée dans le Jura. Le chapitre cinq tentera donc de donner quelques clés au sylviculteur et illustrera également certaines situations particulières.

1. Le Haut-Jura

Le « Jura », ce terme que l'on attribue aux langues celtes, désignerait une « forêt sauvage ». Il apparut dans les écrits dès le Moyen-Age, intimement lié au mot « Joux », lui-même connotant de grandes étendues boisées. L'histoire étymologique moderne de ce mot n'est cependant pas à oublier. En effet, depuis le XVIII^{e} siècle, le terme « Jurassique » est connu du monde entier, suite aux travaux d'éminents géologues, ayant utilisés la géomorphologie jurassienne pour définir une période importante de l'ère secondaire (Bichet et Campy, 2009).

De nos jours, le département du Jura appartient avec ceux du Doubs, de la Haute-Saône et avec le Territoire de Belfort à la région Franche-Comté.

Le Haut-jura (Figure 1), qui sera le territoire de cette étude, correspond quant à lui au Sud-Est du département du Jura. Cette zone géographique longe également la frontière Suisse, jusque dans une partie du département du Doubs et de l'Ain. Appelée aussi Haute-Chaîne, le relief y est très marqué, avec une altitude majoritairement supérieure à 1 100 m. Enfin, ce territoire comprend la majeure partie du Parc Naturel Régional du même nom.

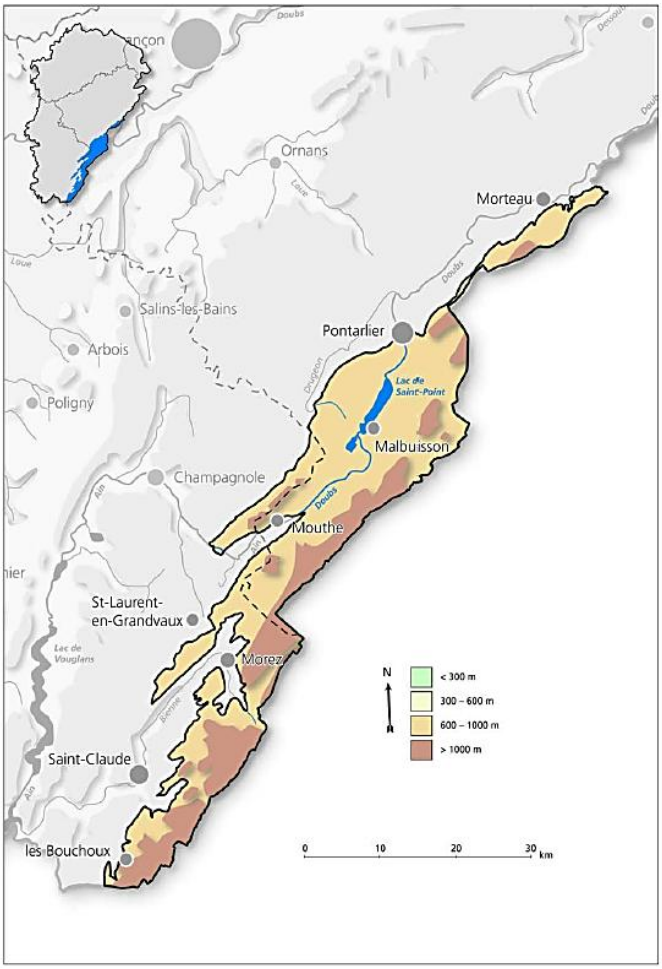


Figure 1 : Localisation du Haut-Jura (dép. du Doubs et du Jura, CRPF 2006)

1.1 Contexte climatique

Le climat Haut-Jurassien est très rude, il correspond à un contexte d'étage montagnard supérieur, voire subalpin. Seules deux saisons sont bien marquées : l'hiver et l'été, l'automne et surtout le printemps sont transitoires.

1.1.1 Température

Avec une moyenne annuelle de 6 °C, ainsi que des records nationaux devenus célèbres (-36,7°C à Mouthe en 1968), le Haut-Jura compte parmi les territoires les plus froids de France. A ceci s'ajoute des gelées à craindre tout au long de l'année (en moyenne 173 jours de gelées par an à Lamoura sur la période 1961-1992, d'après IFN 1992)

1.1.2 Précipitation

Avec 2 000 mm par an en moyenne, la pluviométrie est un atout pour les forêts du Haut-Jura. Le principal facteur de variation étant l'altitude, un gradient Ouest-Est peut être observé, avec des maximums élevés, par exemple dans la forêt du Massacre et ses 2 790 mm de précipitations couplées à 3,60 m d'enneigement (IFN 1992).

Les précipitations sont globalement bien réparties sur l'année, avec seulement un pic en hiver. Tandis qu'en été les orages sont généralement fréquents. Enfin les chutes de neige blanchissent le Haut Jura environ 50 à 60 jours par an, représentant à elles seules un quart des précipitations annuelles (CRPF, 2006).

1.1.3 Vents dominants

Les aléas du vent ne sont pas à négliger dans le Haut-Jura, en effet, des tempêtes violentes (1972,1990 et 1999) ont déjà mis à terre des milliers de m3 de chablis et de volis. Ils proviennent, soit du sud-ouest et sont alors doux et humides (amenant souvent la pluie), soit du nord-est sous forme de bise froide et sèche.

1.1.4 Saison de végétation

Du fait de ce climat particulièrement rigoureux, avec un hiver persistant, et un printemps n'existant pratiquement pas, la saison de végétation est très courte. Elle s'étale de mai à août sur le deuxième plateau et le Haut-Jura (IGN, 2012), ne dépassant que très rarement 4 mois et demi sur le Haut-Jura (ONF, Orientation locale d'aménagement) mais pouvant être encore plus courte, comme sur le massif du Risoux, avec seulement trois mois et demi de conditions favorables à la croissance végétative (CRPF, 2006). Cette donnée ayant une grande importance pour l'étude de la régénération, sera plus détaillée dans les parties traitant des forêts étudiées.

1.2 Contexte stationnel

1.2.1 Géologie et topographie

Depuis l'Est du massif, une succession de plateaux permet d'accéder à la Haute-Chaîne (Figure 2). Ces plissements de couches sont le fruit de compressions dues à la formation des Alpes. Les calcaires durs du Jurassique forment les « crêts », enserrés dans de longues « combes » étroites par des calcaires marneux ou tendres du Crétacé, avec ça et là d'importantes moraines et dépôts glaciaires (IFN 1992).

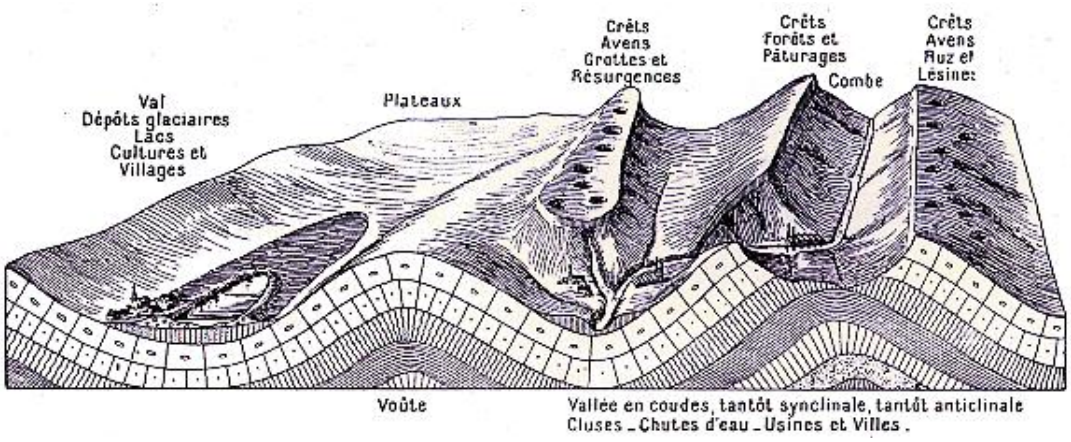


Figure 2 : Forme caractéristique de relief et de paysage jurassien
(http://www.cosmovisions.com/Jura.htm)

Le passage répété de l'eau en surface et dans les fissures du calcaire entraine un paysage original appelé karstique. Cette dissolution conduit à la formation de lapiaz (dalle compacte, nue et profondément crevassée ; appellation locale « Lésine » ou « laizine »), de dolines (creux parfaitement rond ; appellation locale « avens ») de gouffres, grottes, ou à plus grande échelle de reculées avec des résurgences. Au contraire, sur les marnes imperméables de fond de combe, la pluviométrie importante participe à la genèse de tourbières et de lacs (Bichet et Campy, 2009 ; Lebourgeois, 2008).

1.2.2 Pédologie

Hormis certaines dépressions, plus ou moins comblées par des débris glaciaires, les sols des Hautes Chaînes ont presque totalement été rabotés par les glaciers. Ceci conduit dans une grande majorité des cas, à des sols « squelettiques », avec peu de réserve en eau, ainsi qu'un humus acide (SRGS, 2006). Les sols bruns et les sols noirs de montagne sont donc dominants, avec une forte épaisseur d'humus brut au pH variant de 3,5 à 4 (IFN, 1992).

Les zones de lapiaz, quant à elles, présentent une mosaïque de micro-variations du sol forestier, avec des sols bruns dans les fissures, puis des sols lithocalciques à humifères sur les blocs calcaires (Figure 4). Un gradient d'appauvrissement des humus semble exister en se déplaçant du second plateau jusqu'à la Haute Chaîne du Jura (Figure 3), celle-ci concentrant essentiellement des humus de type « mor » ou « moder » (Annexe 4).

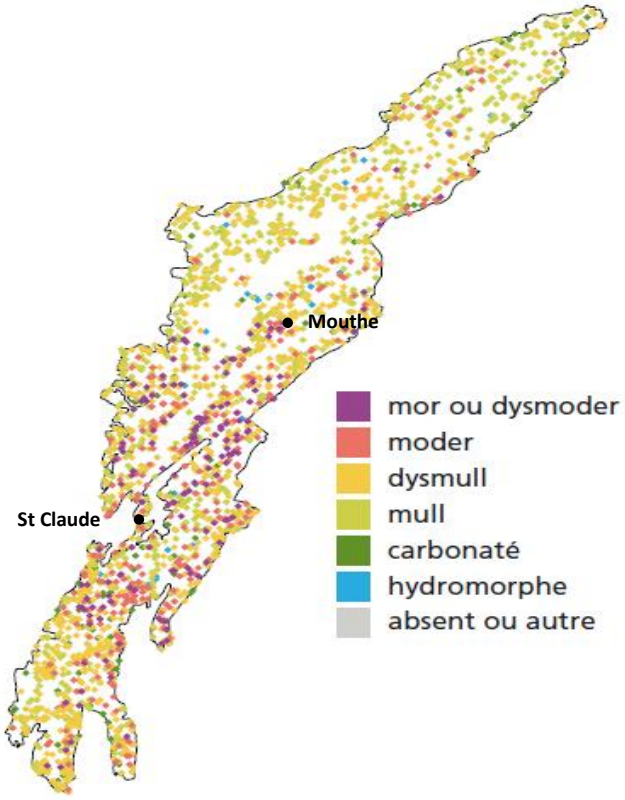


Figure 3 : Humus regroupés du deuxième plateau et du Haut-Jura (IGN, 2012)

Sols bruns à pellicule calcaire	Sols lithocalciques à humifère	Sols humo-calciques ou humocarbonatés	Sols bruns calcaires	Sols bruns lessivés	Tourbe	Sols humiques à gley
Mésotrophes à eutrophes, plus ou moins profonds, occupant les dépressions ou les fissures entre les blocs dans les zones de laizines.	Sur les blocs calcaires dans les zones de laizines, ou sur certaines dalles peu fissurées. Humus très acide par suite des conditions climatiques et biotiques.	Localement très noirs et chargés sur tout le profil d'une abondance de cailloux calcaires blancs, aux arêtes vives.	Sur les collines morainiques ou sur les affleurements marneux. Effervescence à l'acide chlorhydrique dès la surface.	Dépressions, combes ou dolines. Présence de limons mêlés à l'argile. L'épaisseur du sol et la faible densité en cailloux favorisent le lessivage.	Dépressions glaciaires impénétrables. Tourbe calcique (ruissellement sur les calcaires) ou tourbe acide (eaux de pluies).	En bordure de tourbière.
Chimiquement assez riches, difficultés d'installation de semis résineux du fait de la concurrence herbacée (ex : mégaphorbiaies).	Réputés très favorables à l'installation de la régénération résineuse. Faible productivité compensée par la prospection des racines dans les sols bruns calciques des fissures.	Richesse minérale généralement très bonne, et les précipitations compensent leur faible réserve en eaux. Cependant plus favorable à l'installation du hêtre que des semis résineux.	Généralement peu épais, leur productivité est faible.	Généralement une forte productivité, mais représentent une faible surface dans le Haut-Jura.	Biologiquement et écologiquement intéressante, inapte à toute production forestière.	Peu favorable à une végétation forestière.

Figure 4 : Description des sols du Haut-Jura (ONF, Orientation locale d'aménagement)

1.2.3 Stations forestières

Les potentialités forestières dans le Haut-Jura sont très variables du fait des variations topographiques, climatiques et pédologiques. Les trois associations végétales observables sont les suivantes :

- **La hêtraie sapinière** (*Abieti Fagetum*)
- **La pessière à doradille** (*Asplenio Picetum*)
- **La hêtraie à érable** (*Aceri Fagetum*)

La hêtraie sapinière est la plus généralement rencontrée, puisqu'elle peut être présente de 900 à 1 300 mètres d'altitude (Herbert et Rebeirot, 1981). Celle-ci peut elle-même être divisée en trois sous-associations :

- *La sous-association Melicetosum*, aux altitudes inférieures, sur sol brun humifère ou sur sol brun lessivé si le substrat est limoneux, avec la présence de la mélique penchée (*Melica nutans*).
- *La sous-association Typicum*, située aux altitudes moyennes, le plus souvent sur sol brun calcique, avec la présence de la grande fétuque (*Festuca altissima*).
- *La sous-association Adenostyletosum*, aux limites altitudinales supérieures de l'association, sur sol humocalcique, avec la présence de l'adénostyle glabre (*Adenostyle alliariae*).

Pour ce qui est des deux autres associations végétales, la pessière à doradille se retrouve sporadiquement, notamment sur les lapiaz, et sur des sols lithocalciques à mor. Tandis que la hêtraie à érable occupe la limite altitudinale supérieure de la forêt jurassienne.

Ces stations forestières, qui peuvent être encore subdivisées en différentes variantes (Annexe 3), permettent de mieux apprécier les difficultés d'installations des semis résineux, ou à l'inverse la forte concurrence avec le hêtre ou certaines herbacées. Bien que suivant essentiellement un gradient d'altitude, des micro-variations peuvent aussi être observées du fait des systèmes karstiques. De plus, en raison de la faible réserve en eau des sols du Haut-Jura, l'orientation peut jouer un rôle important avec des fertilités plus fortes sur les versants nord et nord-est, plus humides que les versants sud (SRGS, 2006). Une dernière remarque est tout de même à souligner, concernant l'épicéa. Comme nous allons le voir dans le paragraphe suivant, celui-ci occupe une place beaucoup plus importante que celle conforme aux associations végétales naturelles, ceci étant essentiellement dû, d'une part à la sylviculture et d'autre part au parcours du bétail en forêt, qui a largement favorisé cette essence (Herbert et Rebeirot, 1981).

1.3 Les peuplements forestiers

La limite supérieure de la végétation forestière se situant sur le massif jurassien vers 1 550 mètres d'altitude, la quasi-totalité du Haut-Jura est couverte de forêts (Figure 5). En effet, le taux de boisement dépasse les 60 % ce qui est deux fois supérieur à la couverture nationale (SFFC, 1997).

Figure 5 : Aperçu de la couverture forestière du Haut-Jura depuis le Pic de l'Aigle

Les coupures forestières les plus nettes s'observent dans les combes, souvent pâturées, elles-mêmes délimitées par les prés-bois, d'une grande richesse paysagère et écologique. La pessière mêlée de hêtre représente le type de peuplement prédominant, avec quelques érables sycomores. En descendant sur le deuxième plateau, le sapin est souvent bien représenté en mélange avec l'épicéa. Tandis que les pessières d'altitude occupent les crêts, parfois avec un port columnaire (houppier plus étroit), permettant de résister aux surcharges de neige.

La croissance est généralement très faible et les cernes annuels sont extrêmement fins et réguliers. En contrepartie, le bois est souvent de grande qualité, avec des débouchés de niche tels que le bois de lutherie (SRGS, 2006).

1.4 La gestion forestière

La forêt du Haut-Jura appartient à 66 % à des propriétaires privés, ce qui est supérieur à la moyenne régionale (45 %). A l'image de la forêt privée française, le morcellement est ici aussi très marqué avec 77 % des propriétaires possédant moins de 4 ha, représentant 22 % de la surface forestière privée (Figure 6). Tandis qu'à l'inverse, 9 % des propriétaires possèdent plus de 10 ha et représentent 56 % de la surface.

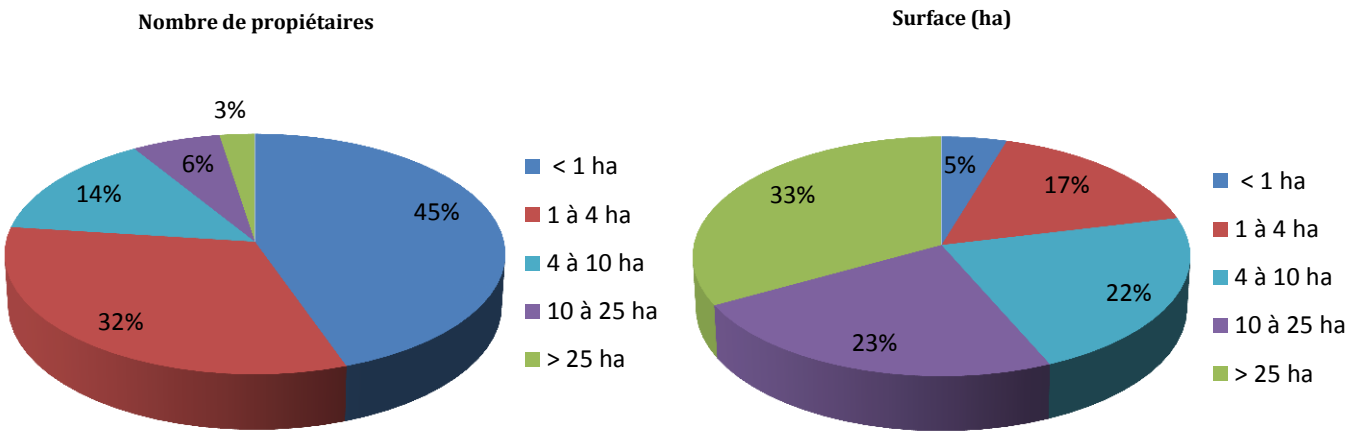


Figure 6 : Morcellement de la propriété forestière du Haut-Jura (d'après des données du SRGS, 2006)

Pour faciliter la gestion de ces micropropriétés, de nombreuses ASA ont vu le jour (47 uniquement sur le Haut-Jura), avec l'aide de l'ADEFOR (regroupement de la CDA du Jura et du CRPF de Franche-Comté). Celles-ci ont notamment facilité la création de dessertes, pour mieux accéder à ces propriétés morcelées. Trois entités assurent la gestion des forêts privées sur la Haute-Chaîne. Les experts forestiers, les coopératives forestières (COFORET et FBE) et les techniciens ANATEF.

L'étude qui fait l'objet du présent rapport a été commanditée par le cabinet d'expertise forestière de Fabien Rebeirot. Cette structure, créée en 1987, possède un rayon d'action essentiellement centré sur le département du Jura, mais se prolongeant également dans le Doubs, en Saône et Loire, et en Côte d'Or. Elle réalise des missions de gestion sylvicole (rédaction de PSG, cartographie des peuplements, marquage des coupes, conception et maîtrise d'œuvre des travaux, relation avec les tierces personnes) de mise en marché des bois (résineux et feuillus, sur pied ou bord de route), d'estimation forestière (recherche de limites, inventaires de peuplements), ainsi que d'expertise auprès des tribunaux. Ce cabinet gère environ 7 000 ha de forêts réparties en 70 clients. Le type de traitement majoritairement appliqué est celui de la futaie jardinée.

2. La futaie jardinée

2.1 Historique

Pour satisfaire les besoins locaux, une cueillette « en jardinant » était entreprise de longue date dans les forêts résineuses de montagne. Cette vieille méthode empirique faisait foi dans les forêts jurassiennes, sous le nom de « jardinage » ou de « furetage ». Elle était essentiellement basée sur les trois principes suivant : « mise au ban plus ou moins longue en cas de dégradation, réserve de jeune bois de moins de trois pied de tour, pratique du jardinage » (Vion-Delphin, 2001). Avec le rattachement de la province de Franche-Comté à la France en 1678, ces méthodes furent jugées archaïques, échappant à tout contrôle (Bastien, 2002). Une uniformisation se mit donc en place, avec la création d'un grand maître des Eaux et Forêts de Comté à Besançon et l'application de l'Ordonnance de Colbert en 1694. Celle-ci substitue au furetage comtois la coupe réglée, c'est-à-dire au « tire et aire » (Tyrode, 1991).

Les résultats, surtout en forêt résineuse, furent catastrophiques. Les arbres réservés séchèrent sur pied ou furent renversés par le vent, les sols mis à nu furent envahis par les ronces ainsi que d'autres essences diverses (Tyrode, 1991). La forte contestation de cette sylviculture entraina un assouplissement de la coupe réglée jusqu'à la chute de l'administration forestière avec la révolution française. Ce répit fut cependant de courte durée. Dès 1804, les forestiers d'Etats influencés par la sylviculture allemande, « remettent de l'ordre » en préconisant la méthode de la futaie régulière. Des coupes de régénérations sont ainsi entreprises durant tout le début du XIXe siècle dans les forêts publiques jurassiennes.

A la fin du XIXe siècle, les critiques vinrent cette fois-ci d'un jeune forestier, sortant tout juste de l'école de Nancy. Adolphe Gurnaud (Figure 7), nommé à Pontarlier procède à un grand nombre de mesures qui ébranlent ses connaissances, et le poussent à entrer en conflit avec l'Administration. Il présenta ces observations lors de l'exposition universelle à Paris de 1878, ainsi que dans de nombreux ouvrages explicitant sa « méthode du contrôle » (Pardé, 1991). Rejeté par l'administration forestière, il exerce tout de même en forêt privée ainsi que dans certaines forêts communales jurassiennes. Le jardinage présenté par Gurnaud fit rapidement des émules des deux côtés de la frontière (Figure 9). En 1906 la société du contrôle est créée par ces jardiniers jurassiens, pour acheter ensemble des forêts et mettre en pratique la méthode de Gurnaud (Figure 8). Celle-ci existe toujours de nos jours sous forme d'un groupement forestier.

Figure 7 : Adolphe Gurnaud, 1825-1898
(Collection ENGREF NANCY)

Figure 8: Martelage à la société du contrôle (1909), sont présent : Jobez, Schaeffer, Gazin, Gréa, Rimaud, de Liocourt, d'Alverny, de Luze, Barbey, les trois frères Romand (RFF, 1991)

Figure 9 : Henri Biolley, 1858-1939
(Supplément aux organes de la Société forestière suisse)

2.2 Les grands principes

La méthode du contrôle peut être résumée en cinq grands principes (Pardé, 1991) :

- Le forestier travaille par parcelles entières et indépendantes les unes des autres, il ne s'inquiète pas de l'unité de la forêt.
- Il adopte une rotation courte (5 à 10 ans).
- La mesure de la production en volume se déduit des comparaisons d'inventaires périodiques.
- La récolte, par la coupe, est égale à cette production si la forêt est normale. Elle est inférieure, ou supérieure, si le matériel sur pied est insuffisant, ou excédentaire.
- La recherche du matériel sur pied le plus avantageux (le matériel normal) se fait par expérience sur le peuplement lui-même.

Cette méthode tend à un équilibre harmonieux des classes de diamètre et de hauteur, aucune catégorie n'étant dominante. Cela se traduit par une courbe de fréquence des diamètres assez régulièrement décroissante (Figure 10). Les coupes doivent être régulières mais de faible intensité. Le martelage réunit les fonctions suivantes : sanitaire, récolte, amélioration, régénération et structuration, citées par ordre de priorité. La quantité à prélever est fonction de l'état du peuplement, elle peut se définir par rapport à la production.

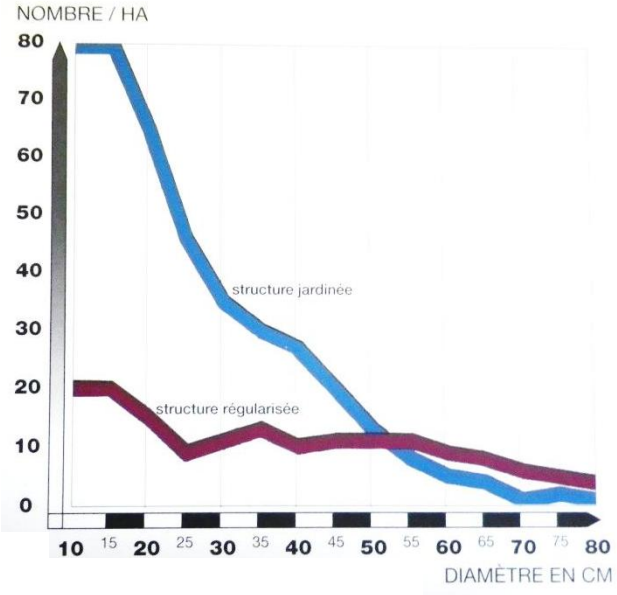


Figure 10 : Courbe de fréquence des diamètres (Rebeirot, 2010)

« Observons la nature, contrôlons son évolution, puis ensuite édictez des principes. »

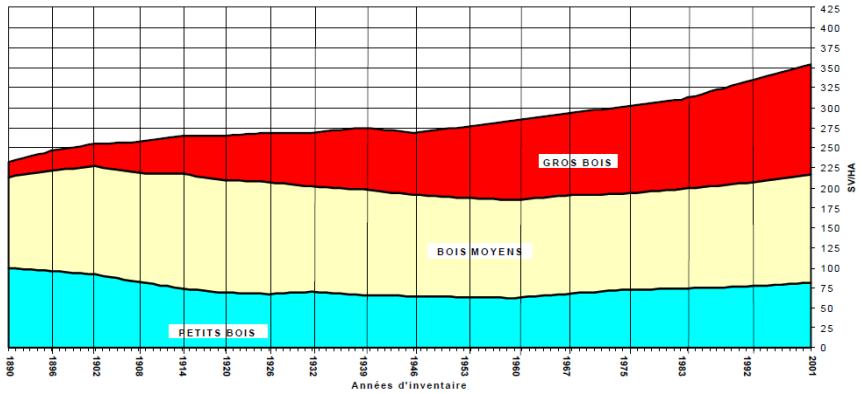
Gurnaud

Pour assurer la survie et le développement de la régénération, un passage en travaux sylvicoles est préconisé après chaque coupe. Les perches ou semis d'avenir sont « dégagées » de la concurrence feuillue. Les bouquets de perches trop denses sont « dépressés ». Enfin le mélange d'essences est favorisé pour faciliter l'obtention d'une régénération naturelle et limiter les risques sanitaires.

Tous ces principes ont été largement décrits dans la typologie des futaies jardinées jurassiennes (Rebeirot, 2010 ; Annexe 5). Celle-ci permet la caractérisation des peuplements jardinés du massif Jurassien selon sept grands types, allant de la futaie jardinée équilibrée (Type A) à la futaie résineuse très claire (Type G).

2.3 Prise de recul

La méthode du contrôle fut mise en application en Suisse dès 1868 par Henri Biolley, sur la célèbre forêt de Couvet, ce qui permit d'illustrer cette technique de jardinage. La rigueur d'inventaire sur cette forêt depuis plus d'un siècle, nous renseigne sur une quantité importante d'indicateurs de la futaie jardinée, tels que l'évolution de la répartition des catégories de bois (Figure 11). Ces résultats sont d'autant plus intéressants qu'ils sont tous exprimés en sylve, invention de Biolley et Jobez, maire de la commune de Syam. La sylve est un tarif conventionnel, qui fut établi non pas pour connaître exactement le volume, mais avant tout pour bénéficier d'une mesure unique, s'appliquant à toutes les parcelles et toutes les forêts, et facilitant ainsi les comparaisons d'inventaires.



« La récolte ne se décrète pas, elle se constate »

Biolley

Figure 11 : Evolution du volume en sylve dans la forêt de Couvet suite à plus d'un siècle de jardinage

Au début du XXe siècle on assiste à une rationalisation du jardinage avec les travaux de Liocourt, Schaeffer, Gazin et d'Averny. Suite à un comptage de 1 500 ha en forêt vosgienne, ils élaborent des modèles d'équilibre des peuplements résineux, regroupés sous quatre normes, ayant un coefficient de décroissance différent. Ils publient l'ouvrage « Sapinière » en 1930.

Cependant ces normes furent remises en cause, puis abandonnées par la suite. Les critiques se fondèrent notamment sur l'échantillon utilisé par les quatre forestiers. Celui-ci couvrait en effet des séries entières de futaies régulières de sapin, supposées à l'équilibre, en utilisant la somme des inventaires de leurs parcelles des plus jeunes précomptables au plus âgées et non pas des peuplements jardinés ou irréguliers à l'échelle infra-parcellaire. Ce qui explique le fait que les capitaux préconisés par ces normes soient nettement trop élevés, ne permettant pas un renouvellement diffus suffisant. Ces rectifications furent notamment formulées dans les années 1980, avec l'étude des futaies jardinées du Haut Jura (Herbert et Rebeirot, 1981). Cette dernière permit ainsi de rendre compte de la diversité des structures regroupées sous le terme de « futaie jardinée », et de créer une typologie permettant de les caractériser, d'anticiper leurs évolutions, les incidences de celles-ci, ainsi que de situer des fourchettes de capitaux et de structures permettant d'optimiser leur production.

De nos jours le jardinage a repris du terrain, de grandes surfaces forestières relèvent de ce traitement, notamment en forêt privée, là où le jardinage comtois est né, et dans les forêts communales du département du Jura. Cependant cela n'a pas partout été le cas : en 1991, 90 % des forêts résineuses du département du Doubs soumises au régime forestier l'étaient encore par la méthode de la futaie régulière. Quant à la forêt publique jurassienne, le poids de cette méthode historique a toujours été très fort, 75 % de la surface résineuse était jardiné lors de cette même période (Tyrode, 1991).

3. L'inventaire de régénération

3.1 L'objectif de l'étude

Comme il a été précisé plus tôt, la régénération n'est pas le seul critère de décision en martelage dans les futaies jardinées. Cependant, ce type de traitement repose entièrement sur une régénération naturelle résineuse continue et diffuse de qualité, ce qui pousse le sylviculteur à se projeter dans le très long terme et identifier les éventuels problèmes affectant les semis ou les perches. Peu d'ouvrages sur la futaie jardinée rendent compte des facteurs expliquant l'installation d'une régénération en quantité suffisante, ainsi que de bonne conformation. Le but principal de cette étude a donc été de tester l'impact de différentes variables stationnelles, structurelles, ou historiques sur les semis de sapin et d'épicéa. Cette démarche explicative a été couplée sur les forêts étudiées, à une prise de données relative à la gestion sylvicole.

3.2 Le choix des forêts étudiées

Pour cette étude de six mois, il a été décidé d'analyser deux forêts, de surface conséquente et bénéficiant d'un contexte stationnel différent (Figure 12). Cette option illustrative a été préférée à une prospection plus large, pour étudier d'une façon plus poussée chaque forêt et chaque situation. Enfin ces forêts devaient être gérées de longue date (au moins dix ans) par le cabinet d'expertise, pour observer les effets de ce type de traitement, et bénéficier de l'historique des interventions sylvicoles réalisées.

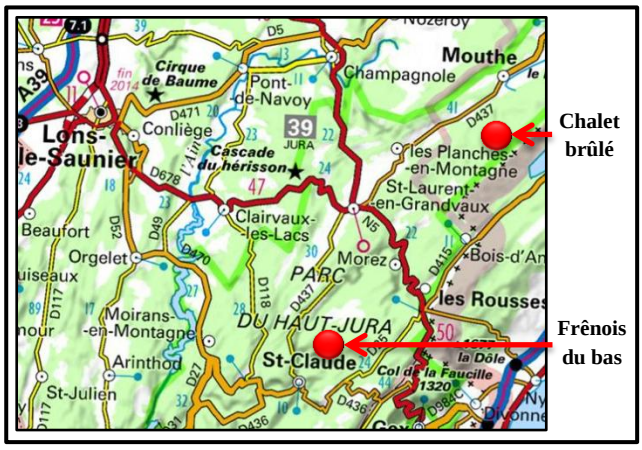


Figure 12 : Localisation de l'étude

3.2.1 Le Frênois du bas

L'inventaire a débuté sur le massif forestier du Frênois, au Nord-Est de la ville de Saint-Claude. Ce plateau accidenté globalement incliné vers le Nord-Ouest, se situe dans la région forestière naturelle du deuxième plateau du Jura. Le massif du Frênois fait cependant limite avec le Haut-Jura, avec une altitude dépassant tout de même les 1 100 mètres d'altitude. Au XIXe siècle, tout le massif appartenait à la famille du poète Lamartine, la forêt très claire à cette époque était alors parcourue par le bétail.

L'étude a été plus précisément réalisée sur l'ensemble d'une propriété de 103 hectares d'un seul tenant au Frênois du bas. Le cabinet d'expertise de Fabien Rebeirot en assure la gestion depuis 1994, dans le prolongement du traitement jardiné qui semble avoir été pratiqué dans cette forêt depuis la moitié du XXe siècle. Les morphologies karstiques sont très présentes avec d'importantes zones de lapiaz, des crêts, des combes et des barres rocheuses, ce qui conduit à une mosaïque de sols et de fertilités. Le sapin est bien représenté, occupant plus de la moitié de la surface terrière (Figure 13), le volume moyen à l'hectare est de 208 m^3/ha (volume commercial sous écorce), pour une surface terrière moyenne de 24 m^2/ha et une hauteur dominante de plus de 27 mètres. Le type de peuplement A (futaie jardinée équilibrée, 44 hectares) et le type C (futaie jardinée claire, 49 hectares) occupent plus de 90 % de la surface totale. L'importance du type C étant notamment due à des dégâts de tempête (1999) et aux attaques de scolytes qui les ont suivis.

Sur cette forêt divisée en huit parcelles, la rotation de coupe est de 8 ans. L'accroissement pouvant être estimé à 5m3/ha/an en volume commercial sous écorce, la possibilité annuelle moyenne indicatrice inscrite au PSG est de 350 m^3, en coupes de bois verts. Les coupes feuillues de bois de chauffage ont lieu dans les années qui suivent les coupes résineuses, tout comme les travaux sylvicoles (la mise en place a été tardive, seule certaines parcelles en ont déjà bénéficié).

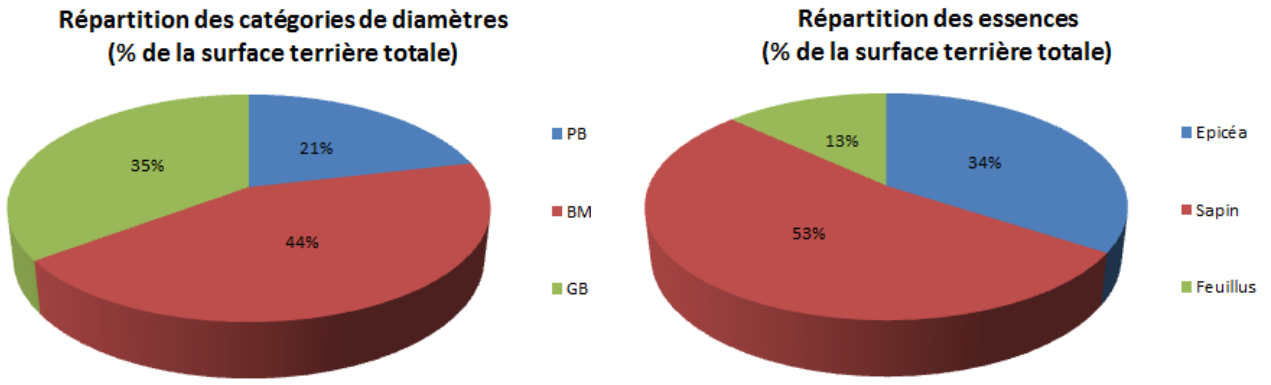


Figure 13 : Caractéristiques dendrométriques du Frênois du bas

3.2.2 Le Chalet brûlé

Avec la seconde forêt inventoriée nous quittons le département du Jura pour entrer dans celui du Doubs, plus précisément au Sud de Mouthe, sur la commune de Chaux-Neuve. La forêt du Chalet brûlé fait partie du grand massif forestier du Risoux, marquant la frontière avec la Suisse. Pour contraster avec le Frénois, tout ce massif est entièrement compris dans la région naturelle du Haut-Jura, avec pour le cas du Chalet brûlé, une altitude dépassant tout de même les 1 300 mètres.

Cette grande forêt de 400 ha, est gérée depuis 2001 par Fabien Rebeirot, mais a été jardinée depuis longtemps. En effet la propriété du Chalet brûlé a longtemps appartenu à la famille Jobez, que nous avons citée précédemment, sans prendre le temps de la présenter. Alphonse Jobez, maître de forges et maire de la commune de Syam, fit appel à Gurnaud, pour réaliser deux inventaires des forêts de la commune. Ceux-ci remirent en cause les coupes réalisées par l'Administration Forestière, et initièrent ce qui fut appelé « la guerre de Syam » dans l'histoire forestière (Gurnaud, 1885). En plus du tarif en « sylve » cette famille de forestiers, membre de la société du contrôle, inventa également le premier compas enregistreur, permettant de travailler seul en forêt. Les Jobez ont donc été des forestiers novateurs, qui ont pu mettre en pratique les principes de Gurnaud dans leurs grands domaines forestiers privés et notamment au Chalet brûlé.

Sur cette forêt, certaines problématiques sont bien différentes de ce que l'on a pu observer au Frênois. Du point de vue de la production tout d'abord, les accroissements sont plus faibles à cette altitude, notamment de par le fait que la saison de végétation est très courte (guère plus de 3 mois). Ainsi les rotations pratiquées actuellement sont de 10 ans. Minoritaire dans la forêt du Frênois, l'épicéa représente ici près de 70 % de la surface terrière (Figure 14), et les gros bois 46 %. Les types de peuplements sont eux-aussi singuliers, avec une forêt plus ouverte en raison de l'ancien pâturage des prés-bois.

Ces milieux ouverts participent à la richesse écologique, avec la présence d'une importante population de grand tétras, l'espèce « parapluie » emblématique des forêts jurassiennes. En plus des zones de laizines, cette forêt est marquée par le développement luxuriant des mégaphorbiais dans les zones de cuvettes, ce qui n'était pas le cas au Frênois. Les limons entraînés par la pente, les sels nutritifs de la roche, les débris de végétaux, ainsi qu'une bonne humidité, favorisent la croissance rapide de plantes telles que la laitue des alpes, les adénostyles et les pédasites. Ce jardin exubérant des sous-bois réduit grandement l'espoir de germination pour les essences forestières.

Enfin, le tourisme est bien développé sur tout le massif, avec de nombreuses pistes de ski de fond et de raquettes traversant la propriété. Avec le damage de ces pistes, la neige ne fond que très tardivement, et l'accès à la forêt n'est possible certaines années qu'à la fin du mois de mai.

L'objectif du propriétaire sur ces zones de prés-bois n'étant pas la colonisation forestière, mais à l'inverse relancer de nouveau le pâturage, ces milieux ouverts n'ont pas été inventoriés. De plus, l'étude s'est limitée aux parcelles inventoriées en plein et bénéficiant d'une description typologique des peuplements précise. Soit une surface inventoriée de 64 ha, dont les données dendrométriques sont présentées ci-dessous.

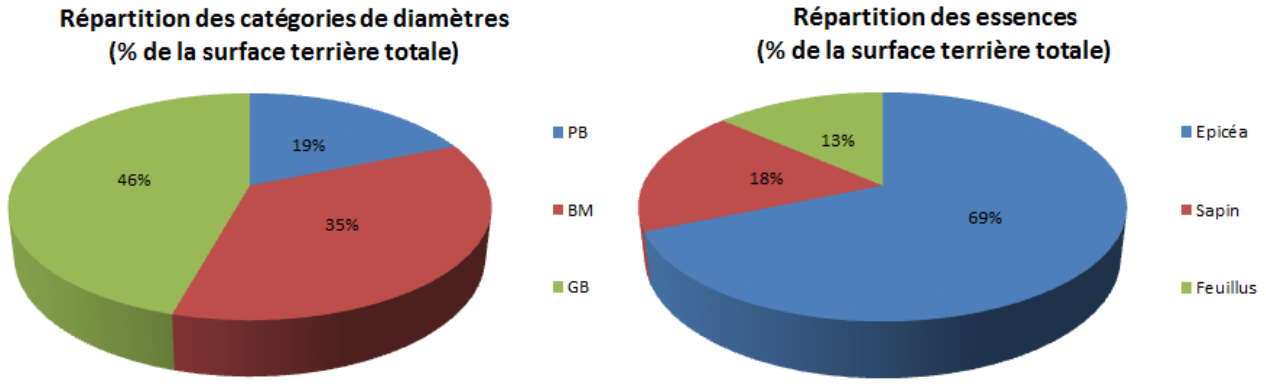


Figure 14 : Caractéristiques dendrométriques des parcelles inventoriées du chalet brûlé

3.3 Mise en place d'un protocole

3.3.1 La démarche suivie

La régénération naturelle résineuse du Haut-Jura ne bénéficiant jusqu'à présent d'aucun protocole d'inventaire, cette première partie demanda un certain temps avant de débuter la phase d'inventaire. Il a fallu tout d'abord bien définir la finalité de l'étude, revenant dans le cas présent à se poser la question suivante : Souhaitons-nous une image dendrométrique exacte de chaque forêt étudiée (démarche figurative), ou alors nous focalisons-nous plus précisément sur les facteurs explicatifs de la régénération naturelle (démarche explicative) ?

L'objectif principal de l'étude étant de distinguer les variables induisant un bon renouvellement, la démarche explicative a ainsi été privilégiée. Cependant, il a été également décidé de profiter de l'inventaire pour dégager certaines données dendrométriques nouvelles (aucun inventaire jusqu'à présent sur la forêt du Frénois), ou à titre de comparaison (présence d'inventaire en plein de la forêt du Chalet brûlé). La démarche suivie a donc été de coupler l'option explicative et l'option figurative.

La seconde étape de décision concernait le type d'inventaire. Celle-ci fut plus aisée à résoudre, en effet un inventaire en plein de la régénération se serait révélé très fastidieux, et peu adapté en comparaison d'un inventaire statistique. Nous avons donc opté pour ce dernier, se basant sur des échantillons de peuplement appelés placettes et sous-placettes. Historiquement et encore de nos jours dans de nombreuses forêts jurassiennes, les inventaires en plein font foi, représentant en quelque sorte le socle du traitement jardiné. La mise en place de cet inventaire statistique a donc permis de comparer les deux méthodes pour certaines variables telles que le nombre de tiges ou encore la répartition des classes de diamètres (paragraphe 5.3).

Suite au choix du type d'inventaire, le thème du suivi de l'évolution a été abordé. Il est toujours intéressant de bénéficier d'une image évolutive du milieu forestier, préférentiellement à une photographie figée. Les placettes permanentes donnent en effet accès à beaucoup plus d'informations lors des remesures sans pour autant posséder un coût bien plus élevé que des placettes temporaires (entre 5 et 10 %, d'après Bruciamacchie, 2014 ; voir paragraphe 5.3). Les placettes permanentes ont ainsi été matérialisées sur le terrain à la peinture, avec quatre arbres repères (azimut et distance), ainsi qu'un relevé GPS précis, la dalle affleurante ne permettant pas la mise ne place de tiges métalliques de localisation.

Il a ensuite fallu définir le plan, ainsi que l'effort d'échantillonnage. Pour le premier point un échantillonnage aléatoire systématique a été choisi de par sa facilité de mise en place et de réalisation sur le terrain. Le nombre de placettes aurait pu être défini à l'aide du coefficient de variation. Celui-ci étant compris entre 20 et 30 % pour la surface terrière en peuplement irrégulier (Bruciamacchie, 2014), cela consisterait d'après la formule simplifiée suivante (Figure 15), à réaliser entre 16 et 36 placettes, indépendamment de la surface pour un peuplement homogène et pour une erreur d'échantillonnage maximale de 10 %.

$$e_r = \sqrt{1-f}.\frac{t.CV}{\sqrt{n}} \longrightarrow e_r = \frac{t.CV}{\sqrt{n}}$$

Formule simplifiée

e_r : erreur d'échantillonnage

f : taux de sondage

t : valeur de la table de student pour $n-1$

CV : coefficient de variation

n : nombre de placettes

Figure 15 : Formule de l'effort d'échantillonnage

Cependant, la donnée principale récoltée étant le nombre de semis résineux et non pas la surface terrière, l'effort d'échantillonnage a dû être augmenté, du fait de la plus grande variabilité de ce paramètre (paragraphe 5.3). Un quadrillage d'une placette pour 1,2 ha environ a été mis en place sur les deux forêts, permettant d'inventorier un paramètre ayant un plus fort coefficient de variation.

Enfin, pour finir la démarche de définition du protocole, un type de placette a été choisi pour l'inventaire. De nombreuses formes de placettes sont possibles pour des inventaires dendrométriques : à surface fixe, à angle fixe, à angle fixe le long d'une ligne, PCQM, linéaires ou encore proportionnelles au volume. Le choix du type de placette revient en quelque sorte à définir le poids d'un arbre (Figure 16), c'est-à-dire le coefficient qui permettra de passer d'une information individuelle à une information à l'hectare, ainsi que de convertir une surface terrière en nombre de tige ou en un volume (Annexe 9)

$$p_i = \frac{10000}{surface} \qquad p_i = \frac{10000}{\pi R^2} \qquad p_i = \frac{10000.k^2}{\pi d_i^2}$$

Formule générale | Formule surface fixe | Formule angle fixe

p_i : poids d'un arbre

R : rayon de la placette (m)

k : coefficient relascopique

d_i : diamètre de l'arbre (m)

Figure 16 : Formule du poids d'un arbre

Pour la présente étude nous avons opté pour une combinaison entre surface fixe et angle fixe, similaire aux placettes de l'inventaire AFI (Figure 17). Les données relevant de la surface terrière étant mesurées sur une placette à angle fixe de 2 % (soit $g_i \times p_i = 1$) Tandis que celles concernant la valeur d'avenir sont relevées sur des sous-placettes à surface fixe de 10 mètres de rayon pour les perches ($p_i \approx 3{,}2$), et d'1,5 mètre de rayon pour les semis ($p_i \approx 141{,}5$).

Toutes ces informations étant plus détaillées dans la fiche protocole d'inventaire (Annexe 7 et 8). Le schéma suivant (Figure 18) récapitule la démarche entreprise pour la création du protocole.

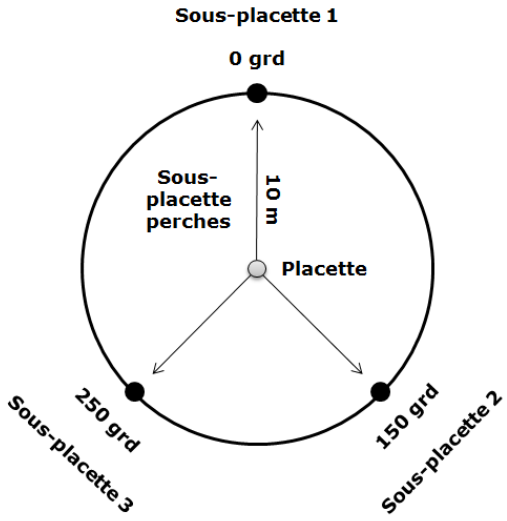


Figure 17 : Schéma de la placette d'inventaire

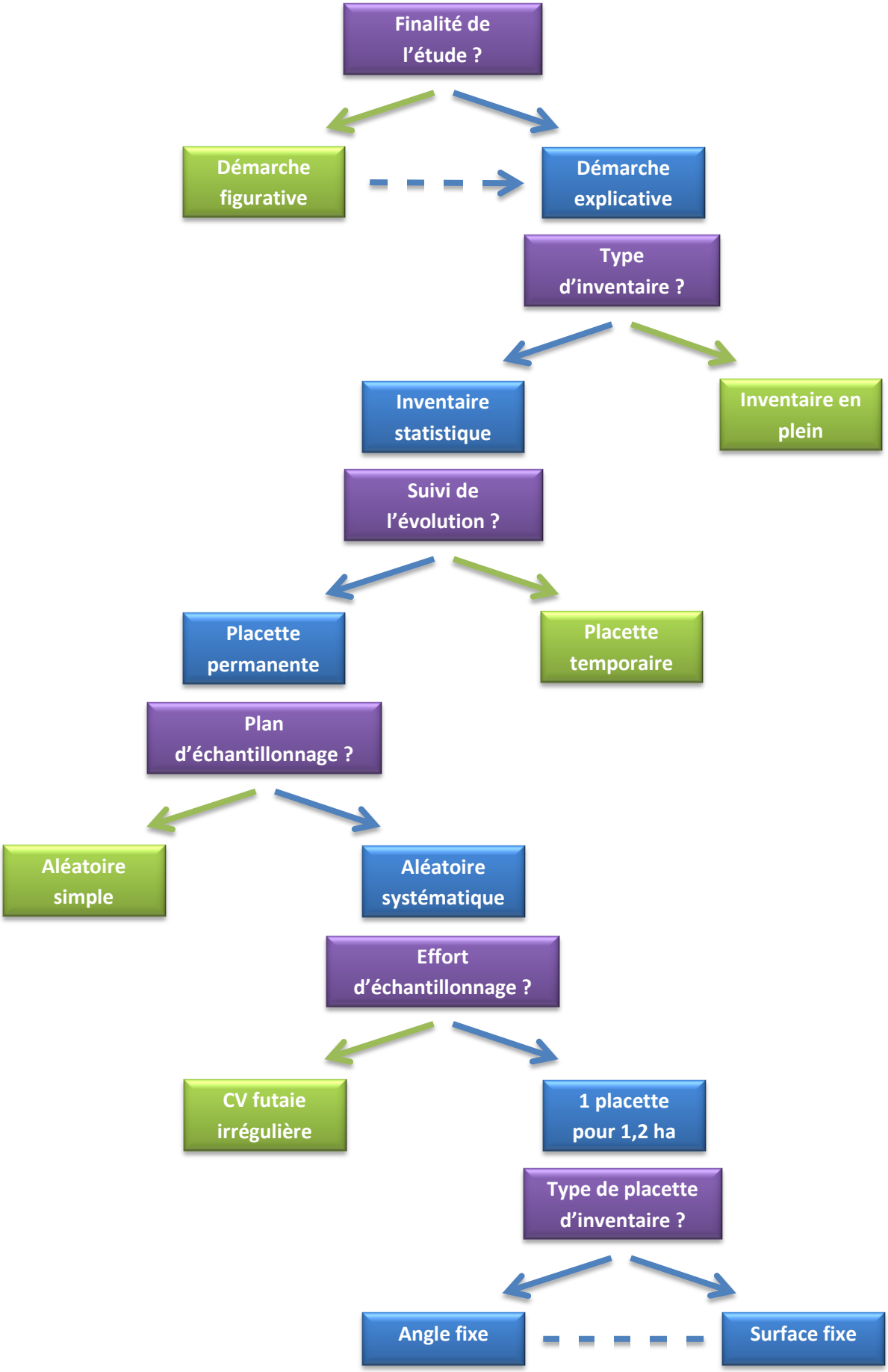


Figure 18 : Schéma récapitulatif de la démarche de construction du protocole

3.3.2 Les variables explicatives

Cette phase importante de la construction du protocole a été divisée en deux étapes. Premièrement, une étude bibliographique a permis de dégrossir les variables explicatives intéressantes pour l'étude de la régénération naturelle résineuse. Dans un second temps, ces variables ont été repositionnées dans le contexte Haut-Jurassien à l'aide de dires d'experts. Nous allons dans ce paragraphe lister les variables retenues, en les structurant en trois grandes catégories.

En premier lieu les variables stationnelles, relatives au milieu à proprement parler et non à l'action directe de l'homme. Ces paramètres physiques ou chimiques comprennent avant tout les facteurs géographiques, à travers l'altitude, la pente, l'exposition et la topographie. Ces éléments interviennent rarement de façon directe, mais ont néanmoins un rôle essentiel, conditionnant d'autres caractères stationnels (Thouvenin, 2000). Cette influence peut être observée notamment sur le type d'humus ainsi que le type de station, deux variables pouvant faire varier grandement le renouvellement résineux. Par exemple, la variante fraîche de la station hêtraie sapinière possède une capacité de régénération résineuse bien inférieure à la hêtraie sapinière typique (ONF, Orientation locale d'aménagement). Ces deux derniers critères ont déjà été amplement décrits précédemment (paragraphe 1.2.2 et 1.2.3), et peuvent être rattachés à une concurrence (muscinale, herbacée ou ligneuse) pour les semis, également annotée sur le terrain. Enfin un dernier point a été incorporé à ces variables, concernant les paramètres biotiques d'origine animale et notamment l'impact du gibier en forêt. L'implantation du cerf remonte aux années 50 dans le Jura, mais ce n'est que depuis une dizaine d'années que les populations entament une phase de croissance dynamique (150 plans de tir en 2011 sur le massif du Jura, d'après Forêt entreprise, N°211). En plus des cerfs, les chevreuils ainsi que les chamois peuvent causer des dégâts sur les semis et les perches résineuses, compromettant ainsi le renouvellement de la forêt.

Dans la bibliographie existante les données climatiques sont également citées en variable d'entrée pour les conditions stationnelles, notamment les précipitations et la température qui peuvent être des facteurs limitants (Thouvenin, 2000). Dans la présente étude, il a été décidé de rattacher ce point à la région naturelle, le deuxième plateau pour la forêt du Frênois et le Haut-Jura pour la forêt du Chalet brûlé.

Variables	Mesures	Echelle de relevé
Région naturelle	Deuxième plateau | Haut-Jura	Forêt
Altitude	GPS ou carte IGN	Placette
Pente	Clinomètre (en %)	Placette
Topographie	Crêt | Versant (+ expo) | Plateau | Combe	Placette
Type d'humus	Clé de détermination (Annexe 4)	Sous-placette
Type de station	Clé de détermination (ONF, Orientation locale d'aménagement)	Sous-placette
Concurrence muscinale	Echelle d'abondance-dominance	Sous-placette
Concurrence herbacée	Echelle d'abondance-dominance	Sous-placette
Concurrence ligneuse	Echelle d'abondance-dominance	Sous-placette
Impact du gibier	0 : nul ; 1 : traces ; 2 : marqué	Chaque semis

Figure 19 : Récapitulatif des variables stationnelles relevées

Les variables dites structurelles, c'est-à-dire intrinsèques au peuplement forestier vont être explicitées dans les paragraphes suivants. Issues de relevés dendrométriques, elles sont souvent les premières citées pour garantir une bonne régénération. En effet, la structure du peuplement, influençant certains facteurs écologiques tels que le rayonnement solaire direct, la température, l'humidité du sol ou encore la minéralisation des litières, participe au succès du rajeunissement naturel (Thouvenin, 2000).

Comme nous l'avons dit précédemment les futaies résineuses jurassiennes possèdent une typologie de peuplements très détaillée et pratique à utiliser. Cette typologie a donc servi de base pour les données structurelles collectées. Les informations de peuplements ont été analysées de deux façons, à l'arpentage avec les descriptions déjà existantes sur les deux forêts étudiées, mais aussi au niveau ponctuel pour chaque placette (de visu), certaines variations pouvant exister entre ces deux méthodes. Intimement liées au type de peuplement, les notions de densité, répartition d'essences ainsi que proportion de classes de diamètre, ont été décrites à l'aide de la surface terrière. Celle-ci fut mesurée avec un facteur unique (2%) et de façon précise (télémètre et compas), pour minimiser l'erreur de prise de donnée et pouvoir ainsi réaliser des transformations aboutissant à un nombre de tiges et un volume par hectare.

La quantité de lumière directe arrivant au sol a été analysée de deux manières. D'une façon classique en mesurant une hauteur dominante moyenne, mais également plus précisément en calculant le masque solaire de chaque sous-placette. Cet outil consiste à juxtaposer la course du soleil minimale et maximale durant la période de végétation avec la hauteur du couvert. Ceci nous permet d'obtenir un indice d'éclairement (Ie) représentant la moyenne quotidienne du pourcentage de temps de la période de végétation où le point étudié reçoit de la lumière directe (Pichery, 2001). Cette dernière donnée étant encore peu étudiée dans le milieu forestier une annexe lui est consacrée (Annexe 6).

Toutes ces données structurelles concernaient les arbres précomptables, il a également été annoté certaines informations sur les perches (densité, essence et hauteur) ainsi que sur la concurrence entre les semis. Ces informations peuvent en effet influencer grandement la régénération naturelle, ce qui est le cas par exemple d'une forte concurrence de perchis de hêtre réduisant grandement une possible installation de semis résineux (SFFC, 2010).

Variables	Mesures	Echelle de relevé
Type de peuplement	Typologie du Haut-Jura (Annexe 5)	Placette
Capital actuel	Surface terrière totale	Placette
Répartition des essences	Surface terrière par essences	Placette
Répartition des catégories de bois	Surface terrière par catégories	Placette
Hauteur dominante	3 plus gros arbres du tour relascopique	Placette
Luminosité	Masque solaire (150°-250°, pas de 10°)	Sous-placettes
Densité de perches	Nombre de tiges (classe 10 et 15)	10m de rayon
Répartition des perches par essence	SAP | EPI | HET | SYCO | SOR | Autres F	10m de rayon
Hauteur des perches	Moyenne par essence et par classe	10m de rayon
Concurrence entre semis bas	Echelle d'abondance-dominance / Essence	Sous-placettes
Concurrence entre semis hauts	Nombre / Essence	Sous-placettes

Figure 20 : Récapitulatif des variables structurelles relevées

Pour finir avec les variables explicatives sélectionnées pour la collecte des données sur le terrain, nous allons nous focaliser sur les variables sylvicoles historiques des peuplements étudiés. Partant du principe que la régénération en place à l'heure actuelle est fortement conditionnée par le capital forestier ancien, ainsi que les interventions sylvicoles passées, nous avons tenté de reconstituer une image des peuplements d'il y a 15 ans (date à partir de laquelle un historique des actions sylvicoles a été retrouvé).

Les semis résineux pouvant dans certains cas pousser de seulement quelques centimètres par an, la densité de couvert antérieur nous intéresse, pour analyser la présence de semis aujourd'hui. Pour cela nous avons tenté de retranscrire le plus précisément possible la surface terrière des années 2000. Les « arbres limites » lors du tour relascopique précédemment décrit sont ainsi soustraits à la surface terrière actuelle. A travers le terme « arbre limite » nous incluons tous les arbres présents actuellement dans la surface terrière mais qui ne l'auraient pas été il y a 15 ans (en retranchant l'accroissement individuel, d'après les temps de passages, Herbert et Rebeirot, 1985), c'est-à-dire les arbres passés à la futaie. Enfin pour arriver à une donnée valide il a fallu également ajouter à la surface actuelle toutes les souches coupées il y a moins de 15 ans et dont le diamètre estimé à 1,30 mètre ($dm_{souche} \times 0,82$, d'après Schaeffer, 1953) était suffisant pour entrer dans le tour relascopique en 2000. Le schéma ci-dessous retranscrit la démarche suivie (Figure 21).

Formule pour k = 2 %, avec :

Dm : diamètre moyen à 1m30 *Ac15* : accroissement de l'arbre en 15 ans *d* : distance entre l'arbre et le centre de la placette

Ds : diamètre moyen de la souche *AcX* : accroissement de l'arbre entre 2000 et l'année de coupe

Figure 21 : Reconstitution de la surface terrière de l'an 2000

Pour reconstituer cette surface terrière ancienne il faut donc connaître exactement l'historique des coupes par parcelles. Les données du sommier nous donnent également quatre informations intéressantes en terme d'intensité de coupe (volume résineux et feuillus prélevés) et de date depuis l'intervention (année depuis la coupe résineuse et depuis la coupe feuillue). Ses données ont également été analysées pour étudier une possible corrélation avec la régénération ou sa conformation.

Enfin, toutes les parcelles inventoriées n'ont pas fait l'objet de travaux dans les quinze dernières années. Cette donnée a elle aussi été relevée suite à l'analyse du sommier.

Variables	Mesures	Echelle de relevé
Capital ancien	Surface terrière des souches et arbres limites	Placette
Années depuis la coupe résineuse	Historique coupes	Sommier
Volume résineux prélevés sur la parcelle	Historique coupes	Sommier
Années depuis la coupe feuillue	Historique coupes	Sommier
Volume Feuillus prélevés sur la parcelle	Historique coupes	Sommier
Travaux sur la parcelle	Historique travaux	Sommier

Figure 22 : Récapitulatif des variables sylvicoles historiques relevées

3.3.3 Les variables à expliquer

Toutes ces variables explicatives ont été comparées à une quantité et une qualité de régénération naturelle résineuse, à travers huit variables à expliquer. Le renouvellement des peuplements a été divisé en trois classes, suivant leurs stades de développement. Les semis de moins de 50 cm de hauteur et les semis acquis (de plus de 50 cm de hauteur et moins de 7,5 cm de diamètre), étant mesurés par sous-placettes. Tandis que les perches (entre 7,5 et 17,5 cm de diamètre) le furent à l'échelle de la placette de 10m de rayon.

En premier lieu une corrélation positive ou négative a été analysée avec comme paramètre objectif une quantité de régénération de sapin ou d'épicéa. Pour éviter un comptage exhaustif des semis inférieurs à 50 cm de hauteur, l'appréciation de ceux-ci a été réalisée à l'aide de l'indice d'abondance dominance de Braun-Blanquet. Alors que les quantifications des semis acquis et des perches ont-elles été réalisées de façon plus précise pour obtenir un nombre par hectare (Annexe 7), qui a pu être comparé à un seuil de renouvellement ou de passage à la futaie minimum.

La quantité de régénération naturelle, est une information très précieuse pour le renouvellement en futaie jardinée. Cependant la quantité de semis ne suffit pas pour répondre à la question de la valeur potentielle d'une forêt. En effet, il peut être plus juste d'ajouter une notion qualitative à la régénération, celle-ci nous renseignant sur la vigueur individuelle des plants, sur leur forme, leur hauteur, mais aussi sur leur qualité potentielle. Il a ainsi fallu multiplier les observations sur les sapins et les épicéas pour mieux apprécier leur morphologie architecturale juvénile, d'autant plus que ce sujet n'est que très peu traité dans des articles scientifiques. Le sapin et l'épicéa possèdent certaines similitudes dans leur premier stade de développement. La présence de verticilles (ensemble d'organes insérés en cercle au même niveau autour d'un axe), en est une première illustration. La longueur entre chaque verticille représente la pousse d'une année, et illustre donc la vigueur du plant. La principale difficulté revient donc à bien identifier les verticilles, d'autant plus que ces deux essences, lorsqu'elles sont juvéniles, peuvent développer des rameaux inter-verticilles. Dans certaines situations, telles qu'une forte concurrence pour la lumière, la présence de brins frotteurs ou encore une pression cynégétique forte, ces accroissements annuels peuvent être malheureusement indifférenciés. Le nombre de divisions des rameaux horizontaux, ainsi que la différence de teinte entre les aiguilles (les plus récentes étant plus claires), peuvent faciliter l'observation. Il a été constaté que le sapin produisait des verticilles de 1 à 6 rameaux, et l'épicéa de 4 à 6 rameaux, cette variable semblant augmenter avec la quantité de lumière perçue (Annexe 1). La forme des semis est aussi une donnée intéressante, renseignant sur les conditions de croissance. Elle peut être résumée en trois grandes catégories (Grouallé et Minot, 1989), néloïde, conique, ou ovoïde (Annexe 2). Les variables de hauteur, vigueur, qualité et forme, ont par la suite été moyennées par sous-placette.

Variables	Mesures	Echelle de relevé
Quantité de semis résineux bas	Echelle d'abondance-dominance / Essence	Sous-placette
Quantité de semis résineux hauts	Nombre / Essence	Sous-placette
Hauteur de semis résineux hauts	Hauteur jusqu'au bourgeon terminal	Sous-placette
Vigueur de semis résineux hauts	Longueur des 5 derniers accroissements	Sous-placette
Qualité de semis résineux hauts	Classe AFI (A | B | C | D)	Sous-placette
Forme de semis résineux hauts	Conique | Néloïde | Ovoïde	Sous-placette
Quantité de perches résineuses	Nombre / Essence	10m de rayon
Qualité de perches résineuses	Classe AFI (A | B | C | D)	10m de rayon

Figure 23 : Récapitulatif des variables à expliquer relevées

4. Résultats d'inventaire et commentaires

Dans ce chapitre, nous allons analyser les résultats obtenus sur les trois catégories de régénération précédemment décrites (semis bas, semis hauts et perches). Différents tests statistiques ont été réalisés pour étudier ce jeu de données, caractérisé par des variables quantitatives ou discrètes, issues des placettes ou des sous-placettes, ainsi que de deux régions naturelles différentes (Annexe 13). Tout cela participe à une quantité importante d'indicateurs, ne pouvant pas être tous analysés dans ce rapport. Seulement les résultats les plus significatifs et sylvicolement intéressants seront donc détaillés, en insistant dans la première partie (4.1) sur les méthodes statistiques utilisées.

4.1 Résultats globaux sur l'ensemble des deux forêts

4.1.1 Bilan dendrométrique

Avant de se lancer dans l'analyse statistique, un bilan dendrométrique des deux forêts réunies (Figure 24) peut être utile pour se représenter le contexte forestier de la zone d'étude. Ces premières statistiques descriptives reflètent un état jardiné pour des futaies résineuses jurassiennes. Elles seront également détaillées par massif inventorié dans les prochains paragraphes (4.2 et 4.3).

Var	G_{2014} (m²/ha)		V (m³/ha)		Tiges (N/ha)		Hdom (m)	Perches (N/ha)	Sapin (% G_{2014})	Epicéa (% G_{2014})	PB (% G_{2014})	BM (% G_{2014})	GB (% G_{2014})	G_{2000} (m²/ha)
	Total	Résí.	Total	Résí.	Total	Résí.								
Moy	24	21	200	175	281	220	27	192	39	47	20	40	40	22
Min	8	8	65	65	65	56	21	0	0	0	0	11	0	8
Max	37	36	318	312	566	483	33	669	89	100	58	70	89	40
CV (%)	24,8		25,7		34,1		9,2	65,5	65,2	55,1	53,7	28,9	39,0	23,9

Figure 24 : Bilan dendrométrique sur les deux forêts

4.1.2 Liaison linéaire simple

La principale variable à expliquer étant **la quantité de semis résineux acquis** (> 50 cm de hauteur), nous allons donc étudier dans un premier temps sa corrélation linéaire avec la variable prédictive qui résume le mieux la structure du peuplement : **la surface terrière totale**.

Le facteur ainsi que la réponse étant des variables continues, une régression linéaire peut être menée. La quantité de semis hauts ne suivant pas une loi normale (Figure 25), la corrélation sera appréciée avec le coefficient de Spearman.

Le nuage de points (Figure 26) nous invite à ne pas pousser très loin l'analyse de la liaison linéaire entre ces deux paramètres. La tendance générale se rapproche d'une corrélation négative, ce qui est confirmé par la ligne des moindres carrés (verte), ainsi que par le coefficient de corrélation de Spearman (r^2 = - 0,26). Mais cette liaison est moyenne et ne peut être expliquée uniquement par une régression linéaire simple.

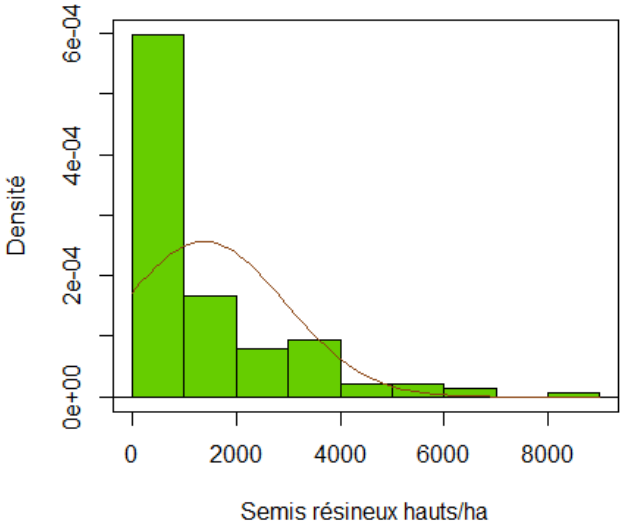


Figure 25 : Histograme des densités pour les deux forêts, superposé avec la courbe de densité de la loi normale

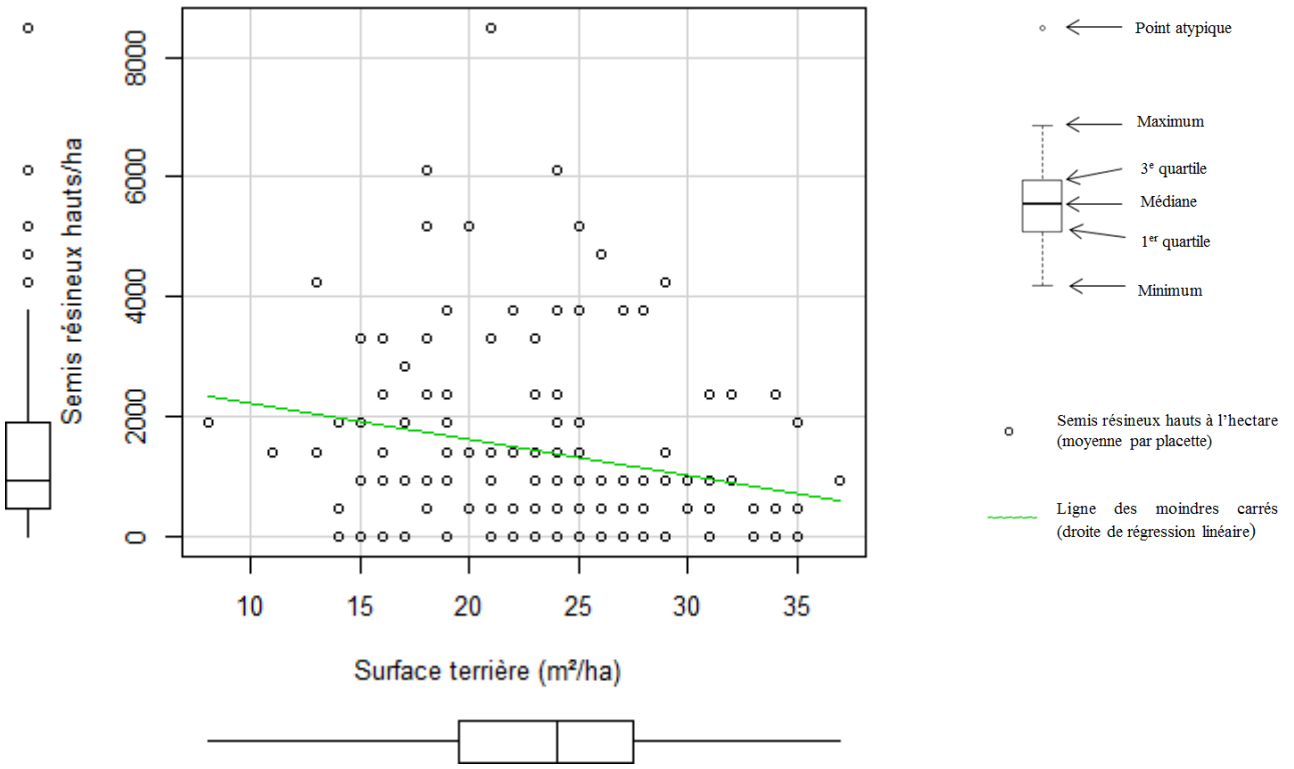


Figure 26 : Nuage de points des semis résineux acquis en fonction de la surface terrière totale pour les deux forêts. Les diagrammes en boîtes nous renseignent sur la répartition des deux variables

Malgré tout, certaines informations peuvent être tirées de ce premier graphique. Comme on pouvait le prédire, une forte densité de couvert est plus préjudiciable à la régénération naturelle qu'une situation de milieu plus ouvert. La surface terrière n'est pas la seule variable exogène de structure de peuplement influençant négativement les semis résineux, il en est de même pour le volume (r^2 = - 0,23) et le nombre de tiges (r^2 = - 0,14). Mais c'est bien la surface terrière qui explique la plus grande proportion de variabilité du nombre de semis résineux hauts.

Nous pouvons ensuite observer qu'à partir de 14 m²/ha de surface terrière, des placettes sans aucune régénération résineuse sont présentes assez régulièrement (14 % du nombre total de placettes). Ceci nous montre bien que d'autres variables entrent en jeux dans la régénération naturelle, qui peuvent être plus limitantes que la surface terrière. Cependant, bien qu'en faible densité, les placettes les plus pourvues en semis résineux hauts (> 2 000 semis/ha), ont quasiment toutes été observées entre 15 et 30 m²/ha de surface terrière. Il est trop tôt pour en tirer des conclusions, cependant cet intervalle ressemble bien à une fourchette de densité favorable à la présence de régénération acquise. Ceci n'est pas une découverte sylvicole, étant admis qu'une surface terrière supérieure à 30 m²/ha est trop élevée pour le renouvellement en futaie jardinée (Herbert et Rebeirot, 1981). La limite basse est tout de même intéressante, et il sera étudié par la suite si une surface terrière inférieure à 15 m²/ha coïncide avec une concurrence ligneuse ou herbacée forte.

Enfin, une placette est « atypique », surpassant le niveau moyen de régénération, avec plus de 8 000 semis résineux hauts par hectare. Tellement atypique, qu'elle mérite qu'on la présente en quelques lignes. Il s'agit d'une situation de second plateau, avec une surface terrière entièrement résineuse de 21 m²/ha (à 81 % composée épicéa), majoritairement répartie dans les gros bois (57%), ce qui explique que le nombre de tiges/ha de 171, soit nettement inférieur à la moyenne. Le principe d'alternance du renouvellement est bien représenté ici, plus de 70 % des semis hauts étant des sapins, ainsi que 85 % des perches (elles aussi en grande quantité, 414 tiges/ha). Pour autant, une quantité de régénération si importante n'est pas une situation souhaitable en futaie jardinée. Ceci suppose le plus souvent, que la placette se situe en dessous d'un niveau capital productif. De plus le coût des travaux (dépressage) sera plus élevé avec la présence d'autant de semis résineux. Bien heureusement cette situation est exceptionnelle.

4.1.3 Matrice des corrélations

Pour étudier les liaisons deux à deux entre les variables quantitatives, la matrice de corrélation permet une lecture rapide des coefficients de Spearman. Dans un premier temps, nous allons nous pencher sur ce tableau pour les variables stationnelles, récoltées à l'échelle de la placette (Annexe 10), ainsi que celles des sous-placettes (Annexe 11).

Commençons par **l'altitude**, qui permet en fait de différencier les deux forêts (1000 m < Frênois < 1150 m ; 1300 m < Chalet brûlé < 1400 m), et ainsi la situation de second plateau de celle du Haut-Jura. Pour les semis de moins de 50 cm feuillus, une bonne corrélation est observée avec l'altitude (r^2 = 0,65, notamment expliquée par la présence de hêtre). Il en est de même pour les semis acquis feuillus (r^2 = 0,37), avec une bonne corrélation des sorbiers et des érables sycomores. Cette présence plus marquée sur le Haut-jura, correspondant parfois aux stations « hêtraie à érables » des altitudes supérieures à 1200 m, ce qui a en effet pu être observé sur le terrain. Ceci est moins marqué au niveau des perches, certainement le résultat des travaux forestiers. A l'inverse les résineux se régénèrent moins en altitude (r^2 = - 0,41 pour les semis hauts et r^2 = - 0,31 pour les perches), ce qui s'explique surtout par la faible représentation du sapin par rapport au second plateau (r^2 = - 0,54 pour les semis sapin hauts et r^2 = - 0,58 pour les perches sapin). Les données de sous-placettes nous montrent que les semis de sapin acquis, contrairement à ceux d'épicéa, éprouvent plus de difficultés en altitude pour leurs accroissements en hauteur (r^2 = - 0,32) ce qui conditionne leur hauteur totale (r^2 = - 0,37). Enfin, aucune corrélation n'est observable entre les dégâts de gibiers et l'altitude. Toutes ces analyses en rapport avec l'altitude, étant comme nous l'avons dit précédemment comparable à une variable discrète, seront illustrées dans le paragraphe suivant (4.1.4, Figure 30).

L'indice d'éclairement, bien que dépendant grandement de la structure et du capital du peuplement, peut tout de même être analysé ici. Nous pouvons observer que la variable la plus liée à celui-ci est la présence de semis résineux haut (r^2 = 0,23), cet indice ayant une plus grande influence sur les épicéas (leur quantité, leur hauteur totale et leur hauteur d'accroissement) que sur les sapins. Ceci corrobore le fait que l'épicéa est plus héliophile que son concurrent résineux.

La troisième et dernière variable exogène quantitative concerne **la pente**. Peu de corrélation peut être décrite ici, hormis avec les semis d'épicéa de moins de 50 cm de hauteur (r^2 = - 0,28). Il est à souligner que les situations de pente, correspondant à des topographies de versant, sont caractérisées à 84 % d'entre elles par des expositions Nord (Figure 28). Une situation de pente sur un versant nord semble donc préjudiciable à l'essence résineuse demandant le plus de lumière, notamment lors de ses premiers stade de développement.

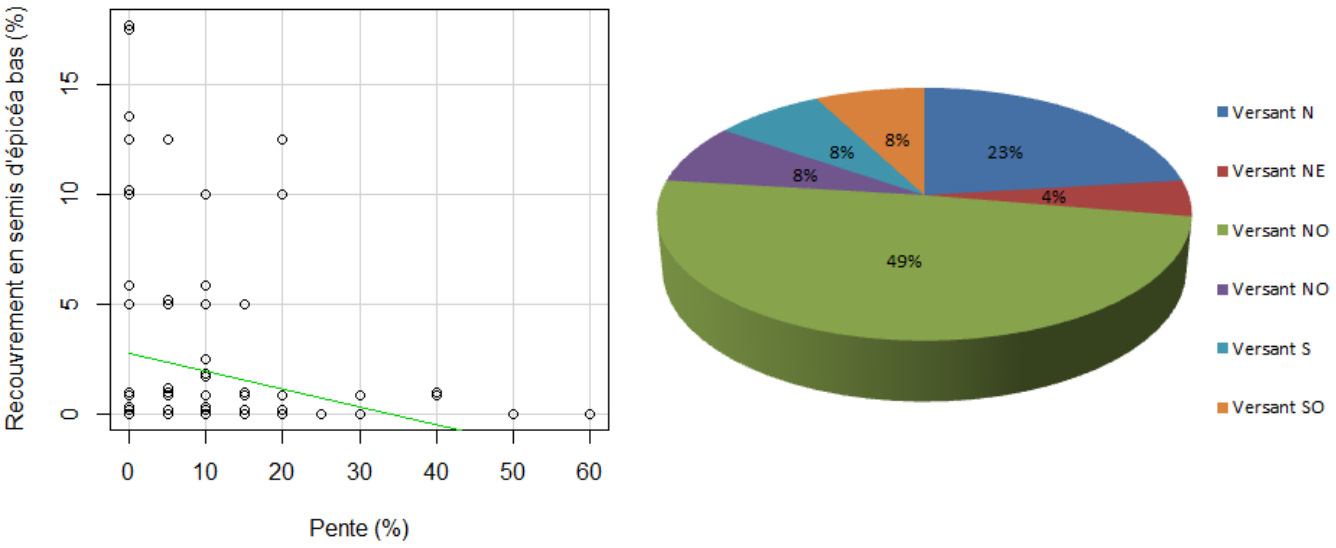


Figure 28 : Semis résineux bas en fonction de la pente et répartition des situations de versant sur les deux forêts étudiées

Dans un second temps, nous allons étudier les variables de structure de peuplement qui ont déjà quelque peu été évoquées avec **la surface terrière** (paragraphe 4.1.2). Nous pouvons rajouter que celle-ci influence en égale proportion les semis hauts d'épicéa et de sapin (r^2 = - 0,21). L'augmentation de la surface terrière a un effet négatif sur la grande majorité des indicateurs de régénération, cependant d'autres liaisons doivent entrer en jeu, les corrélations étant globalement faibles. Pour le second indicateur de densité de peuplement, **le nombre de tiges par hectare**, les liaisons vont dans le même sens hormis le fait que cet indicateur est plus limitant pour les semis hauts feuillus que ceux résineux.

La hauteur dominante, traduit d'assez près la fertilité de la station. Cependant, ce paramètre est peu variable sur les deux forêts (CV = 9 %), il se révèlera donc difficile d'expliquer la régénération à l'aide de celui-ci. Malgré tout une hauteur dominante forte semble limiter le recouvrement des semis de hêtre (r^2 = - 0,18) ainsi que la présence de perches et notamment les perches résineuses (r^2 = - 0,20).

Enfin, pour ce qui est de **la concurrence entre la régénération**, il n'y a guère d'allélopathie à signaler entre semis et perches, au contraire, les épicéas et les sapins se régénèrent bien sous des semis ou des perches de la même espèce (Figure 29).

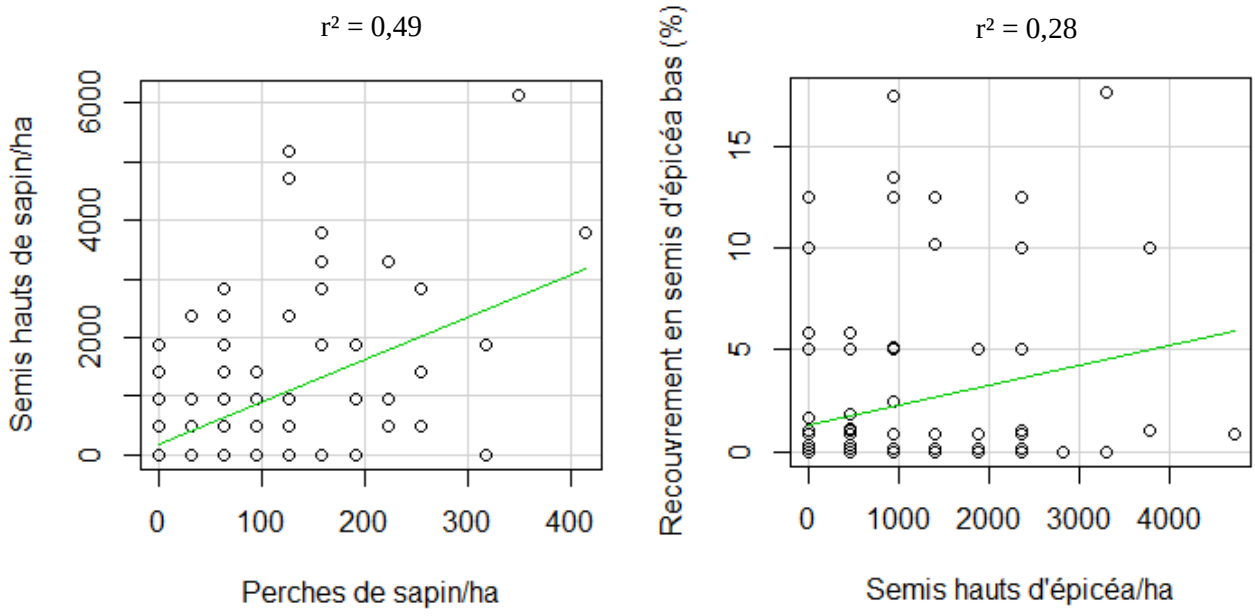


Figure 29 : Régénération sous couvert de la même espèce

Les données de **répartition en essence**, en **catégorie de bois** ainsi que **les données historiques** seront traitées séparément par forêt. La corrélation entre la régénération et ces données peut venir du fait qu'elles sont-elles même liées à une troisième variable, l'altitude. Par exemple, les semis feuillus bas sont fortement corrélés négativement avec le pourcentage de surface terrière occupé par les sapins (r^2 = - 0,49). Or l'altitude est elle-même fortement liée avec la présence de sapin dans la surface terrière (r^2 = - 0,51). On peut donc se demander si ce n'est pas cette forte liaison qui augmente la corrélation entre « bas.feu » et « Gsap ». Cette hypothèse est vérifiée avec le coefficient de corrélation partielle, qui permet de supprimer l'influence de la troisième variable et qui ramène dans le cas présent à un r^2 = - 0,26. La forêt d'altitude étudiée possédant plus d'épicéa, mais aussi plus de gros bois ainsi qu'un historique particulier, il aurait été trop fastidieux d'utiliser les coefficients de corrélation partielle, le choix a donc été fait d'analyser tout ceci par forêt (paragraphes 4.2 et 4.3).

4.1.4 Boîtes de dispersion (cf. légende à la figure 26)

Pour illustrer les facteurs discrets, quelques boîtes de dispersion ont été conçues, permettant de visualiser certaines liaisons. Déjà décrite à travers la variable altitude (paragraphe 4.1.3), **la région naturelle** semble être un des premiers facteurs faisant varier la régénération. Ne bénéficiant que d'une forêt pour chaque région naturelle, les conclusions ne seront pas étendues à tout le Jura, mais elles donnent déjà une tendance pour le renouvellement forestier. Les huit graphiques suivant (Figure 30) mettent en lumière les précédentes interprétations de la variable altitude.

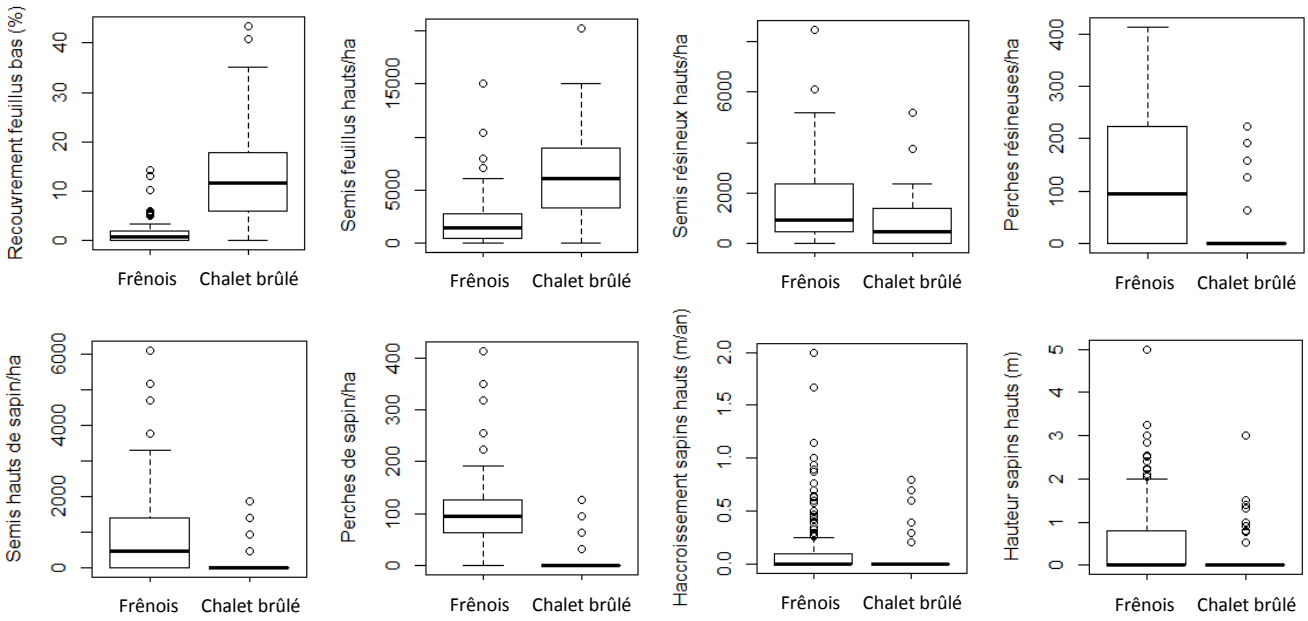


Figure 30 : Représentation de données de régénération en fonction du facteur « région naturelle »

Pour continuer sur les facteurs stationnels, **l'aspect pédologique** peut être mis en relation avec la régénération. Les graphiques de la Figure 31 nous donnent donc quelques clés d'interprétation, les informations les plus intéressantes ayant été mises en valeur par la couleur verte. Les deux premières boîtes de dispersion nous montrent que les semis résineux hauts ont été plus rencontrés sur des sols pauvres à humus de type Mor ou Moder, alors que les feuillus se sont révélés aussi très présents sur des sols riches de type Mull. Nous allons finir sur les facteurs de station, avec la concurrence directe envers la régénération. Celle qui porte le plus préjudice aux semis résineux se révèle être **la concurrence herbacée**, devant les ligneux et les mousses. Nous pouvons ainsi observer que plus la présence d'herbacées est forte moins les semis se développent, avec notamment un palier entre l'indice 2 et 3 (Echelle d'abondance-dominance), correspondant à un recouvrement plus de 25 %.

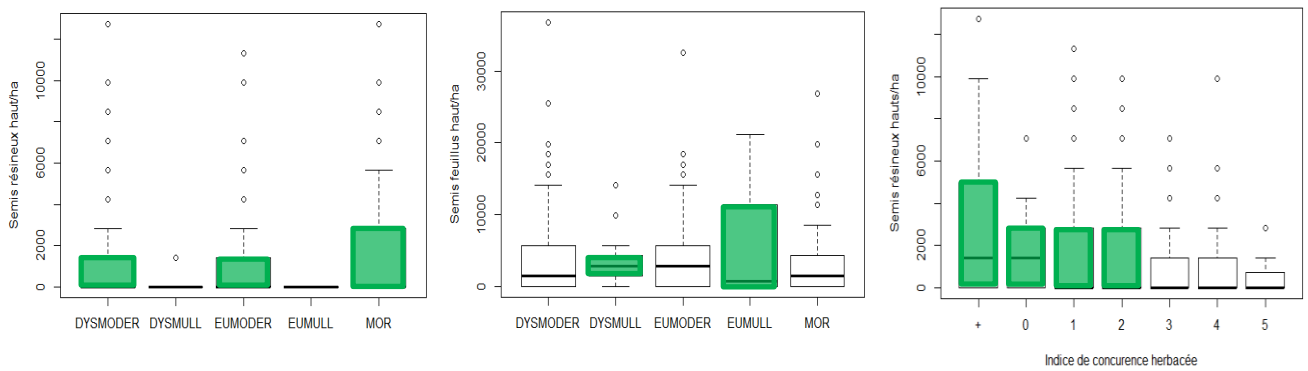


Figure 31 : Représentation de données de régénération en fonction de l'humus et de la concurrence herbacée

En utilisant la typologie de peuplement des futaies résineuses jardinées jurassiennes (Annexe 5), nous bénéficions également d'un facteur discret pour **le type de peuplement**. Les graphiques en « boîte à moustache » suivants (Figure 32), nous donnent quelques informations. A savoir que les semis résineux, acquis ou non, se développent plus abondamment dans des peuplements jardinées (A, B et C), notamment dans les futaies jardinées claires (C), tout en n'y étant pas trop concurrencés par une abondante régénération acquise feuillue (surtout dans les peuplements A et C). Les peuplements G, c'est-à-dire les futaies résineuses très claires possèdent en moyenne également un bon renouvellement résineux, mais celui-ci est fortement concurrencé par une grande quantité de semis acquis feuillus. Pour les semis feuillus, une forte présence peut être également remarquée dans les structures régularisées (E et F), avec un maximum pour les futaies régularisées dans les bois moyens. Le type de peuplement semble donc moins entrer en compte pour les feuillus que les résineux. Aucune information ne peut être soutirée du peuplement D, étant trop faiblement représenté dans les forêts étudiées (seulement une placette, soit 0,72% de l'échantillon).

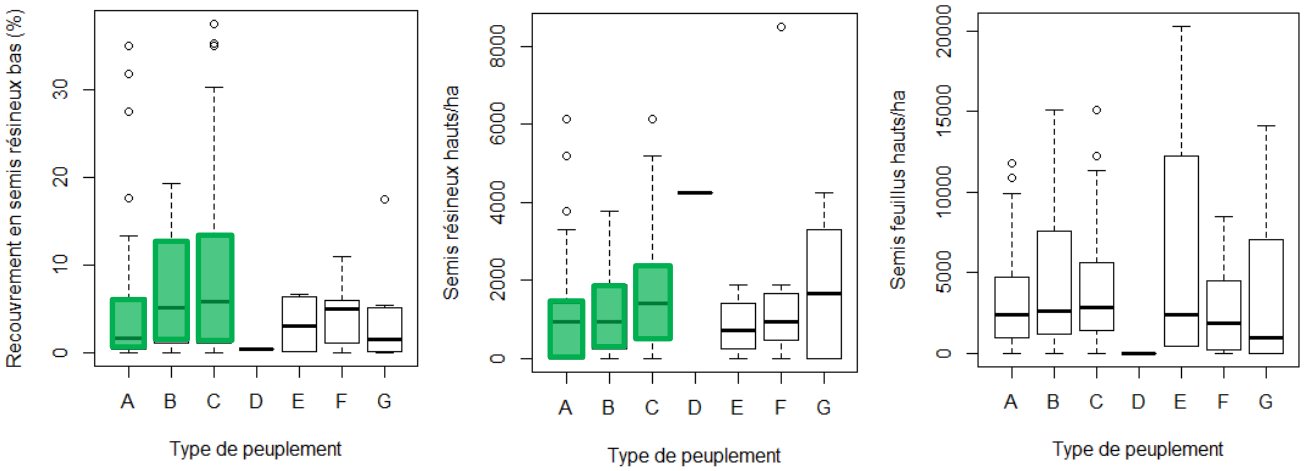


Figure 32 : Représentation de données de régénération en fonction du facteur « type de peuplement »

L'un des intérêts de cette étude est de s'intéresser également à la qualité de la régénération, nous allons donc continuer avec **les facteurs de forme** et de **qualité du renouvellement**. Dans la première boîte de dispersion (Figure 33), on peut voir que la qualité des semis acquis d'épicéa varie positivement avec l'indice d'éclairement. Les qualités A et B de cette essence définitivement héliophile, sont plus représentées pour Ie > 10 %. Néanmoins, l'Indice d'éclairement ne renseigne que sur la lumière directe, or certaines essences comme le hêtre, permettent un rayonnement diffus sous son couvert, comme l'illustre le second graphique. Les épicéas adapteraient leur physionomie en formant de plus longs entre-nœuds lorsque la part de hêtre augmente dans la surface terrière. Ainsi les semis de forme néloïde sont plus rencontrés autour d'une proportion de feuillus d'environ 18 %, tandis que les semis ovoïdes sont fréquents avec moins de 10 % de feuillus dans la surface terrière Pour finir l'aspect qualitatif des sapins peut aussi être associé à la structure du peuplement. Les perches de cette essence perdraient en qualité avec l'augmentation du volume sur pied.

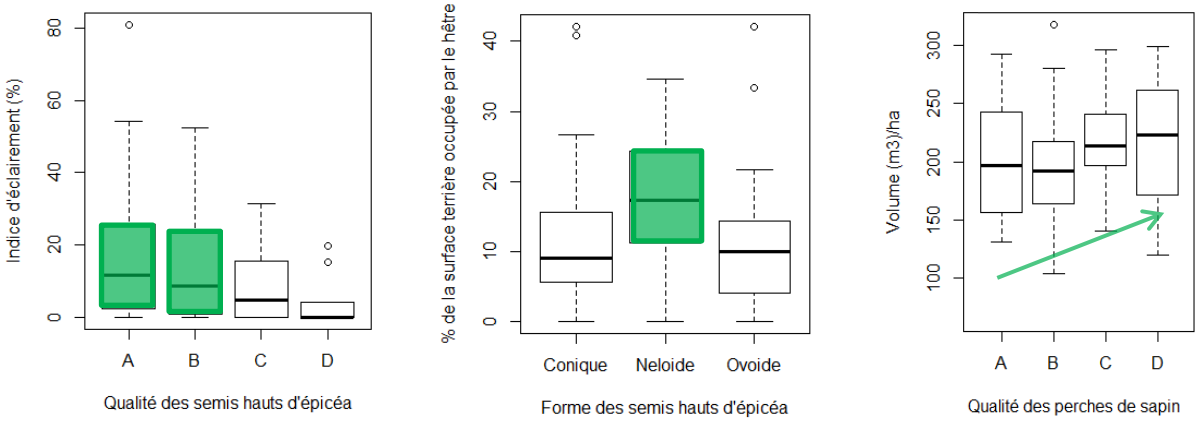


Figure 33 : Représentation de données structurelles en fonction des facteurs de qualité et de forme de la régénération

Avant de passer à l'analyse multivariée, nous allons terminer les liaisons deux à deux sur les notions de **vigueur des semis résineux**, et plus précisément sur la hauteur d'accroissement de ces derniers (Figure 34). Cette catégorie de variable de réponse aurait très bien pu être étudiée à l'aide d'une analyse multicritère, de par le fait que plusieurs variables participent à sa variation. Néanmoins, il a été décidé de l'analyser à l'aide de boîtes de dispersion, favorisant ainsi l'obtention de données quantitatives et de seuils, ce qui aurait été plus difficile en analyse multifactorielle. Cette variable de hauteur d'accroissement se rapproche de celle de forme des semis, précédemment citée. Elle possède cependant l'avantage d'être quantitative, et même si nous allons la discrétiser pour en faciliter l'analyse, les classes qui en ressortiront auront tout de même plus de sens que les trois types de formes de semis.

Les hauteurs d'accroissement des cinq dernières années ont été notées sur chacun des semis résineux hauts. Pour les semis de qualité D (« nul, sans avenir, de mauvaise qualité ») la hauteur d'accroissement a été fixée à 0, car celle-ci était difficilement observable. Pour chaque sous-placette possédant des semis résineux hauts, une moyenne des hauteurs d'accroissement a été calculée ce qui a donné les résultats suivants.

Figure 34 : Photo d'un accroissement en hauteur d'un épicéa

En moyenne et sur les deux forêts, les semis ont poussé en cinq ans de 33 cm soit un accroissement de 6,7 cm/an. La pousse est un petit peu plus forte au Frênois (différence de 3,5 cm). La hauteur d'accroissement la plus élevée a été observée sur un semis d'épicéa ayant poussé de 3 mètres en cinq ans, dans des conditions très favorables (Indice d'éclairement de 44 %). La répartition de ces valeurs d'accroissement peut être analysée à l'aide du diagramme en barres utilisé pour la création des classes (Figure 35). Au niveau des essences, c'est en moyenne le sapin qui réalise les plus grands accroissements (41 cm en cinq ans, contre 27 cm pour l'épicéa).

La variable mesurée influençant le plus les hauteurs d'accroissement, est l'indice d'éclairement. D'après le second graphique de la figure 35, environ 50 % des sous-placettes ayant le meilleur accroissement (entre 45 cm et 2 m) bénéficient d'un indice d'éclairement supérieur à 15 %. Alors que 100 % des sous-placettes (hormis les sous placettes « atypiques ») ayant le plus faible accroissement (moins de 15 cm) sont caractérisées par un Indice d'éclairement inférieur à 10 %. Un gradient est également clairement observable sur ce graphique (flèche verte). Pour faire un lien avec la gestion, le volume total à l'hectare peut être croisé avec la hauteur d'accroissement des semis de sapin. Un gradient est également observable, plus le volume diminue, plus les semis réalisent de grands accroissements, nous pouvons relever que les plus longs accroissements ont été bien souvent observés pour un volume inférieur à 175 m^3/ha.

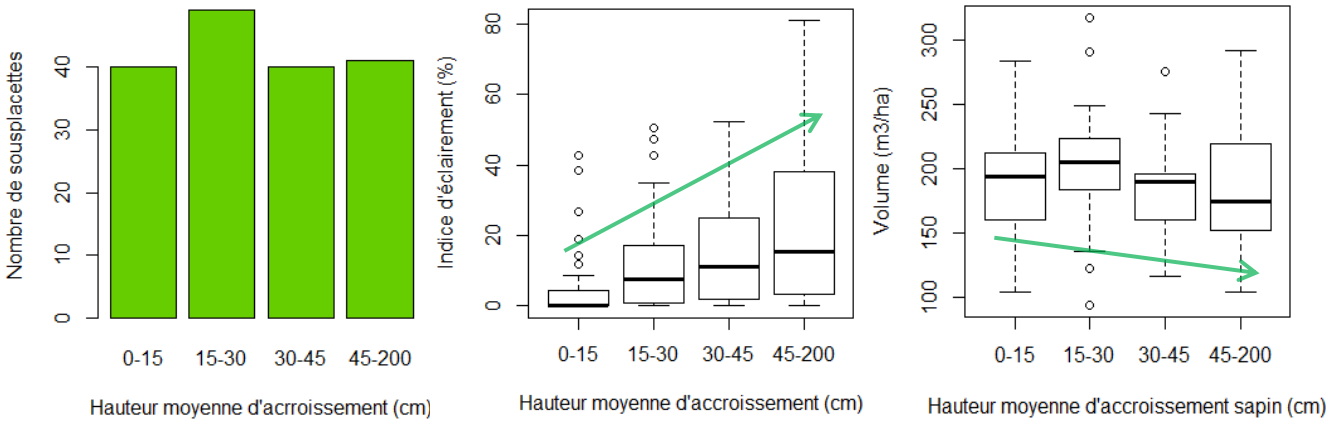


Figure 35 : Diagramme en barres de répartition des classes, et boîtes de dispersion sur l'accroissement en hauteur

4.1.5 Analyse multivariée

Comme nous avons pu le voir dans les paragraphes précédents, le nombre de variables est très élevé (58 pour les placettes et 78 pour les sous-placettes). L'étude de chaque variable deux à deux est longue, et incomplète, c'est la raison pour laquelle nous nous sommes tournés vers l'analyse multifactorielle pour synthétiser l'information. Cet outil repose sur un examen de l'interdépendance entre toutes les variables, et permet de représenter dans plusieurs dimensions la distance entre les individus ainsi que la distance entre les variables. Pour cette étude, les individus étant les placettes ou bien les sous-placettes, l'analyse de la distance entre celles-ci se révèlera peu intéressante, hormis lorsqu'elles seront analysées par groupes.

Parmi les analyses multivariées, l'ACP est la méthode descriptive pour les variables quantitatives. La première représentation ci-dessous (Figure 36), confirme les tendances décrites dans l'analyse linéaire. A savoir, que les semis hauts ou bas, de sapin ou d'épicéa sont plus présents dans des situations de faible **surface terrière**. Ainsi que dans des **pentes** peu importantes, elles-mêmes corrélées à un **indice d'éclairement** fort. Les semis de sapin acquis sont bien installés sous les perchis de sapin, tandis que les semis bas d'épicéa sont corrélés aux semis hauts de cette même essence. De façon générale le renouvellement en sapin est plus fort en basse **altitude** (forêt du Frênois), alors que l'épicéa est bien représenté sur la haute chaîne (forêt du Chalet brûlé). Le tableau de description des dimensions (Figure 37), quantifie ces relations, en nous renseignant sur la corrélation entre ces dix variables quantitatives et les deux dimensions choisies.

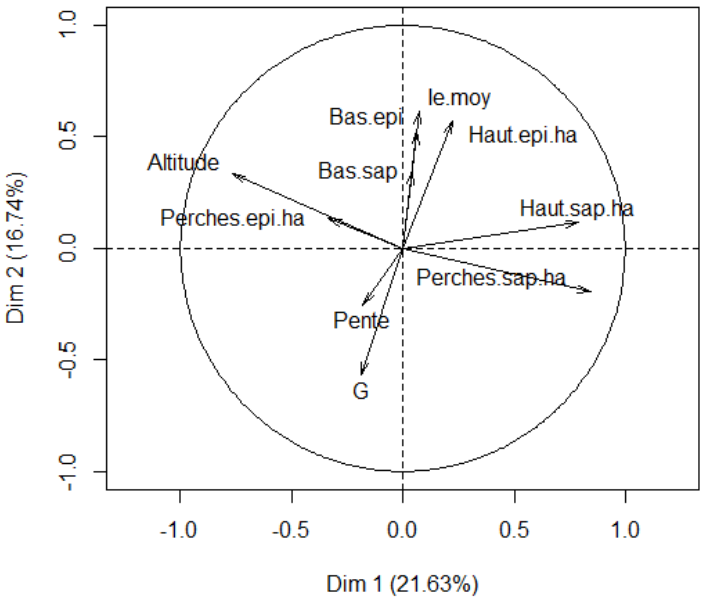


Figure 36 : Graphique des variables (données placette)

Enfin, l'analyse des graphiques des individus, groupés par **région naturelle** ainsi que par **type de peuplement** (Figure 37), permet de bien visualiser certaines liaisons. Comme nous l'avons amplement décrit précédemment, la quantité de régénération observée au Chalet brûlé a été bien moindre qu'au Frênois, surtout en raison de la raréfaction des semis de sapin. La région naturelle, ainsi que l'altitude jouent donc un rôle dans le renouvellement, mais il faudrait analyser d'autres forêts pour en être certain. Pour ce qui est du type de peuplement, on peut remarquer que les structures claires (C et G) possèdent une régénération résineuse plus dense que les peuplements jardinés équilibrés ou à gros bois (A et B). Tandis que les structures régularisées (E et F) sont en dessous de la moyenne.

```
$Dim.1$quanti
              correlation       p.value
Perches.sap.ha   0.8428004 0.000000e+00
Haut.sap.ha      0.7893287 0.000000e+00
Haut.epi.ha      0.2224224 8.496062e-03
Pente           -0.1792843 3.470489e-02
G               -0.1884381 2.631497e-02
Perches.epi.ha  -0.3363446 5.160780e-05
Altitude        -0.7670266 3.486977e-28

$Dim.2$quanti
              correlation       p.value
Ie.moy           0.6163341 6.661338e-16
Haut.epi.ha      0.5724267 1.811884e-13
Bas.epi          0.5275158 2.519651e-11
Bas.sap          0.3463007 2.967862e-05
Altitude         0.3341451 5.817021e-05
Perches.sap.ha  -0.1944405 2.181034e-02
Pente           -0.2530174 2.654501e-03
G               -0.5683854 2.913559e-13
```

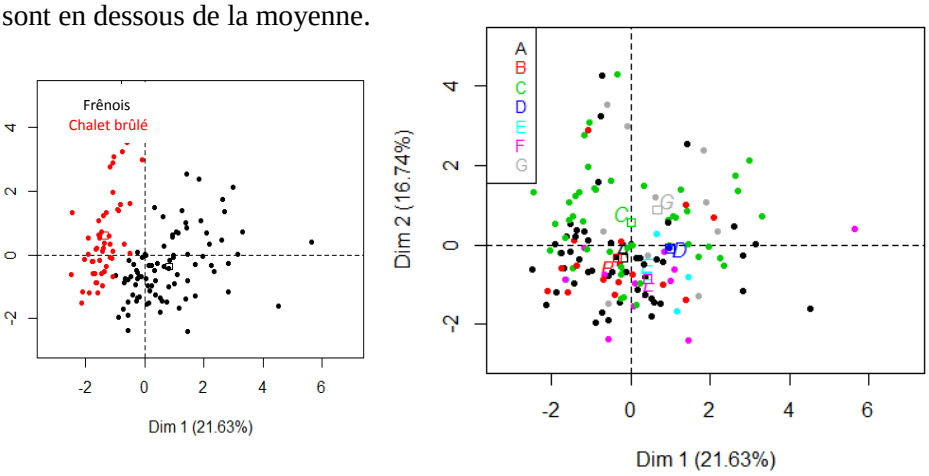
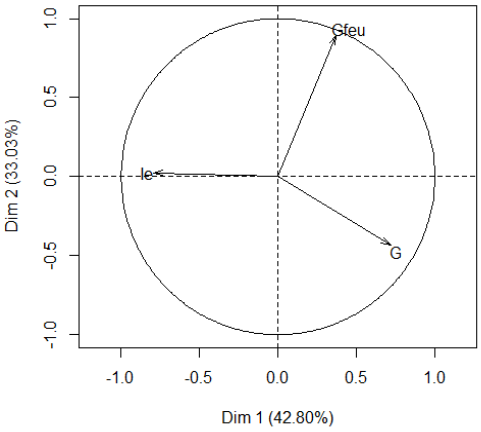


Figure 37 : Graphique des individus (données placette, groupes forêts et peuplements) et tableau de decription des dimensions

Une ACP peut également être paramétrée sur les données de sous-placettes. L'objectif est de mettre en lumière des situations particulières faisant varier des paramètres tels que la forme des semis. Le graphique des variables et le tableau de description des dimensions (Figure 38), montrent que la dimension 1 est fortement corrélée négativement avec **l'indice d'éclairement** alors que la liaison est positive avec **la surface terrière**. La troisième variable insérée**, la proportion de feuillus** dans la surface terrière est quant à elle liée positivement avec la dimension 2.

En partant de ces informations, les graphiques des individus pour les semis d'épicéa et de sapin deviennent nettement plus clairs (Figure 39). La régénération acquise d'épicéa a une physionomie « ovoïde » pour une surface terrière forte et un indice d'éclairement faible. Plus l'indice d'éclairement augmente plus les formes « conique » apparaissent. En moyenne pour un indice d'éclairement identique mais une proportion de feuillus dans la surface terrière plus forte, les semis font de plus longs entre-nœuds (forme « néloïde »). Ces observations sont à généraliser pour les semis acquis de sapin, à la différence que ceux-ci ne sont pas sensibles à la part de feuillus dans la surface terrière.




```
$Dim.1$quanti
     correlation       p.value
G      0.7175839 0.000000e+00
Cfeu   0.3712292 4.440892e-15
Ie    -0.7944671 6.404348e-92
$Dim.2$quanti
     correlation       p.value
Cfeu   0.8950279 0.000000e+00
G     -0.4350232 1.107556e-20
```

Figure 38 : Graphique des variables (données sous-placette) et description des dimensions

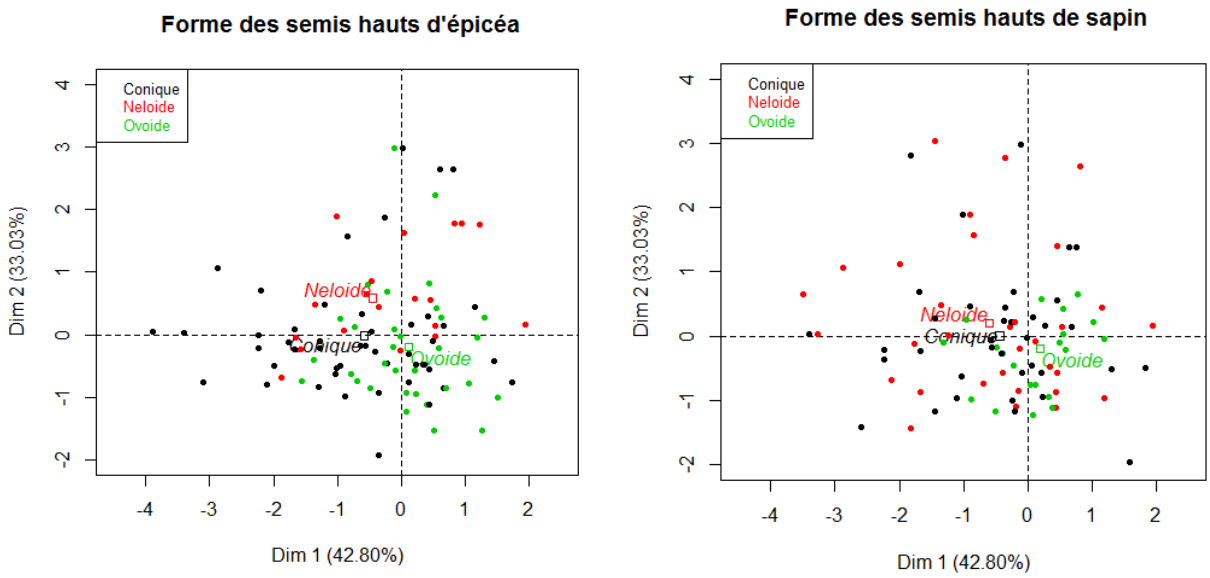


Figure 39 : Graphique des individus (données sous-placette, par groupes de formes), pour épicéa et sapin acquis

Comme nous pouvons le voir avec les précédents exemples, les ACP permettent assez aisément d'interpréter une réponse de groupe discret, à l'aide de variables quantitatives. D'autres outils tels que les ACM permettent cette fois de comparer des variables discrètes entre elles. Pour cette raison, ainsi que pour bénéficier d'ordre de grandeur, certaines variables de réponse ont été discrétisées. Des classes ont ainsi été créées à l'aide des histogrammes de répartition. Tout en veillant à ce que ces mêmes classes possèdent un intérêt sylvicole, et puissent être utilisées pour la gestion. Les diagrammes en barres de la page suivante (Figure 40), illustrent ces classes, au nombre de cinq pour les semis résineux hauts et de quatre pour la surface terrière, le volume et le nombre de tiges.

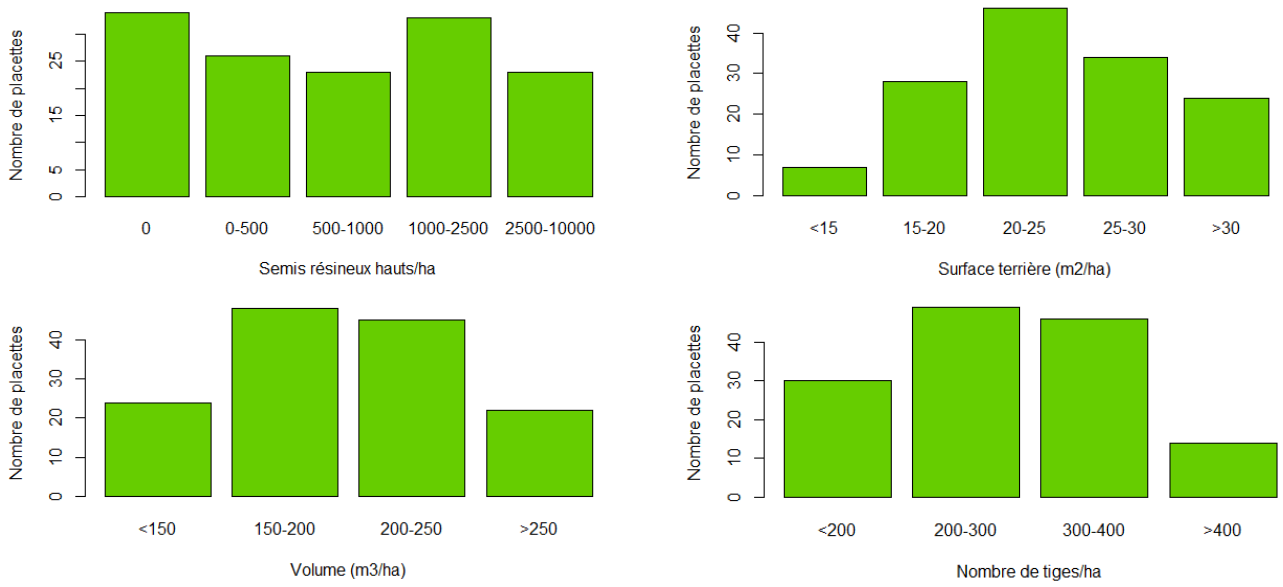


Figure 40: Diagrammes de répartition des effectifs de placettes pour les variables discrétisées

Pour cette dernière analyse sur les deux forêts réunies, les variables discrètes de **type de peuplement**, **surface terrière**, **volume**, **nombre de tiges**, et de **semis résineux hauts** ont été introduites dans l'ACM.

Ceci a conduit à la création d'un graphique des individus, de forme convexe, pouvant être interprété à l'aide des variables illustratives (Figure 41). Il en ressort que les individus en haut à gauche sont issus de peuplements denses, alors que ceux en haut à droite, de situations avec un bon indice d'éclairement. L'objectif de cette expérimentation étant de suivre l'évolution des classes de régénération résineuse acquise le long de ce gradient, et ainsi de donner une correspondance entre les classes de renouvellement et celles de structures et de peuplement.

La première information qui ressort du résultat de l'ACM (Figure 42), est la forte liaison entres les classes des trois variables de structure de peuplement. Celle-ci permettra assez facilement de changer d'indicateur de cause en fonction de l'interlocuteur (la surface terrière étant moins utilisée par les gestionnaires forestiers jurassiens que le volume ou le nombre de tiges).

La variable de réponse, c'est-à-dire les classes de quantité de semis hauts résineux (en orange), ne suit pas exactement la forme convexe des structures de peuplement. Malgré tout une gradation peut être observée sur la dimension 1, les deux classes de régénération les plus fournies (1 000 à 2 500 et 2 500 à 10 000 semis résineux hauts/ha) possédant des valeurs positives sur cet axe, ce qui n'est pas le cas des trois autres classes.

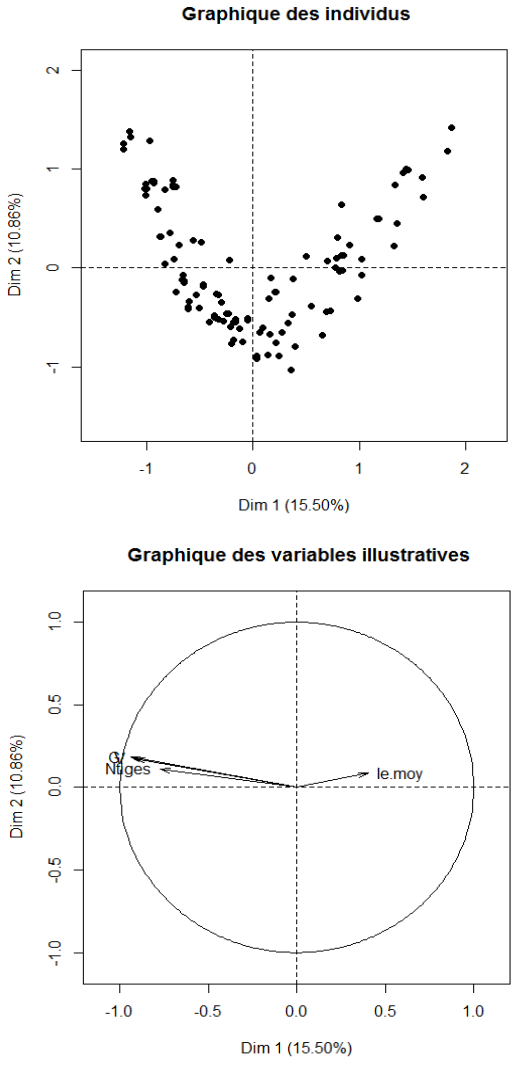


Figure 41 : Graphiques d'interprétation de l'ACM

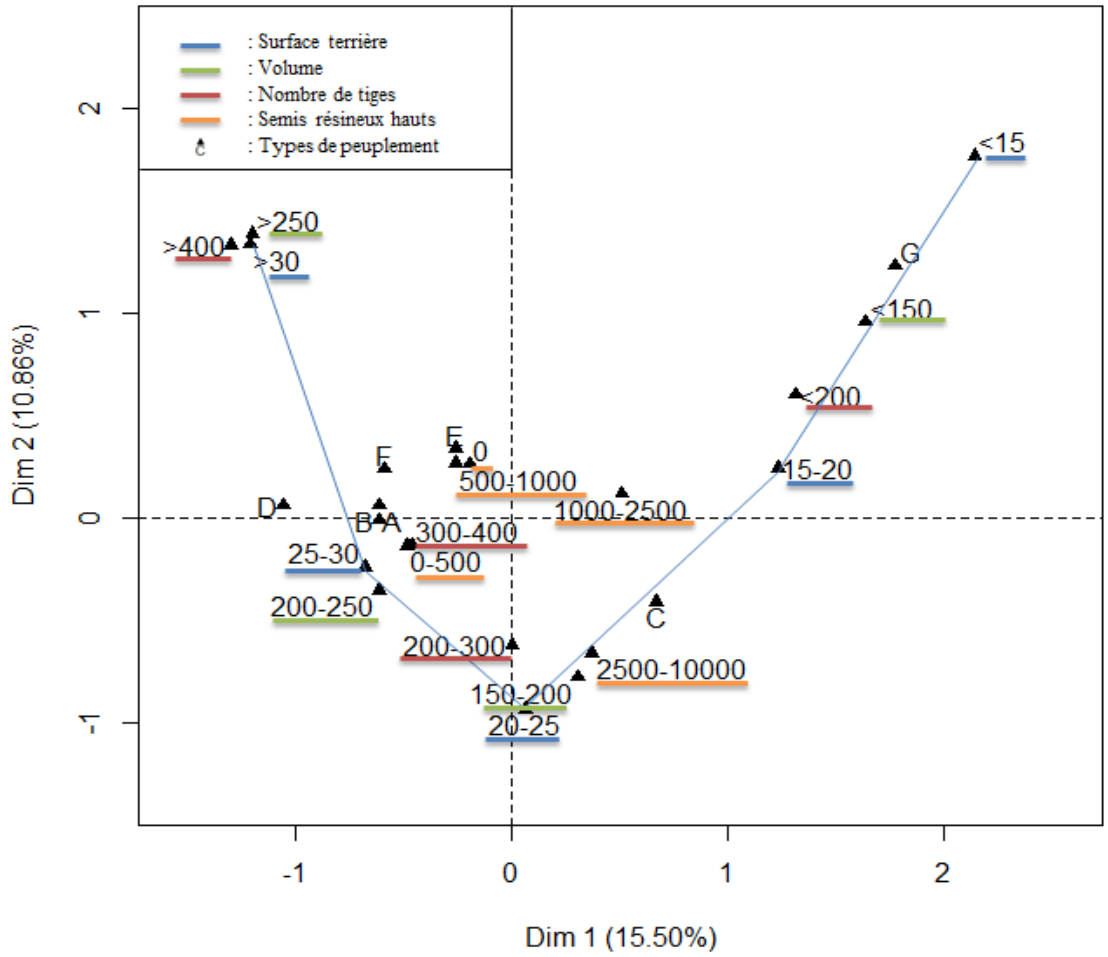


Figure 42 : Graphique des modalités pour les variables discrètes introduites dans l'ACM

Les situations de forte à très forte régénération résineuse acquise peuvent donc être associées à une surface terrière inférieure à 25 m^2/ha, un nombre de tiges inférieur à 300/ha, ainsi qu'un volume ne dépassant pas les 200 m^3/ha. Pour la variable de peuplement, là encore les types jardinés clair (C) et résineux pauvre (G) ont des valeurs positives sur la dimension 1, synonyme de régénération résineuse dense. Alors que les peuplements régularisés (D, E et F) et dans une moindre mesure les types jardinés A et B, ont une position plus proche des situations de régénération inférieure à 1 000 semis/ha voire inférieure à 500 semis/ha.

Plusieurs groupes de modalités peuvent être cités. Le plus évident, étant celui correspondant à un G > 30 m^2/ha, un V > 250 m^3/ha et un nombre de tiges > 400/ha. Cette situation peut être rapprochée d'une faible régénération résineuse, mais n'en est pas la principale cause, étant donné l'éloignement des modalités pauvres en renouvellement.

Un groupe plus révélateur se réunit en bas du graphique autour de la modalité la plus dense de régénération (> 2 500 semis résineux hauts/ha). Celle-ci serait ainsi fortement corrélée à une surface terrière comprise entre 20 et 25 m^2/ha, un volume de 150 à 200 m^3/ha, un nombre de tiges compris entre 200 et 300/ha, ainsi que d'une futaie jardiné claire (C). Ces intervalles de densité de structure, ainsi que ce type de peuplement peuvent donc être qualifiés d'optimaux pour favoriser le plus fort renouvellement possible.

Une ellipse peut également être tracée en haut à droite du graphique, concernant les situations de très faible densité de structure de peuplement. Aucune modalité de renouvellement ne s'en rapproche ce qui est tout de même une information. En effet, ces milieux ouverts ne sont pas toujours caractérisés par une régénération maximale, sans doute du fait de la dynamique de la concurrence feuillue dans ces conditions trop éclairées. Pour finir un dernier groupe peut être défini autour des modalités de peuplement A et B, les interactions en son sein sont difficiles à interpréter hormis, qu'il s'agit globalement de milieu à surface terrière comprise entre 25 et 30 m^2/ha. L'analyse du cas particulier de chaque forêt permettra sûrement d'élucider ces interrogations.

4.1.6 Synthèse sur les deux propriétés

Avant de se pencher plus précisément sur chaque contexte, les informations mises en lumière dans le paragraphe 4.1 ont été résumées ici avec en premier lieu les points communs entre les deux forêts puis ensuite les premières différences observées :

- ↗ Surface terrière/ha ↘ Quantité de semis résineux hauts (indifféremment sapin et épicéa)
- ↗ Volume/ha ↘ Quantité de semis résineux hauts
- ↗ Volume/ha ↘ Qualité des perches de sapin
- Volume < 175 m^3/ha → Accroissement en hauteur > 9 cm/an
- ↗ Nombre de tiges/ha ↘ Quantité de semis hauts (plus limitant pour les feuillus)
- ↗ Indice d'éclairement ↗ Quantité de semis résineux hauts (surtout pour l'épicéa)
- ↗ Indice d'éclairement ↗ Qualité de semis hauts d'épicéa
- ↗ Pente (+ versant N) ↘ Quantité de semis hauts d'épicéa
- ↗ Hauteur dominante ↘ Quantité de semis bas de hêtre et de perches résineuses
- ↗ Concurrence herbacée ↘ Quantité de semis résineux hauts
- Sols pauvres ↗ Quantité de semis résineux hauts
- Structure jardinée claire ↗ Quantité de semis résineux hauts et bas
- Structure régularisée ↘ Quantité de semis résineux hauts
- ↗ Surface terrière/ha ↘ Indice d'éclairement ↗ Semis résineux hauts « ovoïdes »
- ↗ Indice d'éclairement ↘ Surface terrière/ha ↗ % de feuillus ↗ Semis résineux hauts « néloïdes »
- Plus de 2 500 semis résineux hauts/ha → Peuplement C, ou alors
  - 200/ha < N < 300/ha
  - 20 m^2/ha < G < 25 m^2/ha
  - 150 m^3/ha < V < 200 m^2/ha
- Forêt du Frênois à la différence du Chalet brûlé :
  - ↘ Quantité de semis feuillus hauts et bas
  - ↗ Quantité de semis résineux hauts (surtout pour le sapin)
  - ↗ Quantité de perches résineuses (surtout pour le sapin)
  - ↗ Hauteur d'accroissement des sapins hauts
  - ↗ Hauteur totale des sapins hauts

4.2 Contexte de deuxième plateau : la forêt du Frênois

4.2.1 Bilan dendrométrique

La plupart des indicateurs sont plus élevés sur cette forêt du Frênois (G_{2014}/ha, Volume/ha, Nombre de tiges/ha, Nombre de perches/ha), les sapins sont majoritaires et les classes de diamètres mieux réparties que ce que l'on a pu voir sur les deux forêts réunies (Figure 43). Dans les paragraphes qui vont suivre, les outils statistiques ne seront pas commentés, étant identiques à ceux utilisés pour l'étude globale des deux forêts. Les résultats seront donc traités par stade de développement des semis.

Var	G_{2014} (m^2/ha)		V (m^3/ha)		Tiges (N/ha)		Hdom (m)	Perches (N/ha)	Sapin (% G_{2014})	Epicéa (% G_{2014})	PB (% G_{2014})	BM (% G_{2014})	GB (% G_{2014})	G_{2000} (m^2/ha)
	Total	Résí.	Total	Résí.	Total	Résí.								
Moy	24	21	208	183	297	237	27	219	53	34	21	44	35	23
Min	13	9	104	78	102	70	21	0	4	0	0	16	0	11
Max	37	36	318	312	566	483	33	669	89	86	53	70	81	40
CV (%)	22,2		22,8		31,3		9,8	57,4	38,8	59,6	50,6	26,5	43,2	22,5

Figure 43 : Bilan dendrométrique de la forêt du Frênois

4.2.1 Les semis bas

Dans ce contexte de deuxième plateau, la régénération basse est tout d'abord dépendante de la **composition en essence** du peuplement. L'installation de l'épicéa étant notamment favorisée par la proportion de résineux dans la surface terrière (r^2 = 0,24 contre r^2 = - 0,23 avec la proportion de feuillus). Le hêtre germera lui aussi plus abondamment sous son couvert (r^2 = 0,25). Ceci rend compte de la dispersion des graines mais pas forcément des situations favorables à la croissance de ces semis.

Au niveau du **type de peuplement** (Figure 44), les épicéas de moins de 50 cm sont plus présents dans des peuplements de type jardinés clairs (C). Ceci se retrouve en partie dans le coefficient de corrélation entre ces mêmes épicéas et la surface terrière (r^2 = - 0,13). Les semis bas de sapin quant à eux, colonisent préférentiellement les peuplements à gros bois (r^2 = 0,15), de type B. Enfin, la régénération feuillue basse a été bien observée dans les peuplements pauvres en résineux (type G) mais également dans les peuplements jardinés plus équilibrés (type A).

Au niveau **historique sylvicole**, on peut remarquer que les semis d'épicéa sont assez sensibles à la date de dernière coupe résineuse (r^2 = - 0,25), la coupe de bois d'œuvre favoriserait donc son développement. Tandis que les sapins s'installent mieux plus la surface terrière d'il y a 15 ans est forte (r^2 = 0,26). Autant de résultats qui corroborent le principe selon lequel les épicéas demandent beaucoup plus de lumière que les sapins dans leurs premiers stades de développement.

Enfin, **les perches de feuillus** se montrent assez concurrentielles avec les semis bas résineux (r^2 = - 0,22).

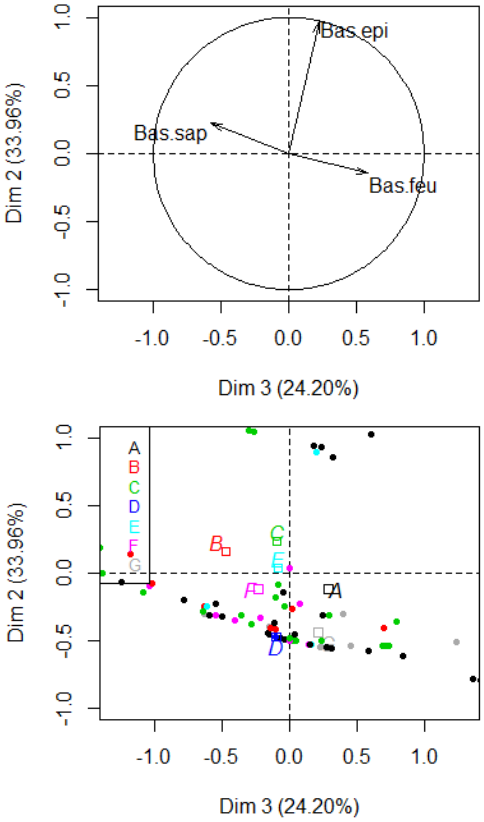


Figure 44: Graphique des variables actives et des individus par peuplements de l'ACP

4.2.2 Les semis hauts

Comme sur les deux forêts réunies **le volume/ha** (r^2 = - 0,39), **la surface terrière/ha** (r^2 = - 0,37) ainsi que **le nombre de tiges/ha** (r^2 = - 0,25) influencent négativement la présence de semis acquis résineux (indifféremment ceux de sapin ou ceux d'épicéa). Nous pouvons remarquer également que la diminution de renouvellement résineux, n'intervient pas avec la même intensité suivant **le type de peuplement** (Figure 45). En effet, un peuplement jardiné riche en gros bois (B) est moins sensible à l'augmentation de la surface terrière qu'un peuplement régularisé dans les gros bois (F).

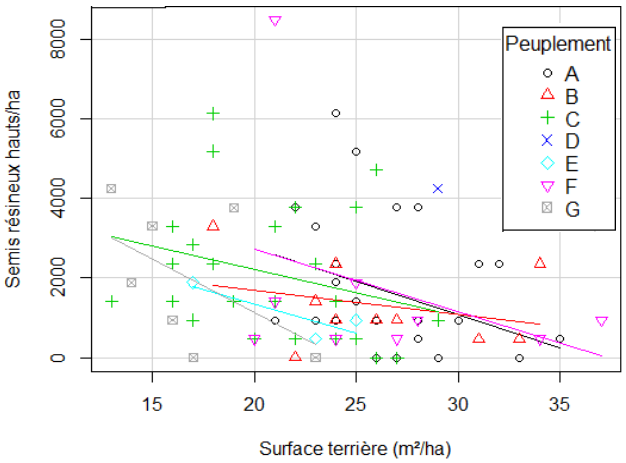


Figure 45: Semis résineux hauts en focntion de la surface terrière et du type de peuplement

Ayant déjà abordé ce point de la densité de peuplement, il sera avant tout question ici de composition en essence, en catégorie de bois ainsi que d'historique sylvicole, autant de points qui n'ont pas pu être traité sur l'ensemble de l'échantillon. Ainsi au niveau de **la composition en essence**, un premier critère est ressorti rapidement de l'étude statistique. Il s'agit du principe d'alternance entre le sapin et l'épicéa, fortement marqué notamment au niveau des semis hauts de sapin, comme en attestent les trois graphiques de la figure 46. Le graphique des variables de l'ACP renforce ce principe d'alternance, et montre également que les épicéas sont plus sensibles à une forte surface terrière que les sapins.

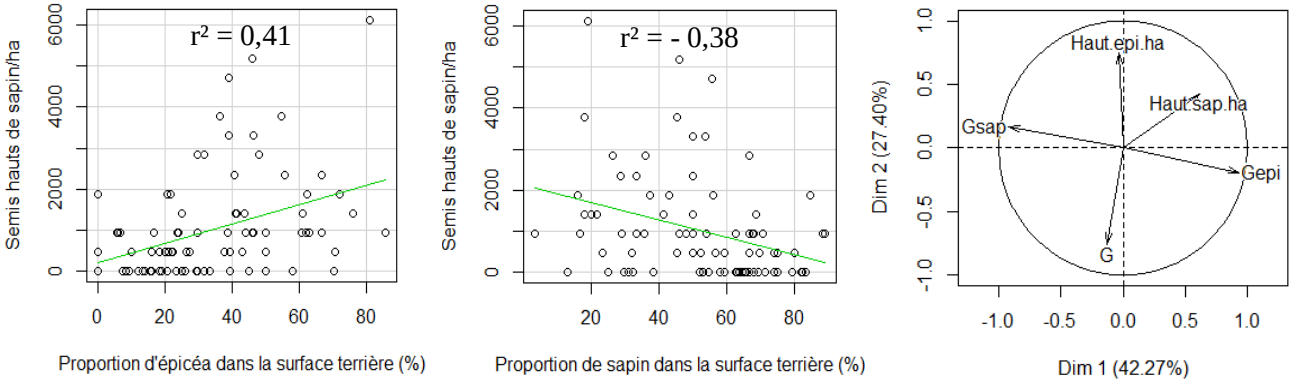


Figure 46 : Illustration du principe d'alternance entre sapin et épicéa (nauge de point de graphique des vairables de l'ACP)

Concernant la répartition des **catégories de bois**, les exigences des semis de sapin, d'épicéa, mais également des feuillus sont similaires. Une proportion de petit bois, toutes essences confondues, élevée (pouvant aller jusqu'à 53 % de la surface terrière dans le cas du Frênois), a un effet néfaste sur les semis acquis. Au contraire un bon renouvellement est observable, lorsque la part de petit bois diminue, tandis que les bois moyens et les gros bois s'équilibrent. Ceci est attesté par le graphique des variables de l'ACP (Figure 47). Ce point permet de mieux apprécier le fait que les peuplements régularisés possèdent moins de régénération.

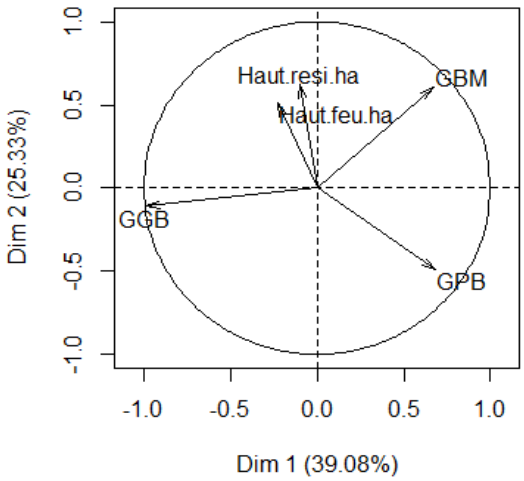


Figure 47: Graphique des vairables de l'ACP sur les catégories de bois

Pour **l'historique sylvicole**, les liaisons sont difficiles à interpréter. Les travaux sur cette forêt ayant pour l'instant uniquement été concentrés sur le bas de la propriété, et sur une faible proportion de la surface totale, l'effet de ceux-ci n'est pas décelable directement sur les indicateurs de semis hauts. En revanche il peut être souligné que plus la surface terrière était forte en l'an 2000, moins il a été observé de semis acquis d'épicéa (r^2 = - 0,17, ce qui peut paraître faible, conséquence probable de l'imprécision d'estimation de la surface terrière ancienne). Enfin, une coupe récente de bois d'œuvre influence la hauteur totale, ainsi que la hauteur d'accroissement des semis acquis. Par exemple, 30 % de la variabilité de hauteur pour les semis de sapin acquis est expliquée par cette date, mais également 23 % de la variabilité de hauteur d'accroissement. En d'autres termes, les martelages réalisés ont amélioré la vigueur de ces plants.

Sur la forêt du Frênois, tout comme sur la moyenne des deux propriétés, les peuplements jardinés clairs, ainsi que les peuplements pauvres sont bien fournis en régénération, à l'inverse des peuplements réguliers E, F et D. La situation est plus complexe pour les peuplements jardinés équilibrés et jardinés à gros bois. Un zoom a donc été entrepris sur ces **peuplements A et B** (45 % de l'échantillon du Frênois), pour tenter de découvrir une situation limitante intrinsèque (Figure 48). Il en ressort que le volume/ha est le principal facteur négatif, expliquant plus de 40% de la variabilité des semis hauts résineux. Sur ce sous échantillon A et B, 81 % des placettes de plus de 240 m^3/ha possèdent moins de 1 000 semis résineux/ha. Les peuplements jardinés A et B ne garantissent en effet pas un capital sur pied inférieur à 200 m^3/ha, représentant, comme nous l'avons vu (paragraphe 4.1.5), un seuil de densité favorable à la régénération.

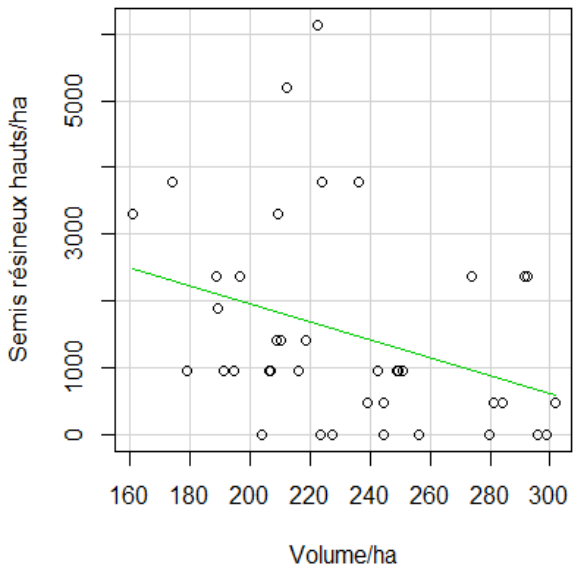


Figure 48: Nuage de points pour les type A et B

4.2.1 Synthèse sur la forêt du Frênois

Les points abordés lors de ce chapitre ont été résumés ci-dessous en quelques indicateurs :

↗ % de résineux	↗ Quantité de semis bas d'épicéa
↗ % de hêtre	↗ Quantité de semis bas de hêtre
● Coupe résineuse récente	↗ Quantité de semis bas d'épicéa
↗ Surface terrière de l'an 2000	↗ Quantité de semis bas de sapin
↗ Perches feuillues/ha	↘ Quantité de semis résineux bas
↘ % de sapin ↗ % d'épicéa	↗ Quantité de semis hauts de sapin
↗ % de petits bois	↘ Quantité de semis hauts (résineux et feuillus)
● Coupe résineuse récente	↗ Hauteur totale et hauteur d'accroissement des sapins hauts

● Peuplement A et B → Seuil maximal de 240 m^3/ha pour une régénération résineuse

4.3 Contexte du Haut-Jura : la forêt du Chalet brûlé

4.3.1 Bilan dendrométrique

Pour la forêt du Chalet brûlé, la composition en essences résineuses ne sera pas traitée car à cette altitude l'épicéa occupe pleinement son aire de répartition et le sapin est beaucoup moins à sa place, ce qui s'observe par une très faible présence de ce dernier (Figure 49).

Var	G_{2014} (m²/ha)		V (m³/ha)		Tiges (N/ha)		Hdom (m)	Perches (N/ha)	Sapin (% G_{2014})	Epicéa (% G_{2014})	PB (% G_{2014})	BM (% G_{2014})	GB (% G_{2014})	G_{2000} (m²/ha)
	Total	Résí.	Total	Résí.	Total	Résí.								
Moy	23	20	186	162	257	192	27	148	18	69	19	35	46	21
Min	8	8	65	65	65	56	23	0	0	24	0	11	22	8
Max	35	31	287	260	506	356	32	418	71	100	58	60	89	32
CV (%)	28,8		29,4		37,7		8,3	76,8	98,0	28,4	58,9	29,2	28,8	22,5

Figure 49 : Bilan dendrométrique de la forêt du Chalet brûlé

4.3.1 Les semis bas

Dans leur stade juvénile, nous pouvons remarquer que les semis résineux apprécient plus les zones à **gros bois** (Figure 50), ainsi que celles où la présence de **résineux et de feuillus** se rapproche de la valeur moyenne (3m²/ha de feuillus dans la surface terrière). Cependant, lorsque ce taux de feuillus dans la surface terrière augmente trop, ce sont les semis bas de hêtre, de sorbier et d'érable qui prennent le dessus sur les résineux (r^2 = - 0,24 entre les semis bas résineux et feuillus).

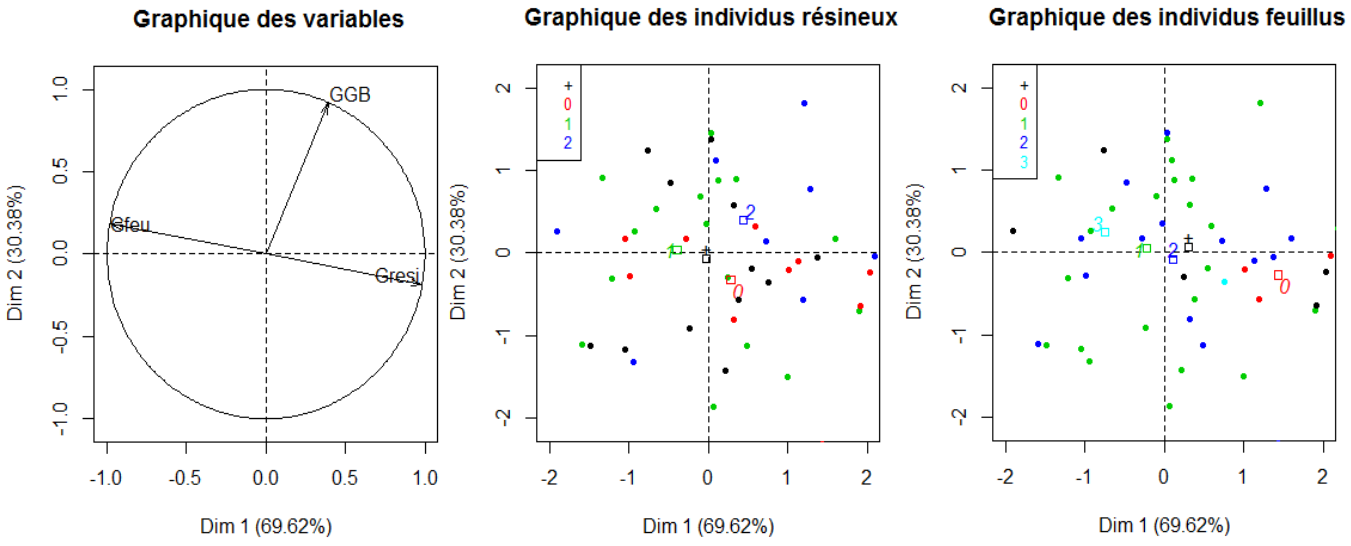


Figure 50 : ACP incluant la part de gros bois, de feuillus et de résineux
Les graphiques des individus regroupent les semis bas résineux puis feuillus en classe de recouvrement (Annexe 9)

Sur cette forêt du Chalet brûlé, **les types de station** rencontrés ont été bien différents du Frênois, ce qui peut également expliquer la différence de régénération. La pessière à doradille est beaucoup plus présente, et des zones de combe fraîche ont également été notées. Ainsi, 70 % des placettes situées sur les stations « hêtraie sapinière à fougères » ou « hêtraie à érable sur sol profond », ne possédaient pas de semis bas résineux. Et bien plus parlant encore, 100 % de ces placettes ne possédaient pas du tout de semis résineux hauts. Ces stations étaient généralement associées à des sols riches, favorisant le développement d'une végétation herbacée luxuriante, très limitante pour le renouvellement des peuplements.

4.3.2 Les semis hauts

Toutes les précédentes remarques pour les semis résineux bas peuvent être transposées aux semis résineux hauts. De plus nous pouvons donner un intervalle de **proportion de feuillus** dans la surface terrière, parmi lequel se développe une bonne régénération acquise. Pour y parvenir des classes ont été fixées pour les feuillus, et des graphiques en « boîte à moustache » ont été tracés en fonction de la quantité de semis résineux acquis (Figure 51). Sur ces derniers, nous pouvons observer une nette diminution de la quantité de régénération résineuse acquise lorsque les feuillus occupent plus de 20 % de la surface terrière. L'inverse, c'est-à-dire très peu de feuillus, n'est pas non plus une situation favorable au renouvellement résineux. Un maximum peu en effet être observé lorsque les hêtres, les érables et les sorbiers réunis (cités par ordre d'importance sur le chalet brûlé), atteignent entre 10 et 15 % de la surface terrière.

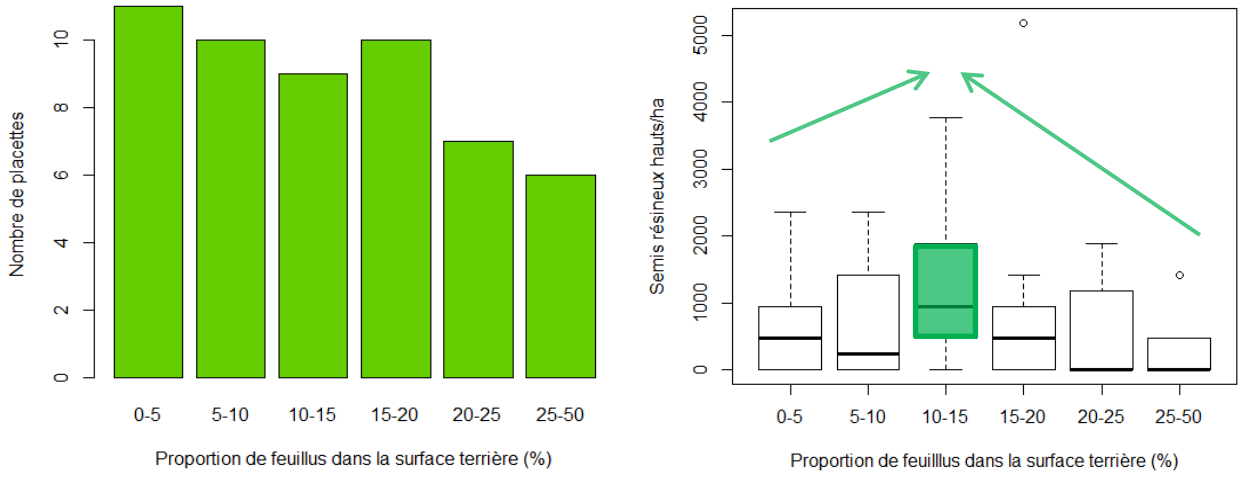


Figure 51 : Proportion de feuillus dans le peuplement favorable à la régénération acquise résineuse

L'aspect **historique** peut être étudié au niveau de la variation de surface terrière en 15 ans. Les placettes avec peu de souches relevées par rapport au passage à la futaie possédaient moins de régénération. Ceci peut s'expliquer de deux façons, un martelage se rapprochant de l'accroissement, garantirait une plus forte présence de semis résineux hauts. Mais il ne faut tout de même pas oublier que les arbres martelés sont souvent plus nombreux pour favoriser une régénération installée. Toujours est-il que ce critère permettrait même d'expliquer 28 % de la variabilité des résineux acquis.

Enfin, au niveau du **type de peuplement**, tout comme au Frênois, les peuplements C et G sont les plus fournis en régénération acquise résineuse, à l'inverse des peuplements régularisés. Pour les peuplements A et B la quantité de semis résineux chute pour des volumes supérieurs à 200 m^3/ha. En dessous de cette limite, 63 % des placettes possèdent plus de 500 semis résineux acquis/ha, alors qu'elles ne sont plus que 13 % si le volume dépasse les 200 m^3/ha.

4.3.3 Synthèse sur la forêt du Chalet brûlé

- ↗ % de gros bois ● Environ 3m²/ha feuillus → ↗ Quantité de semis résineux bas
- ↗ Semis feuillus bas → ↘ Quantité de semis résineux bas
- ● Station de combe fraîche → ↘ Quantité de semis résineux bas
- ● Entre 10 et 15 % de feuillus dans la surface terrière → ↗ Quantité de semis résineux hauts
- ● Martelage se rapporchant de l'accroissement → ↗ Quantité de semis résineux hauts
- ● Peuplement A et B → Seuil maximal de 200 m^3/ha pour une régénération résineuse suffisante

5. Liens avec la gestion forestière

Ce dernier chapitre a pour objectif de rattacher les résultats de l'inventaire, à la sylviculture pratiquée sur le deuxième plateau et sur le Haut-Jura. Un arbre de décision a ainsi été créé, et quelques cas concrets seront décrits. Enfin, le chapitre se terminera par un commentaire sur la méthode d'inventaire pratiquée et l'utilisation du type de données récoltées.

5.1 Densité minimale

Pour pouvoir parler de gestion sylvicole en lien avec la régénération, il faut tout d'abord clarifier les notions de « densité minimale », « suffisante ». Le terme de « densité » en futaie irrégulière n'est pas aisé à employer, de par la structure même de ce type de peuplement. N'étant pas homogènes, au même titre que leurs semenciers, les semis sont bien souvent inégalement répartis par cônes de régénération. Les seuils sont eux aussi difficilement chiffrables, le renouvellement en jardiné devant être perpétuel, ne se rapprochant pas d'une phase de régénération d'un système régulier.

Malgré tout, certains principes de la futaie régulière résineuse peuvent être cités, pour bénéficier d'ordres de grandeur en la matière. Il est admis en France, que l'épicéa commun (ainsi que le sapin pectiné), doivent être plantés à une densité comprise entre 1 000 et 2 000 plants par hectare (ou plus précisément entre 1 500 et 1 800 plants/ha d'après Bastien, 1998). Dans le département du Jura ces essences résineuses sont généralement plantées à des densités minimales variant de 1 000 à 1 500 plants/ha, suivant les situations. En tenant compte de ces recommandations, quel serait le seuil minimal de régénération à chaque « instant t » d'un peuplement de futaie jardiné ?

On pourrait penser que le système du jardinage nécessite moins de renouvellement, la parcelle devant posséder un équilibre entre les classes de diamètres et non la prépondérance d'une classe. En suivant cette réflexion, la régénération devrait être également d'un minimum de 1 500 plants/ha, mais en cumulant tous les semis obtenus jusqu'à l'âge d'exploitabilité. En plus d'être un calcul fastidieux, celui-ci se révèlera être erroné, car ne tenant pas compte des dégâts et ralentissement que pourront subir les plants durant leur développement dans un peuplement jardiné.

En effet, bien qu'étant moins sensible à la dent du gibier en futaie jardinée, du fait de l'hétérogénéité de la ressource, certains points sont quand même à noter en défaveur des semis. Tout d'abord une essence très héliophile comme l'épicéa, verra son accroissement diminuer, en comparaison d'une plantation en plein, le temps de passage à la futaie sera donc également plus long. De plus la récolte des bois a lieu pendant et après l'installation des semis ce qui peut participer à une dégradation de la régénération suivant la qualité du bûcheronnage, et du débusquage. Autant de points négatifs dont l'ampleur est difficile à apprécier, certainement compensés au moins en partie, par les avantages de ce système, n'ayant pas tous été cités (moins de casse à cause de la neige, sol moins tassé, concurrence herbacée mieux contenue, …).

Enfin, pour compléter la réflexion, il peut être utile de se pencher sur la courbe de représentation des diamètres pour un peuplement jardiné équilibré. Il serait ainsi souhaitable, pour le types A, de compter 50 à 65 tiges/ha de la classe 20 cm de diamètre. D'après l'allure exponentielle négative de cette courbe, on peut estimer à plus de 150, la quantité de perches (classes 10 et 15 cm) à l'hectare. De ce fait, le seuil minimum de régénération pour une futaie jardinée tendant vers l'équilibre, serait d'environ 500 plants/ha. Ce taux de renouvellement suffisant est de plus cohérent avec les observations décrites tout au long de ce paragraphe. Il sera également admis que les forêts du Haut-Jura pourront posséder un seuil moins élevé, des accroissements plus faibles, impliquant des cycles ainsi qu'un renouvellement plus long. En suivant ce raisonnement, lorsque le diamètre d'exploitabilité augmente, la quantité de régénération nécessaire diminue également.

5.2 Arbre de décision

Après avoir analysé les variables, puis défini des seuils de régénération, il a paru intéressant de réaliser une typologie des classes de régénération pour les semis acquis. Cette partition peut être réalisée à l'aide de nombreux outils statistiques. Dans cette étude nous avons opté pour la classification non supervisée, qui s'oppose aux procédures de discrimination utilisables lorsqu'une typologie est à priori connue. L'objectif de la classification non supervisée est d'optimiser un critère visant à regrouper les individus dans des classes, chacune le plus homogène possible et, entre elles, les plus distinctes possible. Cette méthode ne permettant pas la prise en compte de variables discrètes, ce sont les variables quantitatives influençant le plus le renouvellement qui ont été analysées. Les deux arbres de décision suivants ont été créés :

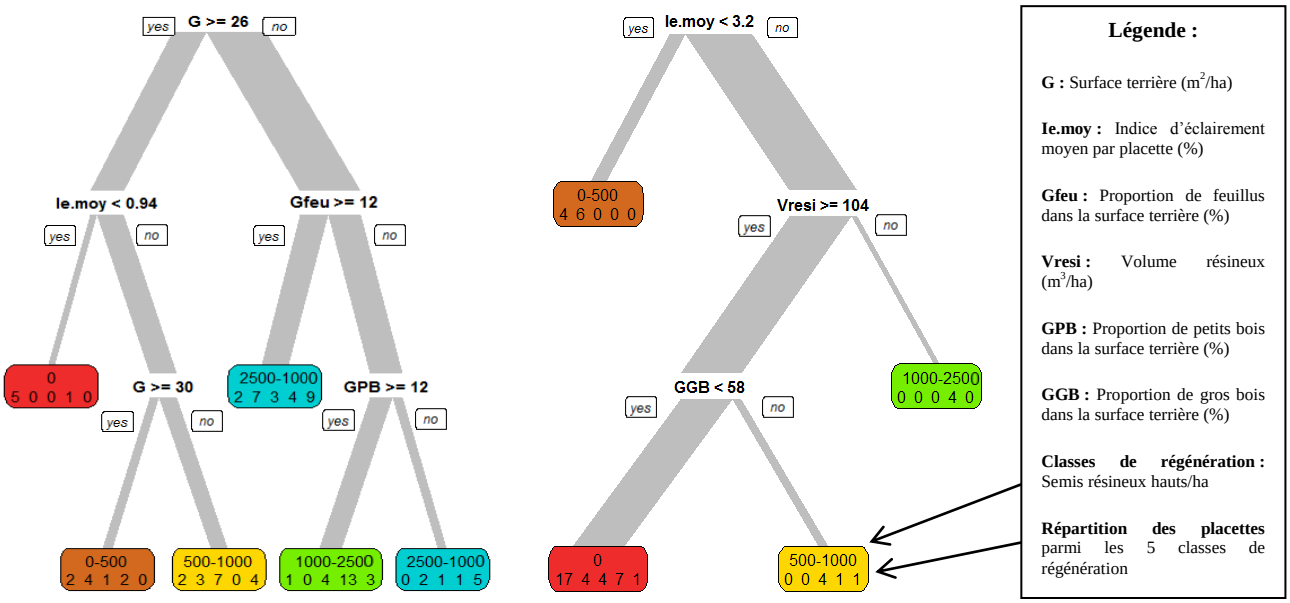


Figure 52 : Arbres de décision pour le Frênois à gauche et le Chalet brûlé à droite

La lecture de ce type de figure est assez aisée, chaque embranchement représentant une question sous forme de seuil pour une variable donnée. La décision de gauche sur le graphique étant toujours la réponse affirmative, celle de droite la réponse négative. En plus, d'un outil typologique classique ce graphique nous renseigne également sur la quantité d'individus (les placettes dans notre cas) présents pour chaque choix. Plus une « branche » sera épaisse, plus elle représentera un grand nombre de placettes. Une limite est malgré tout à souligner, provenant de l'approche quantitative de cette méthode. Bien que la réponse soit regroupée en classes d'individus, les seuils sont eux créés en fonction des variables quantitatives et ne représentent pas forcément des seuils sylvicoles. En tenant compte de ces considérations cet arbre de décision sera simplifié à la page suivante, ce qui permettra également d'insérer certaines variables discrètes significatives.

Pour la forêt du Frênois, le premier critère entrant en compte dans cette classification est la surface terrière totale. Pour les 86 placettes de cette forêt, un seuil est apparu à 26 m²/ha. En dessus de celui-ci on se dirige vers les trois classes de régénération les plus faibles, alors qu'en dessous de celui-ci les situations de plus de 1 000 semis résineux/ha ont été fréquentes. Nous pouvons remarquer qu'une combinaison, forte surface terrière et très faible indice d'éclairement aboutit à une absence totale de régénération. D'où la nécessité de prendre en compte la course du soleil lors des martelages. Malgré tout si la surface terrière est supérieure à 30 m²/ha, la régénération n'atteindra pas les 500 semis résineux/ha, y compris lorsque l'indice d'éclairement augmente. Pour une surface terrière inférieure à 26 m²/ha, deux critères sylvicoles entrent en jeu, permettant de différencier les sites à régénération dense ou très dense. Une proportion de feuillus supérieure à 12 % favorisera la présence de plus de 2 500 semis résineux/ha, alors qu'une proportion de plus de 12 % de petits bois, donc une densité plus élevée à capital égal, contrôlera le renouvellement résineux à un niveau compris en général entre 1 000 et 2 500 semis/ha.

Au Chalet brûlé, l'indice d'éclairement joue un rôle fondamental, les actions sylvicoles en faveur de cet indice, déjà décrites pour le Frênois peuvent être également appliquées ici. Elles seront d'autant plus importantes que le seuil de cet indice d'éclairement pour le contexte du Haut-Jura est plus élevé. Nous pouvons remarquer ensuite qu'un volume résineux très faible (inférieur à 104 m^3/ha), a permis à chaque fois sur l'ensemble des placettes d'aboutir à plus de 1 000 semis résineux/ha, ce qui est un seuil élevé pour le Chalet brûlé. Enfin, les résultats précédents nous annonçaient que le pourcentage de gros bois, donc une densité plus faible à capital égal, est favorable au renouvellement, ceci peut être apprécié également ici. Il faut tout de même nuancer le choix « GGB < 58 % » induisant une absence de régénération. Au vue de la distribution des placettes parmi les cinq classes de régénération, il serait plus juste de dire qu'une proportion de gros bois supérieur à 60 % n'est pas dommageable pour la régénération résineuse.

La Figure 53 reprend les informations de la classification précédente tout en les simplifiant :

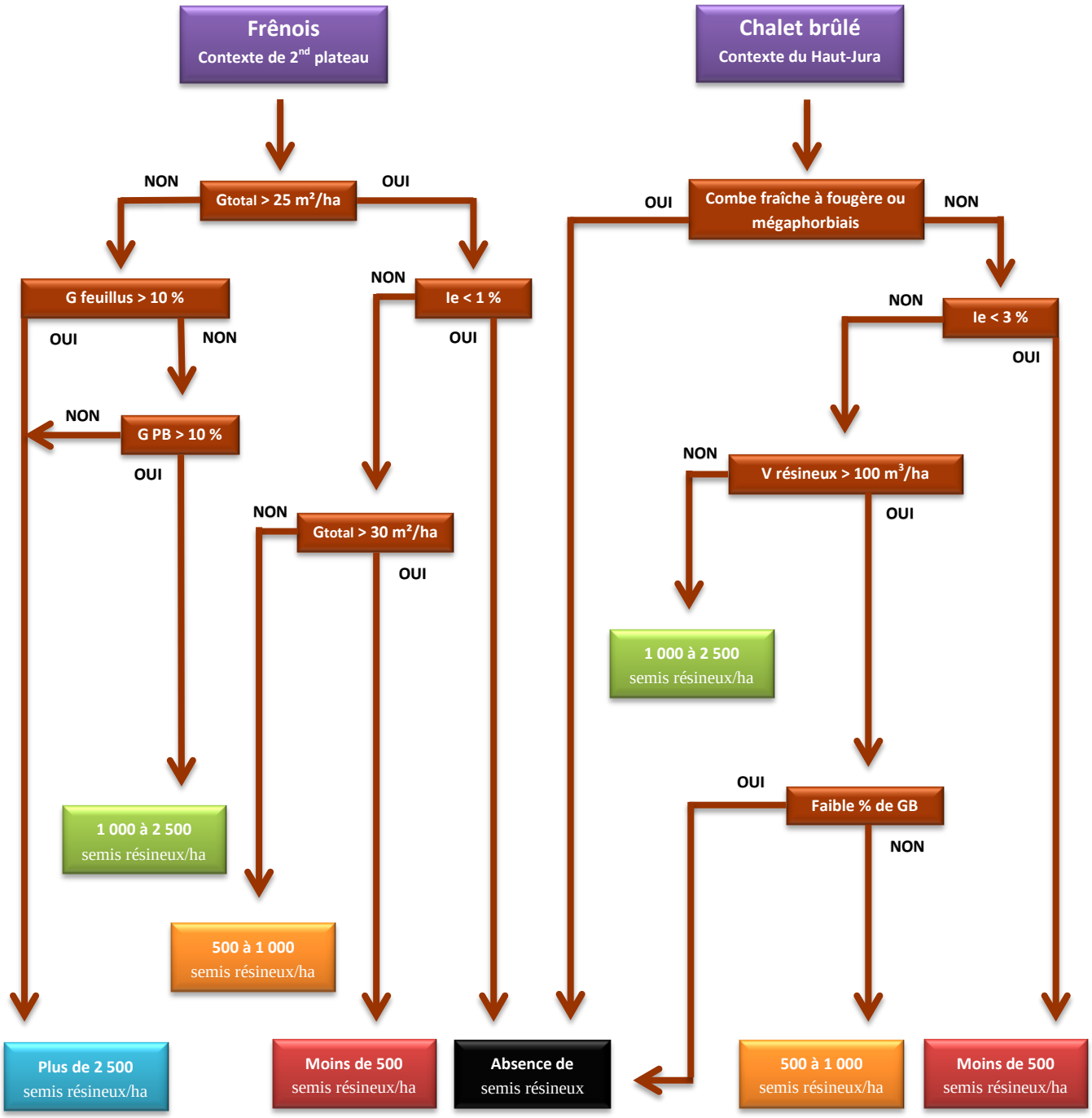


Figure 53 : Typologie des classes de régénération

5.3 Précision d'inventaire

Les paragraphes qui vont suivre traiteront de l'inventaire en tant que tel, avec un retour critique sur la précision des mesures, sur le coût de mise en place, ainsi que sur les avantages et inconvénients en comparaison d'un inventaire en plein.

La première interrogation pour un échantillonnage est sa généralisation à l'ensemble d'une parcelle ou d'une forêt. Comme il a été dit précédemment, les deux propriétés étudiées ont bénéficié d'un maillage de placette à peu près identique d'une placette pour 1,2 ha. La précision des résultats obtenus dépend donc uniquement de la variabilité des paramètres mesurés qui peut être appréciée par le coefficient de variation, c'est-à-dire la moyenne divisée par l'écart-type.

Propriétés	G total		Semis résineux bas		Semis résineux haut	
	CV (%)	Er (%)	CV (%)	Er (%)	CV (%)	Er (%)
Frênois	22,2	4,8	120,9	26,1	96,7	20,9
Chalet brûlé	28,8	7,9	139,3	38,3	129,4	35 ,5
Les deux forêts confondues	24,8	4,2	130,2	22,1	111,4	18,9

Figure 54 : Coefficient de variation et erreur d'échantillonnage

En général, il est admis qu'une erreur d'échantillonnage inférieure à 10 % est tout à fait convenable. Or nous pouvons voir (Figure 54), que pour la surface terrière totale les erreurs d'échantillonnage sont toutes en dessous de ce seuil. Pour les deux forêts confondues, avec un coefficient de variation de 24,8 % sur le « G total », la précision d'inventaire a même été de 95,8 %. Les données récoltées pour cette variable sont ainsi très proches de la réalité, malgré l'échantillonnage réalisé. Les deux critères de réponse, à savoir le recouvrement en semis résineux bas, ainsi que le nombre de semis résineux hauts par hectare, sont quant à eux beaucoup plus variables. En effet les coefficients de variation dépassent souvent les 100 % induisant une erreur d'échantillonnage moyenne sur les deux forêts de l'ordre de 20 %. Cependant, ce point n'est pas alarmant pour autant, le but premier de l'inventaire étant d'aboutir à une démarche explicative, et non une démarche figurative de cartographie du renouvellement.

Nous allons à présent nous pencher sur les résultats obtenus à l'aide de ce type d'inventaire en comparaison à un inventaire en plein. L'intérêt de l'échantillonnage statistique pour une étude du renouvellement ayant déjà été bien traité dans ce rapport nous nous focaliserons ici sur l'aspect dendrométrique. On pourrait penser qu'un inventaire en plein représente exactement la réalité, or la précision relative des données peut tout de même être réduite d'une erreur de comptage allant jusqu'à 10 %. Et le plus dommageable dans cette démarche est l'impossibilité de chiffrer cette imprécision et son sens. Comme il a été dit dans le premier paragraphe l'erreur d'échantillonnage pour un inventaire statistique est quant à elle connue, et bien souvent inférieure à 10 % pour la surface terrière par exemple. Cette donnée dendrométrique est facilement transposable en nombre de tiges ou en volume (Figure 55). Au Chalet brûlé un inventaire en plein a déjà été réalisé, nous pouvons ainsi comparer les résultats obtenus (Figure 56).

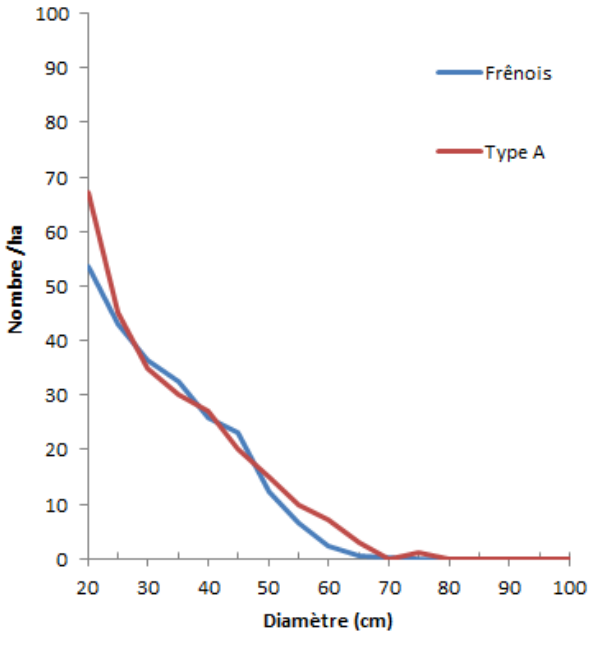


Figure 55 : Répartition des classes de diamètre pour les résineux dans la forêt du Frênois

Inventaire	7B	9B
En plein (date) + passage à la futaie – coupe	231/ha (2004)	194/ha (2010)
Placettes (erreur d'échantillonnage)	195/ha (14%)	166/ha (14%)
Différence	16 %	15 %

Figure 56 : Nombre de tiges résineuses/ha

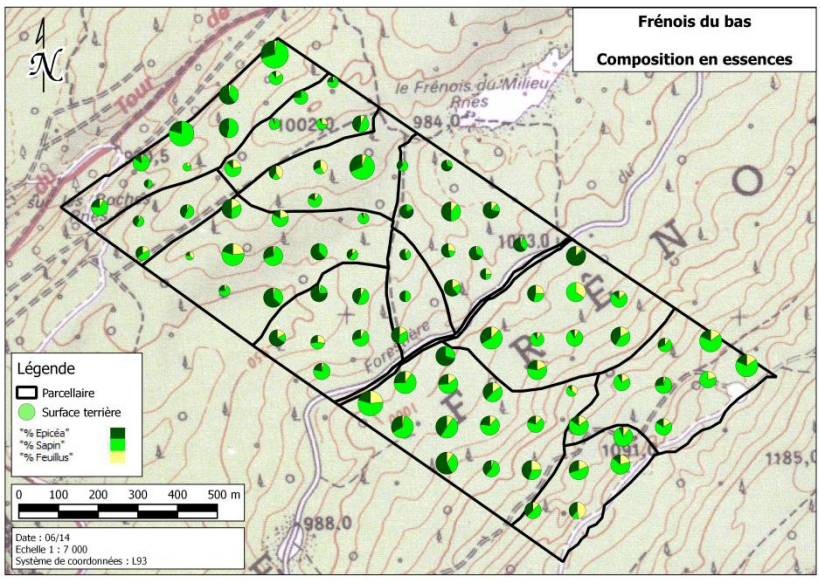
Seulement deux parcelles ont pu être comparées, les trois autres possédant trop de prés-bois, dans lesquels l'effort d'échantillonnage a été réduit pour l'analyse de la régénération. En considérant un passage à la futaie de l'ordre de 4 tiges/ha/an, le nombre de tiges résineuses par hectare suite à échantillonnage est en moyenne 15 % inférieur à celui de l'inventaire en plein. Ceci est correct en considérant que l'erreur d'échantillonnage est de 14 %, du fait d'un nombre de placettes insuffisant pour bénéficier d'informations précises par parcelle.

Les inventaires par placettes permettent également de noter une quantité plus grande d'indicateurs tels que la hauteur, la qualité des bois, la quantité de perches, le type de peuplement, etc. Tout cela sans pour autant être plus chronophage qu'un inventaire en plein (Figure 57). Enfin, deux derniers points sont intéressants dans cette méthode. Tout d'abord le fait de bénéficier d'informations ponctuelles spatialisées permettant de différencier des zones à l'intérieur même d'une parcelle (Figure 58). Et enfin la possibilité, dans le cas des placettes permanentes, de suivre l'évolution dans le temps de toutes les variables relevées. Cette méthode ne s'applique cependant pas à tous les cas de figure. En effet un inventaire en plein sera plus justifié sur de petites surfaces, notamment si l'on a besoin de résultats à l'échelle de la parcelle, ainsi qu'en présence de peuplements fortement hétérogènes, impliquant une erreur d'échantillonnage trop élevée.

Temps par placette	Cheminement	Dendrométrie	Station	Perches	Régénération	Total
Mesure (min)	5	25	5	10	15	60
Saisie (min)	/	10	2	3	5	20

Figure 57 : Temps pour chaques étapes de l'inventaire (un seul opérateur)

Pour finir nous allons aborder le coût de ce type d'inventaire en prenant l'exemple de celui réalisé pour cette étude. 139 placettes ainsi que 417 sous-placettes ont été mesurées pour l'inventaire de régénération. Le temps de mesure sur le terrain a été en moyenne d'une heure par placette, et le temps de saisie au bureau d'environ vingt minutes. Durant une journée, un opérateur peut réaliser six placettes. Si l'on prend l'exemple du Frênois il a fallu environ 15 journées de terrain pour réaliser l'inventaire complet. Maintenant si l'on se focalise uniquement sur les mesures dendrométriques, ce coût d'inventaire peut être largement divisé par deux. Pour une forêt de 100 ha répartis en huit parcelles comme au Frênois, avec le même effort d'échantillonnage (86 placettes), sept jours auraient été nécessaires, soit une moyenne de 14 ha par jour pour un seul opérateur. La préparation au bureau de ce type d'inventaire est plus longue, malgré tout, le coût d'inventaire au regard de ces observations semble plus faible qu'en inventaire en plein.



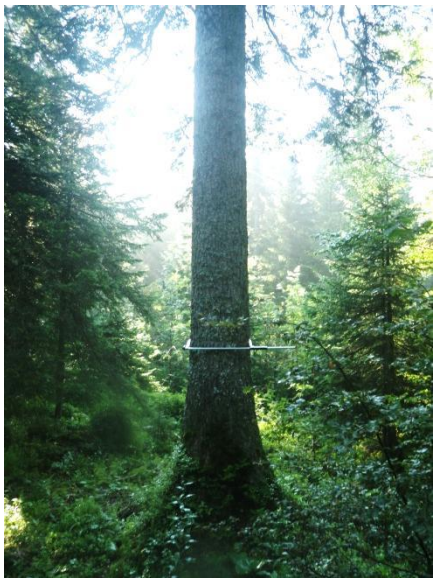


Figure 58 : Carte de composition en essence pour la forêt du frênois (Vert foncé : Epicéa ; Vert clair : Sapin ; Jaune : Feuillus) et photo illustrative d'un comptage

5.4 Différences entre sapin et épicéa

Dans la plupart des résultats rapportés tout au long de cette étude, la variable réponse étudiée fut la quantité de semis résineux. Cette démarche a été entreprise pour synthétiser l'information collectée et donner des clés pour le sylviculteur, qui désire un renouvellement continu de ses peuplements. Cependant, ces deux essences (Figure 59) n'apprécient pas forcément les mêmes conditions stationnelles ou structurelles, nous avons donc résumé les points les plus intéressants ressortis de cette étude.

Figure 59 : Cohabitation entre le sapin et l'épicéa

La première différence importante entre le sapin et l'épicéa s'observe au niveau de l'aire géographique, plus l'on se rapproche du Haut-Jura plus le sapin cède sa place à l'épicéa, pour complètement disparaître aux altitudes les plus élevées. Ce point est connu de tous, et a déjà amplement été décrit dans ce rapport, il ne sera donc pas plus évoqué dans ce paragraphe. Avec le réchauffement climatique, ce gradient altitudinal pourrait bien s'atténuer, nous en reparlerons dans le paragraphe 5.7.

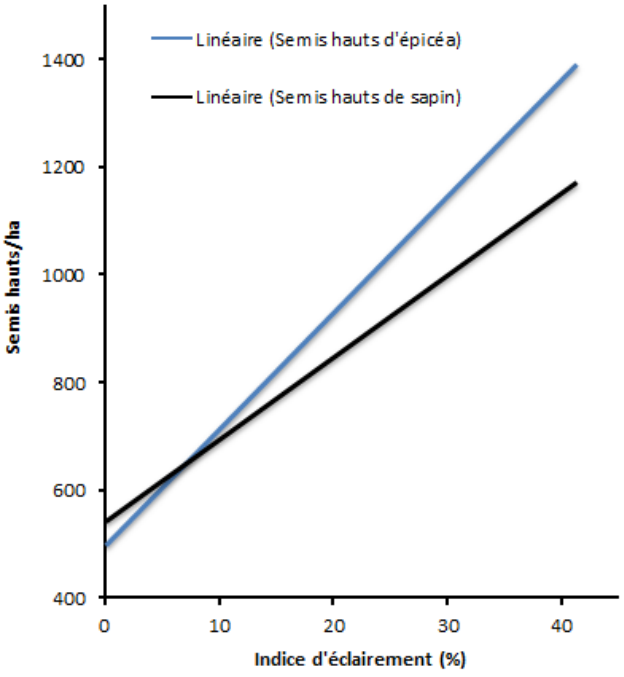


Figure 60 : Droites de réression linéaire pour les deux essences

Très héliophile pendant ses premiers stades de développement, l'épicéa apprécie un fort ensoleillement, ce qui n'est pas le cas du sapin qui tolère l'ombre lors de ses dix premières années (Rameau, 1993). Ceci peut s'observer sur les résultats d'inventaire (Figure 60). Les semis de sapins sont plus nombreux pour un indice d'éclairement inférieur à 10 %, alors que pour une lumière incidente directe plus forte la régénération acquise d'épicéa est plus dense. En moyenne pour un indice d'éclairement de 40 %, la quantité de semis d'épicéa a été de 20 % supérieure à celle des sapins. Ceci se retrouve également dans l'indice de corrélation de Spearman, avec un r^2 de 0,23 entre les épicéas hauts et l'indice d'éclairement, alors qu'il ne dépasse pas 0,12 entre les sapins et ce même indice (Annexe 10). Certaines situations particulières complètent aussi cette affirmation (paragraphe 5.5).

Un autre principe a été abordé dans cette étude, celui de l'alternance entre le sapin et l'épicéa. Celui-ci correspond à une meilleure régénération du sapin sous couvert d'épicéa et inversement, aboutissant à une rotation des essences lorsqu'elles sont toutes les deux en station. Les graphiques de la Figure 46 (paragraphe 4.2.2), ainsi que l'exemple de la meilleure placette régénérée (paragraphe 4.1.2) sont très parlants.

Enfin, il est également à noter une différence nette d'appétence entre ces deux essences résineuses, le sapin étant abrouti par les chevreuils, les cerfs ainsi qu'en certaines occasions les chamois (paragraphe 5.6), alors que les jeunes pousses d'épicéa n'attirent généralement pas le gibier.

Cette liste de différences, sera peut être d'autant plus prise en compte dans les années qui viennent si la différence de prix entre ces deux essences s'accentue (l'épicéa étant environ 10€ plus cher au m^3 sur pied).

5.5 Situations particulières

Cette page a pour but de présenter quelques situations particulières, ayant été observées sur le terrain, mais ne ressortant pas forcément de l'analyse statistique, du fait d'une occurrence trop faible, ou d'un contexte atypique.

Le premier point concerne la lumière perçue par les semis. Nous avons pu voir que le couvert est le premier rempart à la diffusion de la lumière directe. Ainsi comme il a été précisé, dans les situations de versant nord, avec une pente importante, ainsi qu'une densité de couvert forte en direction du sud, la quantité de lumière arrivant jusqu'au sol est minime, voire même nulle en hiver.

Pour continuer sur cet aspect de la luminosité, il a aussi été observé que les feuillus, en quantité raisonnable (comme tel était le cas sur les deux forêts), pouvaient être plus perméables à la lumière que les résineux et ceci pour deux raisons. Tout d'abord, ces essences caduques, permettent un rayonnement direct au sol plus important, au moins une partie de l'année. Et même quand la saison de végétation commence, lorsqu'ils débourrent, les feuillus laissent passer une certaine quantité de lumière directe. Enfin, le rayonnement diffus, difficilement quantifiable, semble plus élevé sous couvert de hêtres aux feuilles vert tendre, que de résineux aux aiguilles sombres (d'où la teinte « vert sapin »). Bien qu'une abondance de feuillus soit néfaste pour l'éclairement, une certaine fourchette (évaluée à 10-15 % de feuillus dans la surface terrière dans le paragraphe 4.3.2), semble donc au contraire être intéressante en terme de luminosité.

Tout au long de ce rapport, il a été annoncé que la concurrence herbacée était néfaste pour la régénération résineuse. Des cas concrets, sont tout de même à illustrer pour relativiser sur ces difficultés de renouvellement. En première ligne de la concurrence basse, les mégaphorbiais et les tapis de myrtilles peuvent recouvrir totalement le sol. Cependant, nous avons pu remarquer que le sapin, moins héliophile que l'épicéa, arrivait parfois à s'installer dans ces conditions de développement exubérant d'herbacées. La dernière photo de la Figure 61 en témoigne et laisse ainsi un espoir de renouvellement dans ces situations.

Enfin, beaucoup de semis résineux ont été observés sur d'anciennes souches. Ce type de régénération peut également permettre de répondre aux conditions difficiles du dernier exemple. De plus, le bois en décomposition fournit un substrat pour la germination idéal. Les semis de sapin et d'épicéa bénéficient ainsi d'un taux d'humidité et de minéraux nécessaires à leur installation durant quelques décennies. Ce dernier point milite donc aussi en faveur de la conservation d'une certaine quantité de bois mort en forêt. Les nombreux résineux aux racines apparentes (Figure 61), ressemblant à des contreforts d'essence tropicale, mais étant bien situés sur le massif jurassien, représentent à merveille ce cas particulier de régénération.

Figure 61 : Photos illustrant des situations atypiques

5.6 Pression cynégétique

Beaucoup d'ouvrages consacrés au renouvellement des peuplements forestiers, abordent ce thème de la pression cynégétique. Il peut ainsi sembler surprenant que ce facteur ne soit abordé qu'en dernière partie du rapport. Il a cependant été constaté que la dent du gibier sur les forêts étudiées n'était que peu dommageable sur la régénération résineuse comme vont en témoigner les résultats suivants.

En plus des deux cervidés (chevreuil et cerf), le chamois peut également être observé sur les territoires inventoriés. L'impact sur la régénération varie d'une espèce à l'autre, mais aussi suivant la rigueur hivernale et la densité des populations. Le chamois par exemple, ne s'intéresse aux aliments ligneux qu'en cas de nécessité absolue (disette hivernale ou surpopulation). Les chevreuils quant à eux réalisent deux types de dommages, des dégâts alimentaires (abroutissement de bourgeons et pousses) et des dégâts comportementaux (frottis sur les jeunes plants flexibles entre 20 cm et 1 mètre de hauteur). Les dégâts de cerf sont analogues à ceux du chevreuil, mais beaucoup plus redoutables. Les cerfs ne sélectionnent pas mais « broutent » tout ce qui se trouve à leur portée, et ils s'attaquent également aux arbres d'une troisième façon particulièrement meurtrière, l'écorçage. On comprend donc bien l'intérêt des forestiers à surveiller ces populations de gibier, ainsi que d'en tenir compte dans tout renouvellement forestier.

L'inventaire prévoyait le relevé de dégâts et une appréciation (abroutissement, frottis, écorçage) de ceux-ci pour en connaître la cause. Sur l'ensemble des deux forêts seulement trois perches d'épicéa ont subi des dégâts de frottis (absence de traces de dents) à une hauteur de moins d'un mètre, sur le haut de la forêt du Frênois (Figure 62). Aucun écorçage n'a été noté, l'impact du cerf sur les massifs étudiés semble donc limité. En revanche un abroutissement causé par le chevreuil (différent de celui des rongeurs par une coupure non nette) a été observé plus fréquemment, même si là encore, le dommage n'a jamais été préjudiciable. Comme nous pouvons d'ailleurs le visualiser avec la Figure 62, les feuillus sont bien souvent plus appétants que les résineux. Parmi les semis bas, les deux essences les plus touchées sont les sorbiers des oiseleurs et les sapins, mais de façon minime. Tandis que pour les semis hauts, le choix du gibier s'oriente préférentiellement vers deux essences feuillues, l'érable sycomore et le sorbier des oiseleurs (plus d'un semis sur trois étant touché). Pour les sapins, sur 11 % des semis hauts, des traces d'aboutissement ont été relevées, et seulement 4 % des semis furent classés non viables suite à un abroutissement. L'épicéa, le hêtre ainsi que les autres feuillus n'ont pratiquement pas été touchés quelle que soit la hauteur des semis. Comme il a été dit dans le chapitre sur les résultats, aucune corrélation ou tendance n'a pu être mise en lumière avec l'altitude, ni avec d'autres variables comme le type de peuplement, l'abroutissement étant trop diffus. L'enseignement à tirer de l'impact du gibier sera donc uniquement en termes de différence d'appétence des plants.

Essences	Recouvrement des semis bas
Autres F	**0,12% (recouvrement de l'essence)**
0	100,00% (par classe d'abroutissement)
Epicea	**14,49%**
0	100,00%
Erable S	**6,90%**
0 (nul)	98,87%
1 (traces)	0,13%
2 (marqué)	1,01%
Hetre	**18,58%**
0	100,00%
Sapin	**32,63%**
0	93,18%
1	6,66%
2	0,16%
Sorbier O	**27,27%**
0	93,62%
1	6,38%

Essence	Quantité de semis hauts
Autres F	**0,78%**
0	83,33%
1	16,67%
Epicea	**13,43%**
0	98,07%
1	1,93%
Erable S	**9,09%**
0	66,43%
1	32,14%
2	1,43%
Hetre	**37,38%**
0	99,83%
1	0,17%
Sapin	**13,11%**
0	85,15%
1	10,89%
2	3,96%
Sorbier O	**26,22%**
0	52,72%
1	42,33%
2	4,95%

Figure 62 : Tableau de recensement des dégâts de gibiers (en classes d'abroutissement), pour les semis bas et les semis hauts sur les deux forêts
Photo d'illustration d'un des seul frottis observé sur tout l'inventaire

5.7 Changement climatique

Le changement climatique est à présent bien démontré par la communauté scientifique, mais son impact sur un milieu aussi complexe que la forêt est difficile à apprécier (Annexe 12). Quatre phénomènes semblent cependant influer sur le milieu forestier : l'augmentation de la température, des bilans hydriques estivaux plus faibles, l'augmentation de la teneur en gaz carbonique et la fréquence des tempêtes. Les trois premiers phénomènes auront certainement un impact direct sur la régénération résineuse.

L'augmentation de la température tout d'abord, peut être analysée ici. Les scientifiques ont déjà par exemple enregistré une hausse de 1,3 °C à Besançon en 120 ans, et apparentent le réchauffement climatique à une progression vers le sud de 10 mètres par jour, ou encore une perte de 1 cm d'altitude par jour (Lucot et Joly 2014). Face à cette hausse de température, les sapins vont certainement étendrent leur aire de répartition plus en altitude, et la saison de végétation pourrait s'allonger. Sur ce dernier point, les deux essences résineuses seront tout de même plus sensibles aux gelés tardives, qui resteront fréquentes sur la Haute Chaîne, malgré l'augmentation de la température moyenne. Ce premier phénomène associé au changement climatique aurait pu donc se révéler positif pour les semis résineux, s'il n'était pas directement lié à des bilans hydriques estivaux plus faibles.

L'un des atouts du milieu forestier jurassien est de récolté une pluviométrie abondante palliant une profondeur de sol et ainsi une réserve utile faible voire très faible (Figure 63). Les précipitations sont un des phénomènes climatiques les plus difficiles à prédire. Les scientifiques émettent cependant l'hypothèse que les bilans hydriques jurassiens, c'est-à-dire la différence entre les précipitations et l'ETP devraient diminuer dans les prochaines années. Ceci serait d'autant plus vrai durant la saison estivale, entraînant fréquemment des sécheresses comme celle de l'été 2003. L'épicéa est l'essence qui craint le plus ces sécheresses estivales, entraînant notamment de sévères attaques de scolytes. Au niveau du renouvellement, le bilan hydrique diminuant, les graines auront plus de mal à germer et à se développer sur ces sols jurassiens à faible réserve utile.

Figure 63 : Exemple d'épicéa bénéficiant d'une très faible réserve utile

Le doublement de la concentration en CO_2 atmosphérique prévu, par rapport au niveau préindustriel, vers le milieu du XXI^{e} siècle aura forcément un impact sur les végétaux. En effet la respiration autotrophe de ces derniers conduit à l'absorption de gaz carbonique qui est ensuite réduite en matière organique. Ainsi, des études (Guehl, 1999) montrent que le doublement de la concentration atmosphérique en CO_2 par rapport au niveau actuel, affecte directement le fonctionnement des arbres, à travers une diminution de la conductance stomatique (entrainant une augmentation d'efficience d'utilisation de l'eau), ainsi qu'une stimulation de la vitesse de photosynthèse (permettant une augmentation de la vitesse de croissance). Un gain en productivité des arbres forestiers est d'ores et déjà observable, les semis devront donc également en profiter.

Enfin deux points restent en suspens concernant cette évolution rapide du climat forestier. Tout d'abord, la possible augmentation des ravageurs forestiers et notamment de tous les parasites de faiblesse indirectement liés au changement climatique. La seconde incertitude est en réalité un espoir, entièrement basé sur l'adaptation envisageable de ces essences forestières. Les massifs résineux jurassiens peuvent paraître monotones à certains de par l'omniprésence de deux essences, le sapin et l'épicéa. En réalité il s'agit d'une multitude d'individus pouvant être génétiquement ou phénotypement très différents les uns des autres, comme l'illustre très bien les épicéas columnaires. Cette grande variabilité permettra certainement une meilleure adaptation, d'où l'intérêt de privilégier la régénération naturelle.

Conclusion

De tout temps, les forestiers ont dû se projeter dans le long terme, voire le très long terme, pour anticiper l'évolution des peuplements. Très peu de métiers travaillant le vivant, peuvent ainsi prétendre être autant altruiste que le forestier, léguant le fruit de son activité aux générations futures. Cette essentielle nécessité d'anticipation peut être illustrée de différentes façons. En estimation forestière par exemple, la prise en compte de la valeur d'avenir pour les futaies régulières, ou de la valeur potentielle pour les peuplements irréguliers, témoignent bien de l'importance capitale d'un raisonnement sur le futur. Cette valeur potentielle est utilisée notamment pour suppléer la valeur de consommation, lorsque cette dernière est trop faible dans le cas de jeunes arbres. Elle est ainsi assez aisément quantifiable pour des bois moyens ou même des petits bois, mais qu'en est-il pour les semis et les perches ?

Ce mémoire n'a pas eu la prétention de prédire le devenir des peuplements jurassiens, mais il permettra peut-être d'anticiper sur les situations défavorables à l'installation d'une régénération naturelle résineuse de quantité et de qualité, ainsi que d'illustrer certains contextes plus favorables.

Certaines conditions stationnelles se sont en effet révélées très désavantageuses pour les semis d'épicéa et de sapin. C'est ainsi le cas des humus riches, des stations fraîches, des topographies de cuvette, tout cela étant bien souvent intimement lié, et induisant une concurrence herbacée ou feuillue vigoureuse. De plus, une forte pente couplée à une exposition nord, réduit grandement la luminosité, ce qui porte assez sensiblement préjudice au renouvellement. En outre, un gradient altitudinale a été remarqué, la régénération sur la Haute-Chaîne étant jusqu'à moitié moins importante que celle du deuxième plateau du Jura.

La structure du peuplement peut elle aussi interférer sur le renouvellement, la densité de la futaie étant en effet l'un des premiers obstacles. L'intervalle le plus favorable à la présence de semis de quantité et de qualité étant compris entre 15 et 20 m²/ha de surface terrière totale, soit entre 150 et 200 m^3 de volume commercial, ou encore entre 200 et 300 tiges/ha. Une densité plus faible induit une concurrence avec les herbacées ou les feuillus trop forte, alors qu'une densité plus forte réduit l'éclairement direct perçu au sol. Ce dernier point participe grandement à la qualité des semis ainsi qu'à leur accroissement, en plus d'en favoriser leur abondance. Il a ensuite été constaté que la présence de feuillus dans la surface terrière, autour de 10 à 15 % (environ 3m²/ha), était bénéfique à la régénération résineuse. Un martelage systématique de ces derniers n'est donc pas à préconiser, mais les contenir autour de ce seuil serait judicieux. Pour finir sur l'aspect intrinsèque du peuplement, nous avons pu voir que les structures régularisées freinaient l'installation et le développement des semis résineux, alors que les structures jardinées, permettaient une régénération de sapin et d'épicéa plus dense et moins concurrencée par les feuillus.

Enfin, l'aspect historique sylvicole n'est pas à négliger. En effet, un prélèvement se rapprochant de l'accroissement, ou ne serait-ce qu'une coupe récente favorise les semis résineux. Cette ouverture du peuplement agirait sur la quantité mais également sur la vigueur des plants de sapin et d'épicéa.

Tous ces paramètres, ainsi que l'ensemble des variables citées dans ce rapport ont été mesurés sur 150 ha de forêt jurassienne. Il conviendrait de réitérer ces mesures sur d'autres massifs forestiers pour obtenir des certitudes. Un suivi dans le temps avec une remesure des placettes permanentes mises en place pour cet inventaire, pourrait également apporter de nouvelles connaissances sur l'aspect évolutif du renouvellement. Considérer le milieu forestier comme figé serait une erreur, ce principe étant d'autant plus vrai de nos jours avec le bouleversement climatique. Néanmoins ces premières réflexions pourront servir de base, et participeront peut être à une meilleure prise en compte de cette étape obscure du développement d'un arbre.

Références bibliographiques

BASTIEN (Yves). 1998 — *Sylviculture des essences résineuses* (ENGREF) — 28 p.

BASTIEN (Yves). 2002 — *Futaie jardinée* (ENGREF) — 29 p.

BICHET (Vincent) et CAMPY (Michel). 2009 — *Montagne du Jura.* — Besançon : Néo Edition. — 303 p.

BOMBOIS (Jérôme) et PEROUX (Sandra) — Coopération franco-suisse pour le suivi du cerf sur le massif du Jura — *Forêt entreprise, n°. 211, p. 60-62.*

BRUCIAMACCHIE (Max). 2014 — *Techniques d'inventaire de peuplement.* (Cours Agroparistech)

CRPF (Franche-Comté). 2006 — *Schéma Régional de Gestion Sylvicole, fascicule Haut-Jura.* — 125 p.

GUEHL *et al.* 1999 — Forêt et augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2 : effets bénéfiques ou adverses ? — *Revue forestière française, n° 2, p. 254-265.*

GURNAUD (Adolphe). 1885 — *Troisième mémoire sur l'aménagement des bois de la commune de Syam* — Besançon — 31 p.

GROUALLE (Corinne) et Minot (Pierre). 1989 — *Croissance du sapin et de l'épicéa dans les futaies jardinées du Haut-Jura.* (Mémoire de fin d'études) — 69 p.

HERBERT (Isabelle) et REBEIROT (Fabien). 1981 — *Les futaies jardinées privées des hautes chaînes du Jura.* (Mémoire de fin d'études) — 123 p.

HERBERT (Isabelle) et REBEIROT (Fabien). 1985 — Les futaies jardinées du Haut-Jura — *Revue forestière française, vol. XXXVII, n° 6, p. 465-481.*

IFN. 1992 — *Jura, 3^{e} cycle* — 193p.

IGN. 2012 — *SER E20 : Deuxième plateau et Haut-Jura.* — 7 p.

JABIOL (Bernard). 1995 — *Clé de détermination des principales formes d'humus*

JENNY (Bernard). 1995 — Gestion de la qualité et de la dynamique de croissance des jeunes peuplements de chêne et de hêtre. (Mémoire de fin d'études) — 103 p.

LEBOURGEOIS (François). 2008 — *Autécologie des essences en Franche- Comté.* (Cours Agroparistech)

LUCOT (Eric) et JOLY (Daniel). 2014 — *Forêt et climat dans le Haut-Jura.* (Conférence)

ONF. — *Orientation Locale d'Aménagement pour le Haut-Jura.* — 49 p.

PARDE (Jean). 1991 — La méthode du contrôle d'hier à aujourd'hui — *Revue forestière française, vol. XLIII, n° 3, p. 185-202.*

PICHERY (Christophe). 2001 — *Eléments de réflexion pour une meilleure gestion du bois mort en forêt*. (Mémoire de fin d'études) — 93 p.

RAMEAU (Jean-Claude). 1993 — *Flore Forestière Française, Tome 2 (Montagne).* — IDF — 2421 p.

SCHAEFFER (Léon). 1953 — Estimation des peuplements forestiers après réalisation — *Revue forestière française, n° 6, p. 430-432.*

REBEIROT (fabien). 1997 — *Les futaies résineuses jardinées des hautes chaînes du Jura* — SFFC — 31 p.

REBEIROT (fabien). 2010 — *Les futaies résineuses jardinées du massif jurassien* — SFFC — 31 p.

THOUVENIN (Caroline). 2000 — *Analyse des relations entre dynamique naturelle des recrûs d'épicéa commun et facteur méso- et microstationnels sous deux pessières des Alpes du Nord.* (Thèse) — 309 p.

TYRODE (Hubert). 1991 — *Monographie de quatre gérants de Futaie jardinée du massif du Jura Français* (Mémoire de fin d'études) — 89 p.

VION-DELPHIN (François). 2001 — *Le sapin, enjeux anciens, enjeux actuels* (Sous la direction d'Andrée Corvol) — Editions l'Harmattan — 389 p.

Table des annexes

Annexe 1 : Morphologie architecturale du sapin ou de l'épicéa

Annexe 2 : Formes de semis

Annexe 3 : Typologie des stations forestières les plus courantes du Haut-Jura

Annexe 4 : Clé de détermination des humus forestiers

Annexe 5 : Typologie de peuplements

Annexe 6 : Mesure de l'Indice d'éclairement

Annexe 7 : Protocole d'inventaire

Annexe 8 : Fiche de relevés

Annexe 9 : Conversion d'une surface terrière en un nombre de tiges et un volume

Annexe 10 : Matrice de corrélation de Spearman (données placette)

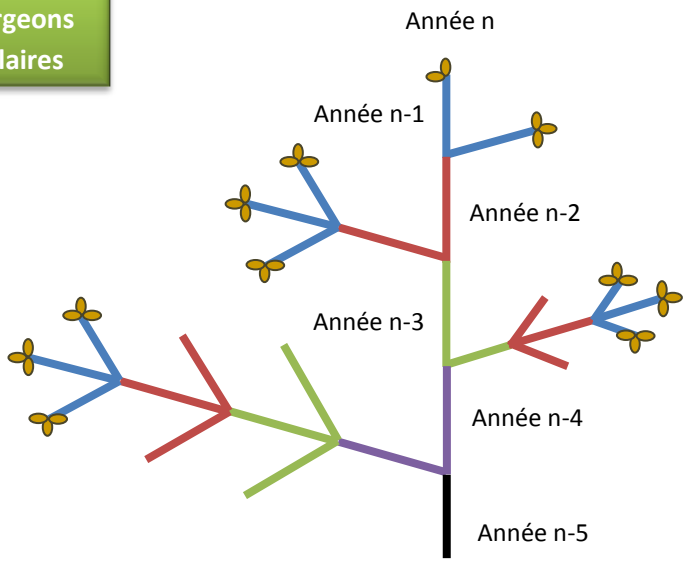
Annexe 11 : Matrice de corrélation de Spearman (données sous-placette)

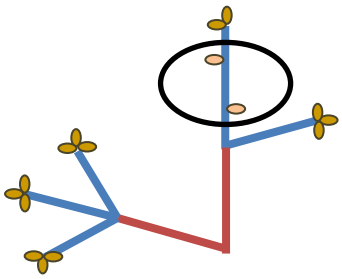
Annexe 12 : Changement climatique

Annexe 13 : Cheminement pour le croisement des données

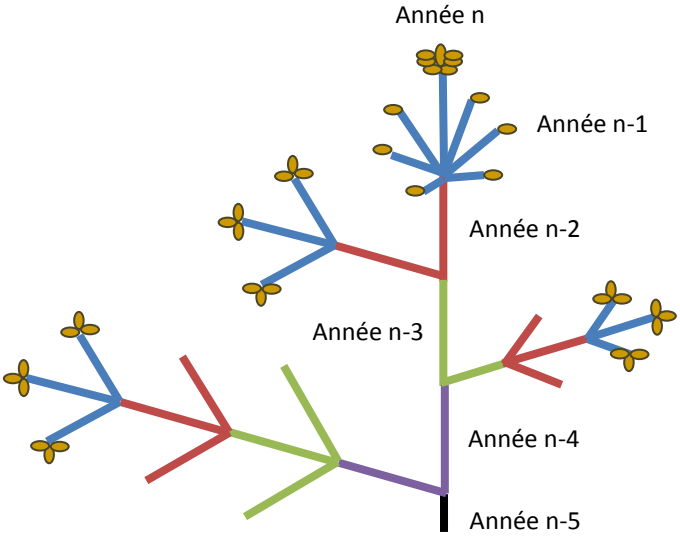
Annexe 1 : Morphologie architecturale du sapin ou de l'épicéa

De 1 à 6 bourgeons axillaires





Présence éventuelle de bourgeons intermédiaires



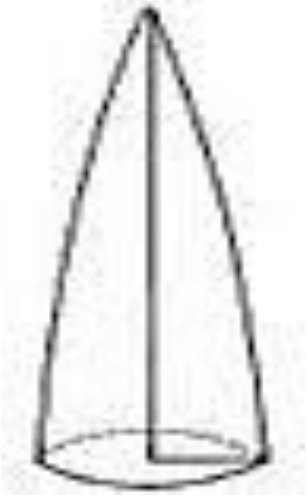
Annexe 2 : Formes de semis (d'après Groualle et Minot, 1989)

Forme de houppier conique :

Entre-nœuds courts, aspect de cône opaque, représente les arbres possédant un accroissement en hauteur moyen.

Forme de houppier néloïde :

Long entre-nœuds, individualisant nettement les verticilles, représente les arbres possédant un fort accroissement en hauteur.



Forme de houppier ovoïde :

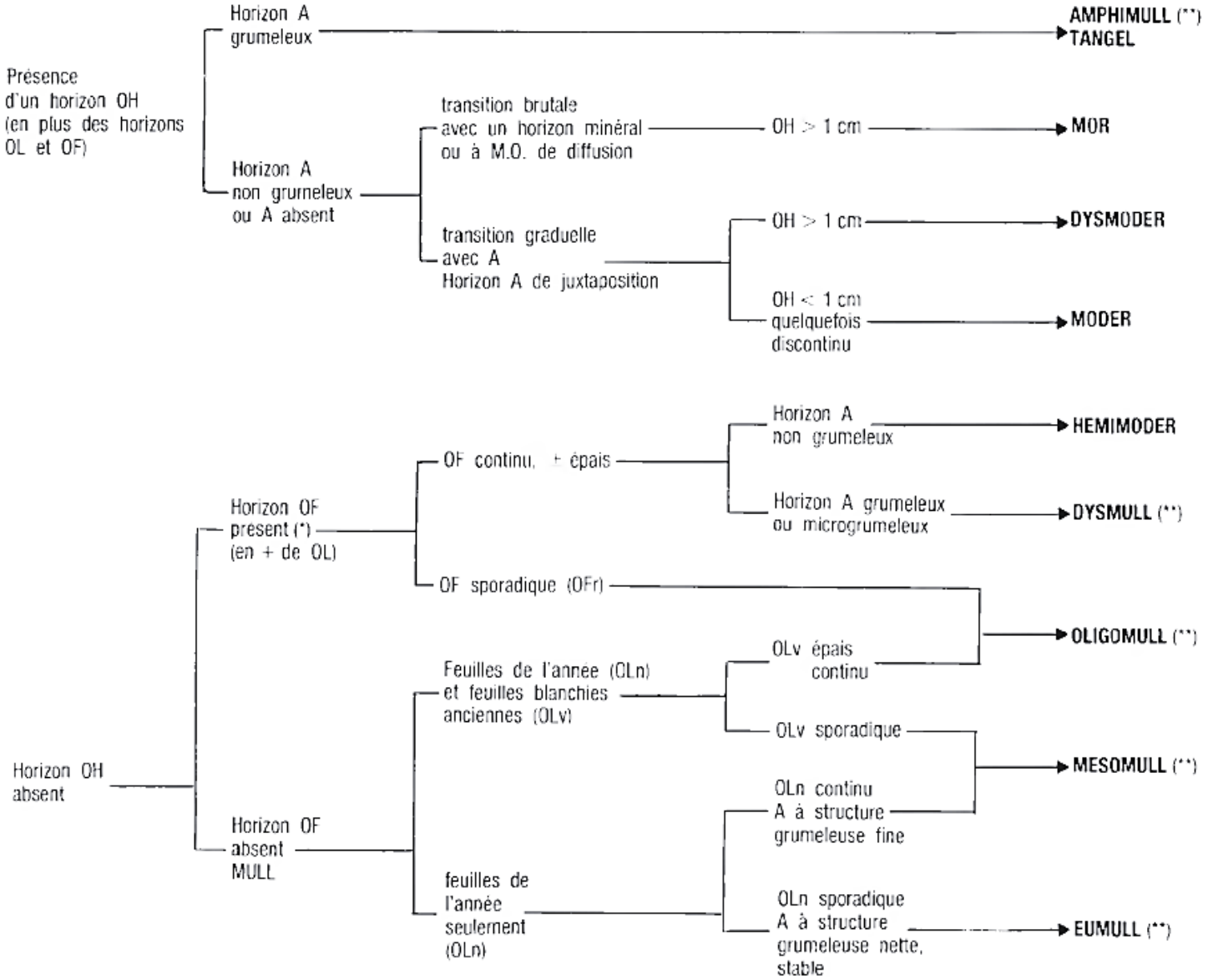
Entre-nœuds très courts dans lesquels on ne distingue plus les verticilles, représente les arbres à croissance en hauteur très ralentie.

Annexe 3 : Typologie des stations forestières les plus courantes du Haut-Jura (ONF)

N°		1	2	3	4	5	6	7	8
Station		**Hêtraie-sapinière (à épicéa) sur sol profond enrichi en limons**	**Hêtraie-sapinière (à épicéa) typique (dite à fétuque)**	**Hêtraie-sapinière (à épicéa) variante fraîche (dite à fougères)**	**Hêtraie-sapinière (à épicéa) sur lapiaz**	**Hêtraie-sapinière (à épicéa) culminale**	**Pessière à doradille**	**Hêtraie à érable sur sol peu profond**	**Hêtraie à érable sur sol profond**
Altitude		900 à 1 100 m	900 à 1 200 m	900 à 1 200 m	900 à 1 200 m	1 100 à 1 350 m	1 100 à 1 350 m	1 250 à 1 400 m	1 250 à 1 350 m
Topo		Plateau, combes larges ou pentes faibles	Pentes moyennes à faibles sur calcaires durs délités en fragments de taille moyenne (10 à 20 cm)	Dépressions remplies de matériaux fins (combes à fougères) marneuses un peu humides	Plateau ou positions sommitales de versant sur lapiaz (laizines)	Plateau ou pentes variables riches en cailloux de taille moyenne, en limite altitudinale supérieure de la hêtraie-sapinière	Zones de laizines ou empilements de gros cailloux laissant quelques vides entre eux	Parties sommitales des massifs boisés, plutôt sur les bosses	Dépressions (dolines ou combes) des parties sommitales des massifs boisés
Veg.	**Arbres**	Sapin, hêtre, épicéa, érable sycomore, sorbier des oiseleurs	Idem	Idem	Idem à la hêtraie-sapinière typique	Hêtre, érable sycomore, épicéa, Sapin	Epicéa, sapin, hêtre, sorbier des oiseleurs	Sapin, hêtre épicéa, alisier blanc, érable sycomore, sorbier des oiseleurs	Idem, mais strate souvent appauvrie par manque de régénération
	Arbustes	Chèvrefeuille noir, framboisier, camerisier, rosier alpin, ronces bien développées	Chèvrefeuille noir, framboisier, groseiller alpin, rosier alpin, camerisier	Idem, avec proportion supérieure de noisetier, et de chèvrefeuille alpin	Idem à la hêtraie-sapinière typique	Strate réduite : chèvrefeuille des alpes, framboisier, rosier alpin, camerisier	Strate réduite : chèvrefeuille noir, rosier alpin, groseiller alpin	Framboisier, groseiller alpin, rosier alpin, bois-joli, chèvrefeuilles noir et alpin	Idem avec même remarque
	Herbacées	Gaillet à feuilles rondes, dentaire pennée, élyme d'Europe, spirée barbe de bouc, prénanthe pourpre, fougère mâle, aspérule odorante	Fétuque des bois, élyme d'Europe, épervière des murs, primevère élevée, prénanthe pourpre, polystic à aiguillons, dentaire pennée, spirée barbe de bouc, fougère mâle, aspérule odorante (et plus en altitude : pyrole penchée et myrtille)	Idem, avec plus grand développement des fougères (dont dryoptéris dilaté), d'une mousse : mnie ondulée, généralement disparition des acidiphiles (pyrole, myrtille et prénanthe pourpre)	Idem à la hêtraie-sapinière typique, avec plus grand développement des calcicoles	Adénostyle glabre, polystic à aiguillons, laitue des Alpes, fougère mâle, aspérule odorante, sceau de salomon verticillé	Doradille verte, pyrole penchée, mélampyre des bois, listère à feuilles cordées	Strate riche et diversifiée : renoncule à feuilles d'aconit, renoncule laineuse, laiteron ou mulgédie des Alpes, crépis des marais, aconit tue-loup, pigamon à feuilles d'ancolie, dentaire pennée, persil sauvage, géranium des bois	Idem, avec grand, développement des hautes herbes : laitue ou mulgédie des Alpes, adénostyle glabre, adénostyle à feuilles d'alliaire
Sol		Brun lessivé à brun mésotrophe	Humo-calcique ou brun à pellicule calcaire	Brun à pellicule calcaire à brun mésotrophe profond	Lithocalcique à mor	Humocalcaire ou humocalcique, forte charge en cailloux	Lithocalcique à mor sur les blocs, brun entre les blocs	Humocalcique à brun à pellicule calcaire superficiel	Brun à pellicule calcaire à brun mésotrophe profond

N°		1	2	3	4	5	6	7	8
Station		**Hêtraie-sapinière (à épicéa) sur sol profond enrichi en limons**	**Hêtraie-sapinière (à épicéa) typique (dite à fétuque)**	**Hêtraie-sapinière (à épicéa) variante fraîche (dite à fougère)**	**Hêtraie-sapinière (à épicéa) sur lapiaz**	**Hêtraie-sapinière (à épicéa) culminale**	**Pessière à doradille**	**Hêtraie à érable sur sol peu profond**	**Hêtraie à érable sur sol profond**
Hdom.	**Epicéa**	34 à 42 m	28 à 34 m	32 à 40 m	25 à 32 m	25 à 35 m	28 à 35 m	28 à 32 m	32 à 38 m
	Sapin	30 à 38 m	25 à 32 m	25 à 32 m	22 à 28 m	22 à 28 m	22 à 26 m	X	X
	Feuillu	27 à 32	20 à 23 m	20 à 23 m	X	X	X	X	X
Qual.	**Epicéa**	Bonne	Assez bonne à bonne	Bonne	Assez bonne à bonne	Bonne à très bonne	Très bonne	Bonne	Très bonne
	Sapin	Assez bonne	Moyenne à assez bonne	Assez bonne	Médiocre	Médiocre à moyenne	Médiocre à moyenne	Médiocre	Médiocre
	Feuillu	Tournerie, tabletterie, chauffage	Tournerie, tabletterie aux altitudes inf. chauffage plus haut	Idem	Chauffage	Chauffage	Chauffage	Chauffage	Chauffage
Facilité de régénération		Un peu difficile	Très facile quand bon mélange sapin, épicéa, hêtre	Un peu difficile	Facile	Facile pour l'épicéa si beaucoup de lumière et contrôle vigoureux du hêtre	Très facile pour l'épicéa	Difficile (mais facilité par la présence d'arbustes feuillus : sorbier et érable notamment)	Très difficile (même remarque)
Concurrence herbacée		Assez importante (ronce souvent bien développée)	Assez faible	Assez importante, un peu de ronce possible aux altitudes les plus faibles	Faible	Peu importante	Très faible	Importante : développement rapide des hautes herbes	Luxuriante : développement explosif des hautes herbes de mégaphorbiaies
Concurrence feuillue		Hêtre envahissant	Hêtre envahissant	Hêtre envahissant	Faible	Hêtre très envahissant	Très faible	Hêtre un peu envahissant, mais souvent peu de semenciers	Faible
Ess. Obj.	**Princ.**	Epicéa et sapin	Epicéa et sapin	Epicéa et sapin	Epicéa	Epicéa	Epicéa	Epicéa	Epicéa
	Sec.	Hêtre et érable sycomore	Hêtre et érable sycomore	Hêtre et érable sycomore	Sapin, hêtre et érable sycomore	Sapin, hêtre, érable sycomore et sorbier des oiseleurs	Sapin, hêtre, érable sycomore et sorbier des oiseleurs	Sapin, hêtre, érable sycomore et sorbier des oiseleurs	Sapin, hêtre, érable sycomore et sorbier des oiseleurs
Extension sur la région		Peu étendue (limites altitudinale inférieures, proches du 2e plateau)	Très répandue	Très répandue	En mosaïque avec les autres variantes de la hêtraie-sapinière	Assez courante	Très répandue	Très répandue, type forêt du Massacre, ces deux stations sont souvent imbriquées en mosaïque	

Annexe 4 : Clé de détermination des humus forestiers (Jabiol, 1995)



(*) Ne pas confondre quelques débris de feuilles non blanchies de l'année (horizon OLt) avec un véritable horizon OF à débris généralement blanchis et mêlés de quelques grains de matière organique (boulettes fécales).
(**) Si l'horizon A fait effervescence à HCl, ces formes d'humus sont qualifiées de « carbonatées » (ex. Eumull carbonaté, mésomull carbonaté, etc.).

Annexe 5 : Typologie de peuplements (Rebeirot, 2010)

Conseil régional de Franche-Comté

SOCIÉTÉ FORESTIÈRE DE FRANCHE-COMTÉ

Les Futaies Résineuses Jardinées du Massif Jurassien

Régions naturelles et peuplements forestiers concernés

- **Hautes Chaînes du Jura :** partie la plus élevée du massif, avec une altitude presque partout supérieure à 1.000 mètres.
- **Deuxième Plateau et Pentes Intermédiaires du Massif Jurassien :** deux régions naturelles à moindre altitude, entre 600 et 1.000 mètres.
- **Forêts résineuses jardinées à dominante sapin-épicéa,** où les feuillus n'excèdent pas un tiers du volume total ou 30 % du nombre de tiges.

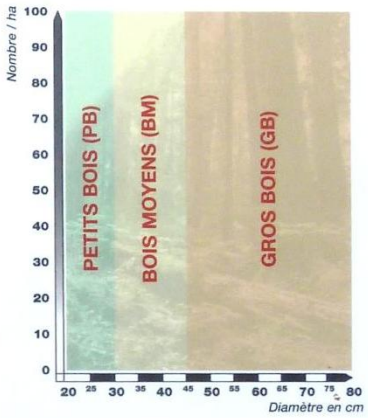
Identification des types de peuplements

Les types de peuplements sont déterminés **en structure** à l'aide de critères simples **ne prenant en compte que les résineux et la proportion de Petits Bois (PB), Bois Moyens (BM) et Gros Bois (GB), exprimée en nombre de tiges.**

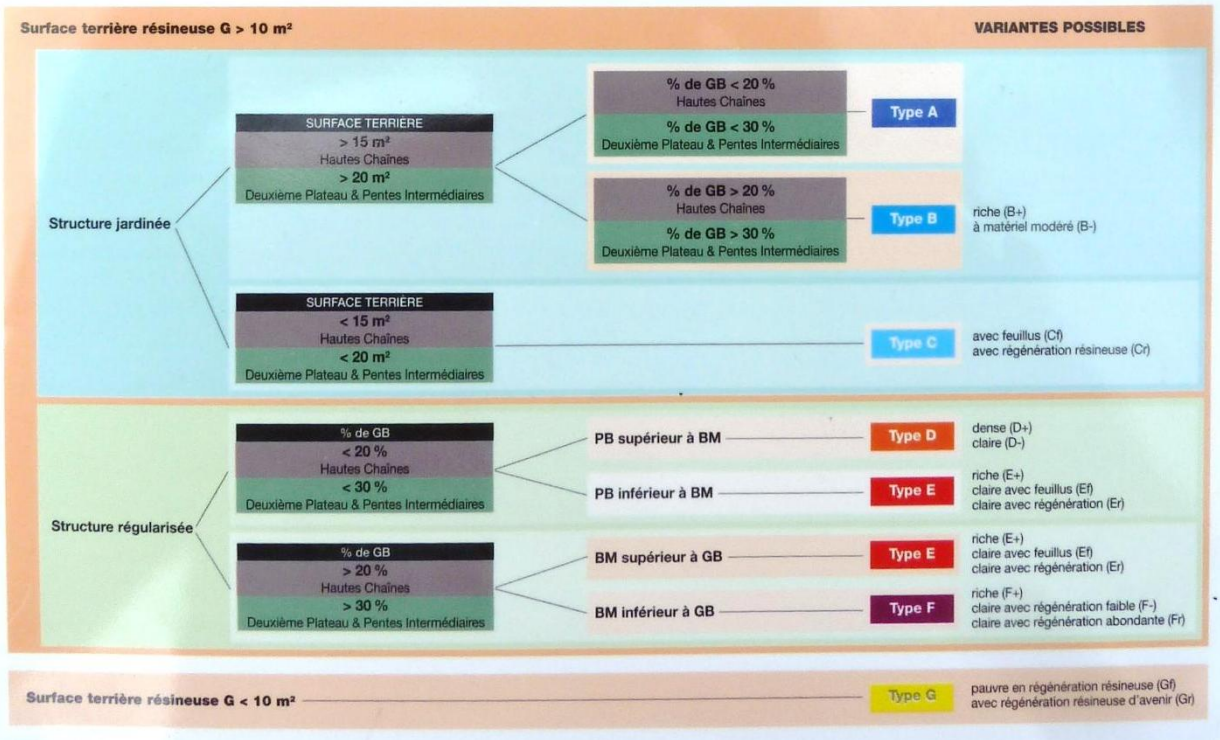
Il est nécessaire :

- de s'étalonner sur les limites des catégories de diamètres par des mesures au compas,
- d'observer les données chiffrées dans leur ensemble ; les transitions entre types ne sont pas brutales, les stades intermédiaires et les variantes sont possibles,
- d'adapter l'outil au terrain et non l'inverse.

Les catégories de diamètres



Clé de détermination en structure des types de peuplements



Annexe 6 : Mesure de l'Indice d'éclairement (D'après Pichery, 2001)

Beaucoup utilisée pour l'installation de panneaux photovoltaïques, la mesure des masques solaires en milieu forestier est à la fois simple, rapide, et peu coûteuse. Pouvant être utilisée été comme hiver, ainsi que quelque soit la topographie, elle a pour but de quantifier sous forme d'un indice d'éclairement (Ie) la lumière directe reçue par un point donné. Cette quantité de lumière dépend ainsi de deux paramètres :

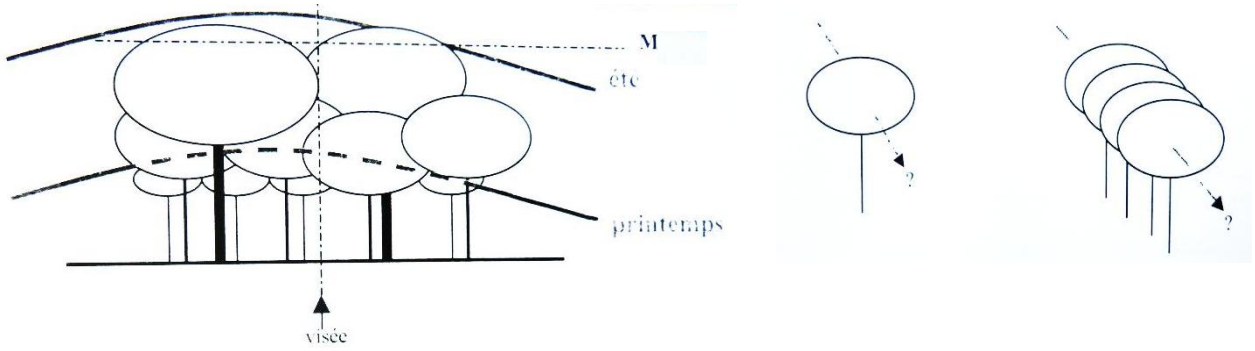
- le masque solaire, c'est-à-dire l'écran végétal d'absorption entre la lumière directe incidente et un point donné du sol forestier.

- la course du soleil à travers cet écran lumineux, variant au cours de l'année, mais étant également inhérente à la latitude du point étudié.

Détermination du masque solaire sur le terrain :

Un masque solaire se compose d'une succession d'angles entre l'horizontale et la visée du sommet du peuplement, pris pour un certain nombre d'azimuts. Le matériel nécessaire pour sa réalisation se compose donc uniquement d'une boussole et d'un clinomètre. Le masque solaire est relevé sur l'intervalle de la course du soleil, c'est-à-dire entre 100 grades (Est) et 300 grades (Ouest), pour un pas de mesure de 10 grades. Tout en sachant qu'en forêt, entre 100 et 150 grades ainsi qu'entre 250 et 300 grades, le soleil ne dépasse que rarement le couvert hormis dans les situations de trouées.

La principale difficulté de cette méthode réside dans cette détermination du masque. En effet la multiplicité de cas de figure de couvert forestier, peut conduire à une mesure variable selon les opérateurs. Pour l'étude de régénération, il a été choisi de ne mesurer qu'une seule valeur haute d'angle (M) par tranche d'azimut. En effet, les résineux majoritairement présents dans les forêts inventoriées, possèdent un houppier plus homogène que les feuillus, avec moins de « fenêtres » de lumière.



La seconde approximation de cette méthode est celle de la perméabilité des houppiers. On pourrait penser qu'un seul houppier est moins filtrant vis-à-vis de la lumière qu'une succession de houppier. Or B. Jenny (1995) écrit au sujet de la transmission de lumière à travers le houppier : « … plusieurs auteurs ont étudié la transmission de la lumière à travers les houppiers des arbres en forêt. Tous constatent unanimement une extinction du rayonnement global à travers le houppier, que le peuplement soit feuillu ou résineux. La courbe d'extinction du rayonnement à travers le feuillage est une exponentielle négative. L'éclairement relatif chute de 92 % à 15 % en 4 mètres […] atteignant son minima à partir de 6 mètres d'épaisseur de houppier. »

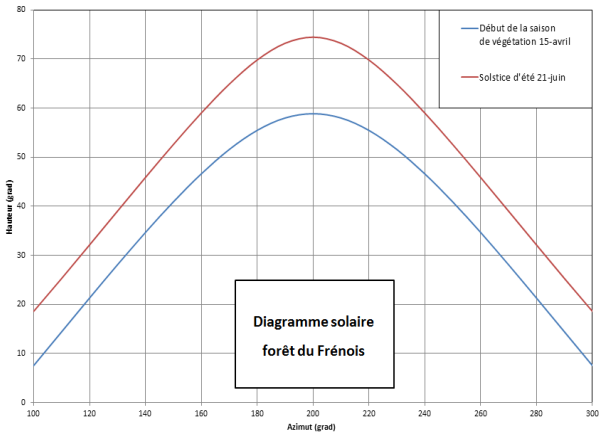
Détermination de la course du soleil :

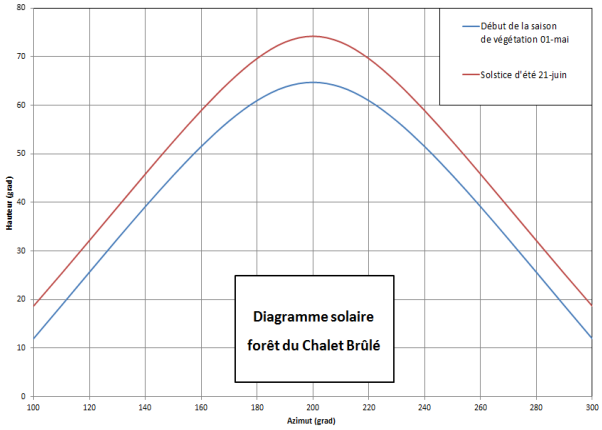
En connaissant l'équation de la course du soleil, on peut tracer pour n'importe quel jour de l'année la courbe de passage du soleil, c'est-à-dire la courbe donnant la hauteur du soleil en fonction de l'heure de la journée. La hauteur du soleil en grades est donnée par la relation suivante :

$$H = [\text{asin}(\sin(\text{déclinaison} \times \pi / 180) \times \sin(\text{latitude} \times \pi / 180) + \cos(\text{déclinaison} \times \pi / 180) \times \cos(\text{latitude} \times \pi / 180) \times \cos((\text{azimut} - 200) \times \pi / 200))] \times (200 / \pi)$$

La déclinaison étant un angle exprimant la position inclinée de la Terre par rapport au soleil, celui-ci varie donc au cours d'une révolution. Son calcul est fonction du jour de l'année, soit la formule approchée de Cooper, en degrés :

$$\text{Déclinaison} = 23{,}45 \times \sin((2 \times \pi \times (\text{rang du jour} + 284)) / 365)$$





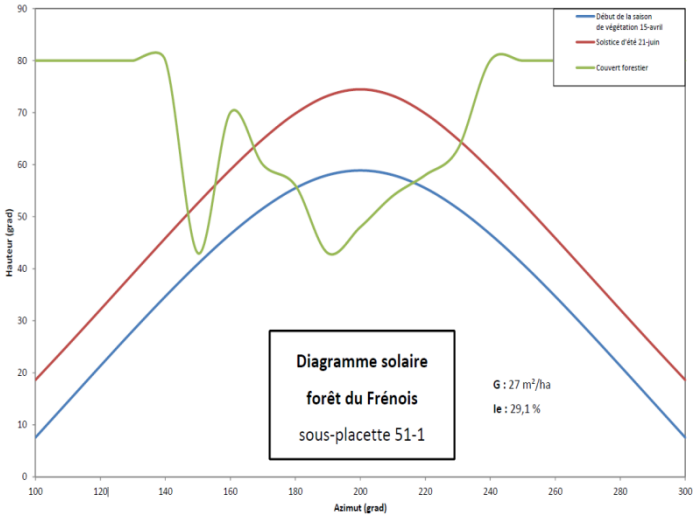
En disposant des deux valeurs de hauteur minimum (début de saison de végétation) et de hauteur maximum (solstice d'été), on peut visualiser sur le terrain la zone de battement du soleil au cours de cette période pour n'importe quel azimut, c'est-à-dire n'importe quelle heure de la journée.

Calcul de l'indice d'éclairement :

Il est ensuite possible de superposer la course du soleil et le masque solaire, autrement dit de superposer la course du soleil durant la période photosynthétique sur le profil de peuplement forestier :

Si l'on appelle θ_M la hauteur maximum du soleil au cours de la période de végétation pour un azimut donné et θ_m la hauteur minimum, on peut alors définir l'indice d'éclairement suivant, en pourcentage :

$$i_e = (\max(\theta_m - M\ ;\ 0) - \max(\theta_M - M\ ;\ 0)) / (\theta_m - \theta_M) \times 100$$



ie rend compte, pour une heure quotidienne donnée, du pourcentage de jours de la période de végétation où le point étudiée reçoit de la lumière directe. Il reste maintenant à définir un indice Ie qui sera une moyenne quotidienne du pourcentage de temps de la période de végétation où le point étudié reçoit de la lumière directe :

$$I_e = \text{Moyenne}_{[\text{azimut 100 à 300}]}\ (i_e)$$

Annexe 7 : Protocole d'inventaire

Le réseau de placettes est positionné par échantillonnage systématique, en suivant une maille carrée d'environ une placette par hectare (en affinant ce nombre à l'aide du coefficient de variation). Les placettes seront déplacées lors du travail cartographique pour trois raisons :

- Equilibrer les types de peuplement inventoriés
- Eloigner une placette de la limite de la forêt (minimum de 30 mètres)
- Déplacer une placette se situant sur une route ou une piste principale

Le cheminement jusqu'au centre de la placette se fait à l'aide d'un GPS. Une fois à destination, les 4 arbres précomtables (>17,5 cm de diamètre) les plus proches du centre (arbres n°1, 2, 3 et 4) sont mesurés (deux diamètres, azimut et distance du centre jusqu'à l'arbre). Ces arbres repères ne devront pas être martelés, ou dépérissants, enfin dans la mesure du possible aucun hêtre ne sera identifié comme arbre repère. Ceux-ci sont ensuite désignés par une marque verticale (griffe plus peinture), sur la partie basse du tronc et orientée vers le centre. Un relevé de la position exacte du centre de la placette sera effectué avec le GPS, par acquisition de points durant 300 secondes.

Liste du matériel nécessaire pour les relevés :

Compas	Clinomètre
Griffe	Dendromètre Suunto
Peinture	Boussole
Télémètre	Jalon d'1,5 mètre
GPS	

Placette :

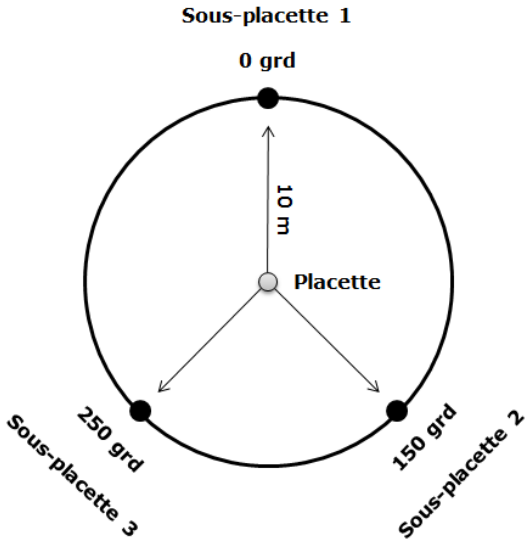
- Nom de la Forêt
- Numéro de parcelle
- Numéro de placette
- Date
- Coordonnées GPS
- Opérateurs

Station : *(centre de la placette)*

- Altitude *(à l'aide du GPS et de l'IGN)*
- Pente *(%)*
- Topographie : *(crêt ; combe ; plateau ; versant + exposition)*

Sylviculture depuis 15 ans :

- Années des coupes résineuses
- Années des coupes feuillues
- Années des travaux



Structure : *(centre de la placette)*

- Type de peuplement *(cf. typologie des futaies résineuses jardinées du massif jurassien)*
- Surface terrière des arbres précomptables par essence *(facteur 1, > 17.5 cm de diamètre, avec télémètre et compas, deux diamètres perpendiculaires, griffe horizontale et radiale dans le sens de comptage des arbres à 1m au-dessus de la découpe)*
- Annotation des « arbres limites » participant à la surface terrière actuelle, mais pas à celle d'il y a 15 ans, en renseignant la distance au centre de la placette *(accroissement sur le diamètre maximum en 15 ans de 7,5 cm, cf. temps de passage par catégories de diamètre et type de peuplement)*
- Surface terrière des souches datant de moins de 15 ans *(deux diamètres perpendiculaire passant par le cœur de l'arbre, distinction résineux/feuillus)*
- Hauteur dominante *(mesurée sur les 3 plus gros arbres du tour relascopique, à l'aide d'un suunto dendromètre, mesuré à 20m de l'arbre)*

Perches : *(cercle de 10 m de rayon en partant du centre de la placette)*

- Nombre de tiges par essence des classes 10 et 15 cm de diamètre
- Hauteur moyenne par essence et classe de diamètre, estimée au mètre près
- Qualité potentielle des perches résineuses
- Annotation d'une éventuelle présence de frottis de cerf

Régénération : *(3 sous-placettes d'1,5 m de rayon, à 10 m du centre dans les directions N, SE et SO)*

- Code de recouvrement des semis bas *(moins de 50 cm de hauteur)* et degré d'abroutissement ou frottis moyen par essences
- Nombre de semis hauts *(plus de 50 cm de hauteur et moins de 7,5 cm de diamètre)* par essence, hauteur totale *(jusqu'au bourgeon terminal)*. Pour les résineux : longueur des 5 derniers accroissements *(sans compter celui en cours, uniquement pour les qualités A, B, C, et estimée pour les semis de plus de 3 m de hauteur)*, qualité potentielle, degré d'abroutissement/frottis et forme.
- Concurrence muscinale/herbacée/arbustive en code de recouvrement
- Type d'humus *(cf. clé B. Jabiol et al.)*
- N° de station *(cf. typologie aménagement ONF du haut Jura)*
- Masque solaire *(entre 100° et 300°, par pas de mesure de 10°, suivant le couvert les mesures ne seront pas forcément effectuées de 100 à 150° et de 250 à 300°)*

Différentes catégories utilisées dans le protocole

- Qualité potentielle des perches résineuses :

A	B	C	D
perche d'avenir	Récupérable, qualité moyenne à bonne	douteux, avenir incertain ou compromis	nul, sans avenir, mauvaise qualité

- Qualité potentielle des semis résineux :

A	B	C	D
semis d'avenir	Récupérable, qualité moyenne à bonne	douteux, avenir incertain ou compromis	nul, sans avenir, mauvaise qualité

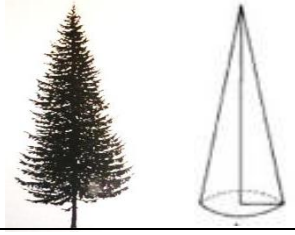
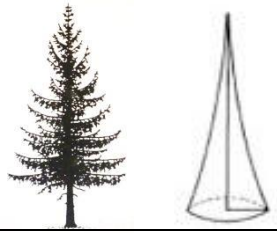
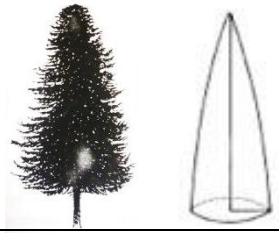
- Code de recouvrement :

0	+	1	2	3	4	5
absence	individus rares et recouvrement très faible	individus assez abondants, mais recouvrement faible	individus très abondants, recouvrement au moins 1/20^{e}	Nombre d'individus quelconque, recouvrement ¼ à ½	Nombre d'individus quelconque, recouvrement ½ à ¾	Nombre d'individus quelconque, recouvrement plus de ¾
0 %	< 1%	1-5 %	5-25 %	25-50 %	50-75 %	75-100 %

- Degré d'abroutissement ou frottis :

0	1	2
nul, aucune trace	moyen, quelques indices sur une minorité de plants	fort, atteinte à la vitalité ou au bourgeon terminal sur une majorité des plants

- Forme des semis haut :

Conique	Néloïde	Ovoïde
		

Annexe 8 : Fiche de relevés

Forêt : 1-Frénois 2-Chalet brûlé
N° parcelle : **N° placette :**
Date :
Coord E :
Coord N :

Inventaire de régénération

Opérateurs :

Altitude : m **Pente :** %
Topographie : crêt combe plateau versant (expo .....)
Années coupes résineuses :
feuillues : **travaux :**

Centre de la placette relascopique

Type de peuplement : A B C D E F G

Arbre	Azimut	Distance	Arbre	Azimut	Distance	Arbre	Azimut	Distance	Arbre	Azimut	Distance
1			2			3			4		

Arbre	Lim	Essence	Diam1	Diam2	Arbre	Lim	Essence	Diam1	Diam2	Arbre	Lim	Essence	Diam1	Diam2
1					15					29				
2					16					30				
3					17					31				
4					18					32				
5					19					33				
6					20					34				
7					21					35				
8					22					36				
9					23					37				
10					24					38				
11					25					39				
12					26					40				
13					27					41				
14					28					42				

G tot	

N ° souches	Année								Année						Année			

Arbre			
Hauteur			

Essence	Classe 10		H moy	Classe 15		H moy
Epicéa						
Sapin						
Hêtre						
Sorbier O						
Erable S						
Autres F						

Qual A		Qual B		Qual C		Qual D	

Perches sur un cercle de 10 m

Commentaires :

Sous placette 1 Nord (0 grd)

Semis bas (< 50 cm de hauteur) :

Essence	Code recouvr	Abrout/Frottis
Epicéa		
Sapin		
Hêtre		
Sorbier O		
Erable S		
Autres F		

Semis haut (>50 cm et <à 7,5 cm de diam) :

Essence	H tot	H accr	Qual	Abr/Fro	Forme

Concurrence	Code recouvrement
Muscinale	
Herbacée	
Ligneuse	

Humus : **N° de station :**

Masque solaire							
	100	110	120	130	140	150	160
	170	180	190	200	210	220	230
	240	250	260	270	280	290	300

Sous placette 2 Sud-Est (150 grd)

Semis bas (< 50 cm de hauteur) :

Essence	Code recouvr	Abrout/Frottis
Epicéa		
Sapin		
Hêtre		
Sorbier O		
Erable S		
Autres F		

Semis haut (>50 cm et <à 7,5 cm de diam) :

Essence	H tot	H accr	Qual	Abr/Fro	Forme

Concurrence	Code recouvrement
Muscinale	
Herbacée	
Ligneuse	

Humus : **N° de station :**

Masque solaire							
	100	110	120	130	140	150	160
	170	180	190	200	210	220	230
	240	250	260	270	280	290	300

Sous placette 3 Sud-Ouest (250 grd)

Semis bas (< 50 cm de hauteur) :

Essence	Code recouvr	Abrout/Frottis
Epicéa		
Sapin		
Hêtre		
Sorbier O		
Erable S		
Autres F		

Semis haut (>50 cm et <à 7,5 cm de diam) :

Essence	H tot	H accr	Qual	Abr/Fro	Forme

Concurrence	Code recouvrement
Muscinale	
Herbacée	
Ligneuse	

Humus : **N° de station :**

Masque solaire							
	100	110	120	130	140	150	160
	170	180	190	200	210	220	230
	240	250	260	270	280	290	300

Annexe 9 : Conversion d'une surface terrière en un nombre de tiges et un volume (d'après Brucciamachie, 2014)

L'un des intérêts d'une mesure de surface terrière est qu'elle est facilement transformable en un volume ainsi qu'en un nombre de tiges. Tandis que le cheminement inverse est plus compliqué. Le coefficient permettant cette conversion est le poids d'un arbre.

$$p_i = \frac{10000}{surface}$$

Formule générale

$$p_i = \frac{10000}{\pi R^2}$$

Formule surface fixe

$$p_i = \frac{10000.k^2}{\pi d_i^2}$$

Formule angle fixe

p_i : poids d'un arbre

R : rayon de la placette (m)

k : coefficient relascopique

d_i : diamètre de l'arbre *(m)*

Nombre de tiges/ha :

Le nombre de tiges par hectare est en fait égal au poids de l'arbre. En effet plus la surface d'échantillonnage sera grande, plus il y aura d'arbres comptés, qui auront ainsi un poids plus faible et seront moins représentatifs du nombre de tiges à l'hectare. Pour un inventaire à angle fixe, le nombre de tiges dépend donc uniquement des diamètres à 1m30, d'où la nécessité de mesurer ces derniers de façon la plus précise possible (deux mesures perpendiculaires au centimètre près). Dans le cas de cette étude de régénération, avec l'utilisation d'un coefficient relascopique de 2%, la formule suivante a été utilisée :

$$N/ha = \sum P_i = \sum ((10\,000 \times k^2) / (\pi \times d_i^2))$$

Avec k = 2% : $N/ha = \sum ((10\,000 \times (1/50)^2) / (\pi \times d_i^2))$

Soit : $\mathbf{N/ha = \sum (4 / (\pi \times d_i^2))}$

Volume/ha :

Chaque arbre précomtable ayant un diamètre moyen au centimètre près, il est possible de calculer son volume unitaire à l'aide d'un tarif de cubage à une entrée. Pour cet inventaire deux tarifs différents ont été utilisées suivant la région naturelle. Pour ramener ce volume unitaire à l'hectare il suffit ensuite de le multiplier par son poids, soit la formule suivante :

Avec k = 2% : $\mathbf{V/ha = \sum (V_i \times (4 / (\pi \times d_i^2)))}$

Annexe 10 : Matrice de corrélation de Spearman
(données placette)

En ligne : Variables à expliquer
En colonne : Variables explicatives

Remarques : Les variables de semis bas et de semis hauts (récoltés à l'échelle des sous-placettes), ont été moyennées par placette. La répartition des essences ainsi que des catégories de bois sont exprimées en pourcentage de la surface terrière totale

	Altitude	Annee.depuis.feu	Annee.depuis.resi	Annee.depuis.trav	Bas.autresF	Bas.epi
Bas.autresF	0.0940568217	-0.14654598	0.0948895355	0.256413568	1.0000000000	0.0322512338
Bas.epi	0.0882157275	0.19801259	0.0526614497	-0.116029950	0.0322512338	1.0000000000
Bas.feu	0.6602381706	0.57221586	0.4062268431	-0.055597060	0.0910595719	0.1105063737
Bas.het	0.4553715194	0.37322799	0.2825580700	0.079747777	0.1756108006	0.1492619595
Bas.resi	-0.0540118368	0.05187916	-0.0729298070	0.150301472	0.0482352309	0.5443853019
Bas.sap	-0.1412796898	-0.07059586	-0.1422891336	0.219401547	0.0900080942	0.1627441495
Bas.sor	0.5971316110	0.58439710	0.4076082748	-0.229788563	-0.0521712094	0.1101017504
Haut.autresF.ha	0.1000640255	0.06089159	0.1830242306	0.064335704	0.0355337594	-0.0044833230
Haut.epi.ha	-0.1177086391	-0.06130469	-0.1447491569	-0.144667476	-0.0560502667	0.2770163400
Haut.era.ha	0.4793155881	0.51547633	0.2205668706	-0.276821942	-0.1171333595	0.0380585456
Haut.feu.ha	0.3785285339	0.53068738	0.2135089656	-0.173111312	-0.2238586510	0.1506027415
Haut.het.ha	0.1325711803	0.33547153	0.0004258368	0.027311258	-0.2092147565	0.1236174725
Haut.resi.ha	-0.4170551653	-0.20485737	-0.3969901344	-0.031850097	-0.1714620160	0.0980284463
Haut.sap.ha	-0.5800202694	-0.28902588	-0.5448656016	0.103251059	-0.1781615806	-0.0962785084
Haut.sor.ha	0.4837250868	0.47632016	0.3644817855	-0.326410087	-0.1307242879	0.1926580667
Perches.autresF.ha	-0.0502340854	-0.10831942	0.0520725935	0.108455718	0.0595203699	-0.0291306301
Perches.epi.H	0.1113108154	0.13383700	0.1503248187	0.107414087	-0.1180481114	-0.0490425769
Perches.epi.ha	0.1394820565	0.17780840	0.0184949190	0.080588194	-0.0763953632	-0.0001759927
Perches.era.ha	-0.0561396114	0.01631016	0.0458903565	0.127311047	-0.0687642120	-0.0660407593
Perches.feu.H	0.0144020291	0.13163505	-0.0291051910	-0.018974357	-0.0329161149	-0.0742064616
Perches.feu.ha	0.0589522326	0.15311900	0.1123137299	0.002295607	-0.0718552014	-0.1145003139
Perches.ha	-0.2395814850	-0.12316847	-0.1724196409	0.204982191	-0.0169561069	-0.1053376156
Perches.het.ha	0.0053227682	0.12470735	0.0331974008	0.037652242	-0.0622605552	-0.0824958340
Perches.resi.ha	-0.3474501185	-0.22669316	-0.2829026497	0.270010877	-0.0017416492	-0.1057742487
Perches.sap.H	-0.5399094626	-0.47102911	-0.4471030565	0.151454118	0.0266385342	-0.0010422691
Perches.sap.ha	-0.6386542962	-0.53778847	-0.4911484216	0.188005924	-0.0157546832	-0.0608437342
Perches.sor.ha	0.1905287307	0.17806337	0.2105335469	-0.080526363	-0.0607923766	-0.1200677244

	Bas.feu	Bas.het	Bas.resi	Bas.sap	Bas.sor	Diff.G	G
Bas.autresF	0.091059572	0.175610801	0.048235231	0.090008094	-0.052171209	0.066771036	0.1078192833
Bas.epi	0.110506374	0.149261960	0.544385302	0.162744149	0.110101750	-0.024099026	-0.0451903994
Bas.feu	1.000000000	0.757298383	-0.034743345	-0.124506839	0.815233445	0.252629474	0.1308778659
Bas.het	0.757298383	1.000000000	0.021874012	-0.062616568	0.354469223	0.153599173	0.1173617235
Bas.resi	-0.034743345	0.021874012	1.000000000	0.843629607	-0.072248080	-0.133807702	-0.0276818742
Bas.sap	-0.124506839	-0.062616568	0.843629607	1.000000000	-0.183245040	-0.196918752	-0.0582639923
Bas.sor	0.815233445	0.354469223	-0.072248080	-0.183245040	1.000000000	0.234095752	0.1071457312
Haut.autresF.ha	0.055959601	0.093560780	-0.022523708	-0.023221826	0.081277392	0.164919633	0.1577292865
Haut.epi.ha	-0.185922674	-0.141754124	0.138499325	0.061234997	-0.185846813	-0.154969880	-0.2098962697
Haut.era.ha	0.395732724	0.126261258	-0.108453315	-0.187113961	0.471967815	0.131783263	-0.0779971975
Haut.feu.ha	0.462250528	0.280074424	0.035807266	-0.049068829	0.465568484	0.028019344	-0.1457043818
Haut.het.ha	0.266034440	0.285737992	0.094689297	0.032725523	0.170448087	-0.003892833	-0.1772842586
Haut.resi.ha	-0.446778608	-0.383981735	0.193661221	0.214482850	-0.346555533	-0.267877255	-0.2617819321
Haut.sap.ha	-0.508556424	-0.446167676	0.158659644	0.258012286	-0.380017778	-0.285493520	-0.2088355713
Haut.sor.ha	0.487947356	0.159561858	0.008714034	-0.076568619	0.626372675	0.072922780	-0.0527733616
Perches.autresF.ha	-0.109652567	-0.077643602	-0.088168323	-0.101261931	-0.094415520	-0.001798797	-0.0168367877
Perches.epi.H	0.175239064	0.114609250	-0.018187475	0.011336069	0.173741740	0.079419804	-0.0414908838
Perches.epi.ha	0.173071589	0.047686187	-0.019662439	0.003917072	0.178940731	0.103352897	-0.0498039860
Perches.era.ha	-0.102056713	-0.170063148	0.015263161	0.043603927	-0.022123448	0.041032071	-0.0441296367
Perches.feu.H	-0.022792032	0.004109850	-0.048825415	-0.015163678	-0.006907641	-0.153228846	0.0102605812
Perches.feu.ha	-0.062927958	-0.064697715	-0.133625134	-0.089676858	-0.008562674	-0.058474192	0.0066053539
Perches.ha	-0.197106000	-0.172274371	-0.039270485	0.021934909	-0.162322465	-0.029645772	-0.0356358611
Perches.het.ha	-0.097959451	-0.034237706	-0.085900261	-0.057266573	-0.094701129	-0.061285556	0.0699898052
Perches.resi.ha	-0.203391232	-0.171534202	0.005911586	0.076539614	-0.201853107	0.001431604	-0.0360693709
Perches.sap.H	-0.391415780	-0.244947981	0.058343769	0.082481285	-0.415428101	-0.103871563	-0.0071565263
Perches.sap.ha	-0.494689723	-0.355478038	0.062554521	0.105231104	-0.474573264	-0.165079423	-0.0438496880
Perches.sor.ha	0.178761048	0.054747327	-0.141857963	-0.081022403	0.234450566	0.083022606	-0.0098749757

	G2000	GautresF	GBM	Gepi	Gera	Gfeu	GGB
Bas.autresF	0.0833666829	0.048988924	0.0157352288	-0.1298068217	0.023514122	0.124247697	0.008710167
Bas.epi	0.0288895665	0.049169853	-0.1848006525	0.1355492417	-0.110934516	-0.080776088	0.193306645
Bas.feu	-0.0293728470	-0.234210569	-0.0717481214	0.4120108323	-0.290066466	0.141034934	0.157002780
Bas.het	0.0431492380	-0.172728516	0.0097504045	0.2165100227	-0.230540955	0.193057716	0.118313046
Bas.resi	0.0928385186	0.053273804	-0.1130403575	-0.0165278610	-0.006974316	-0.038899557	0.102048429
Bas.sap	0.0746185516	0.011155248	-0.0595246232	-0.1292125988	0.075447762	0.004057153	0.019970139
Bas.sor	-0.0448051821	-0.218808584	-0.2111370967	0.4846717378	-0.212626770	0.003256906	0.226261050
Haut.autresF.ha	0.0735936178	0.053207270	0.0044096965	0.1783042275	-0.026902771	-0.103665197	0.066840610
Haut.epi.ha	-0.0657537024	0.008482236	-0.0318705152	-0.0478747768	0.189330647	-0.093148577	0.106108672
Haut.era.ha	-0.1849579033	-0.149126711	-0.1682781523	0.4743567926	-0.085758374	0.039395730	0.206067302
Haut.feu.ha	-0.1475767239	-0.316029852	-0.2505005199	0.5293707688	-0.134046832	-0.062640744	0.328339261
Haut.het.ha	-0.1835926703	-0.294002866	-0.1420920545	0.3568161817	-0.121101542	-0.081146643	0.217602115
Haut.resi.ha	-0.0337630193	0.128532006	0.0698930931	-0.0814837544	0.243283806	-0.105860989	-0.043171214
Haut.sap.ha	0.0120008254	0.106284760	0.1840953726	-0.1046952312	0.190823989	-0.096640564	-0.217350277
Haut.sor.ha	-0.0863790317	-0.193769107	-0.2979568426	0.4618888171	-0.119374610	-0.052801838	0.282441502
Perches.autresF.ha	0.0499205096	0.355280727	0.0199498843	-0.1318544469	-0.046656018	0.112804339	-0.080502845
Perches.epi.H	-0.1055384674	0.008703370	0.0745103162	0.1600159617	-0.013734413	0.049292503	-0.035854937
Perches.epi.ha	-0.1565372430	-0.011114402	0.0645599515	0.1863466473	-0.035032434	0.017839352	-0.162508227
Perches.era.ha	-0.1431782317	0.072412778	0.0306122835	0.0005537164	0.356371780	-0.043447982	-0.059491778
Perches.feu.H	0.1110686372	0.083218444	-0.0644012677	-0.0151353632	-0.025940827	0.069935848	-0.030045881
Perches.feu.ha	0.0162352877	0.045896692	-0.0898624180	-0.0296611567	-0.029381518	0.074811786	-0.065277000
Perches.ha	-0.0591725457	0.195358279	0.2241584260	-0.2305753917	0.050814704	0.112115392	-0.328117487
Perches.het.ha	0.0829566325	0.014320024	-0.0384551296	-0.1258690465	-0.055554745	0.163977273	-0.100538282
Perches.resi.ha	-0.0651172583	0.180899383	0.3265327393	-0.2476685083	0.095835569	0.057672734	-0.381950514
Perches.sap.H	0.0750116388	0.192242028	0.2789296066	-0.3901482148	0.235252196	0.023227911	-0.307411781
Perches.sap.ha	0.0754381762	0.302053164	0.3391240296	-0.4635614100	0.145757905	-0.059649855	-0.384206750
Perches.sor.ha	-0.1184946487	-0.115292928	-0.0672073897	0.2356699205	-0.018144564	-0.124460121	-0.069361810

	Ghet	GPB	Gresi	Gsap	Gsor	Haut.autresF.ha	Haut.epi.ha
Bas.autresF	0.121920357	0.0004991712	-0.130744639	0.085899773	-0.077428716	0.035533759	-0.056050267
Bas.epi	-0.027021583	-0.0403028703	0.086900302	-0.107380752	-0.142097524	-0.004483323	0.277016340
Bas.feu	0.230853250	-0.1124428357	-0.137539045	-0.447425089	0.034655951	0.055959601	-0.185922674
Bas.het	0.306360702	-0.1718724692	-0.189352831	-0.274783870	-0.101166396	0.093560780	-0.141754124
Bas.resi	-0.023070830	-0.0387750364	0.032186922	0.043981597	-0.087015155	-0.022523708	0.138499325
Bas.sap	-0.004487346	-0.0005171210	-0.012989100	0.151149274	-0.059814758	-0.023221826	0.061234997
Bas.sor	0.057971428	-0.0441599215	-0.003195924	-0.480743269	0.103794241	0.081277392	-0.185846813
Haut.autresF.ha	-0.084381851	-0.0946069240	0.107184900	-0.145009330	-0.077413615	1.000000000	-0.046169697
Haut.epi.ha	-0.134519503	-0.1499555223	0.099083105	0.090033193	-0.049038168	-0.046169697	1.000000000
Haut.era.ha	0.086313640	-0.0890813538	-0.040826680	-0.494513057	-0.042965564	0.068827718	0.010292158
Haut.feu.ha	0.015192075	-0.1697010246	0.065810239	-0.485662218	-0.007193507	0.077341792	0.074510252
Haut.het.ha	0.015652812	-0.1387524120	0.079671576	-0.293503170	-0.014480227	-0.001178303	0.132526716
Haut.resi.ha	-0.198144197	-0.0476319959	0.105912432	0.134911994	0.007860253	-0.042500380	0.741005379
Haut.sap.ha	-0.175116828	0.0945719242	0.089765312	0.150601817	0.052988461	-0.070705491	0.115412536
Haut.sor.ha	-0.037873829	-0.0459994978	0.062116861	-0.442125032	0.077401051	0.048001132	-0.026071791
Perches.autresF.ha	0.039638873	0.0824642209	-0.110348893	0.056364280	0.068641583	0.188508059	-0.089126434
Perches.epi.H	0.025934016	-0.0290836862	-0.042720486	-0.165191741	-0.005577920	0.093240829	0.002896404
Perches.epi.ha	-0.026272155	0.1513819591	-0.007448198	-0.188038914	0.185068656	0.081618721	0.084212285
Perches.era.ha	-0.192439866	0.0518605816	0.045769259	0.006809587	-0.068718262	0.047290906	0.017257582
Perches.feu.H	0.040305477	0.1159325181	-0.061212779	-0.017483468	-0.066343042	0.014138615	0.040826117
Perches.feu.ha	0.048430562	0.1773093441	-0.065425177	-0.010021174	-0.069653126	0.101572434	-0.001658024
Perches.ha	0.002499235	0.1988689617	-0.104255589	0.183655813	0.153529029	-0.107742616	0.042630554
Perches.het.ha	0.159483407	0.1784886041	-0.155597174	0.071400409	-0.078972078	0.041234910	0.012702198
Perches.resi.ha	-0.058952629	0.1570099862	-0.053962444	0.227755560	0.205355518	-0.168983204	0.051789776
Perches.sap.H	-0.091413264	0.1614631672	-0.032126782	0.384044121	0.099812417	-0.201123130	0.044044305
Perches.sap.ha	-0.166441473	0.1649083044	0.053262216	0.482008556	0.057964323	-0.164425380	0.098309885
Perches.sor.ha	-0.098127124	0.1426740763	0.127514817	-0.206349296	-0.055744536	0.007349889	-0.024655587

	Haut.era.ha	Haut.feu.ha	Haut.het.ha	Haut.resi.ha	Haut.sap.ha	Haut.sor.ha	Hdom
Bas.autresF	-0.1171333595	-0.2238586510	-0.2092147565	-0.171462016	-0.178161581	-0.130724288	-0.025238236
Bas.epi	0.0380585456	0.1506027415	0.1236174725	0.098028446	-0.096278508	0.192658067	-0.049038779
Bas.feu	0.3957327241	0.4622505276	0.2660344399	-0.446778608	-0.508556424	0.487947356	-0.081429533
Bas.het	0.1262612584	0.2800744237	0.2857379918	-0.383981735	-0.446167676	0.159561858	-0.175451698
Bas.resi	-0.1084533147	0.0358072664	0.0946892965	0.193661221	0.158659644	0.008714034	0.010042147
Bas.sap	-0.1871139612	-0.0490688290	0.0327255228	0.214482850	0.258012286	-0.076568619	-0.008353203
Bas.sor	0.4719678151	0.4655684844	0.1704480870	-0.346555533	-0.380017778	0.626372675	0.031641273
Haut.autresF.ha	0.0688277184	0.0773417923	-0.0011783030	-0.042500380	-0.070705491	0.048001132	-0.028727540
Haut.epi.ha	0.0102921582	0.0745102523	0.1325267164	0.741005379	0.115412536	-0.026071791	0.038103196
Haut.era.ha	1.0000000000	0.6178964779	0.2692720525	-0.083719738	-0.153040808	0.611551347	0.059498928
Haut.feu.ha	0.6178964779	1.0000000000	0.8038488009	-0.035406248	-0.166182032	0.704455817	0.138189663
Haut.het.ha	0.2692720525	0.8038488009	1.0000000000	0.041662223	-0.078415950	0.268833040	0.112750249
Haut.resi.ha	-0.0837197377	-0.0354062482	0.0416622229	1.000000000	0.686211290	-0.121652820	0.055252343
Haut.sap.ha	-0.1530408081	-0.1661820323	-0.0784159501	0.686211290	1.000000000	-0.188895090	0.017433432
Haut.sor.ha	0.6115513467	0.7044558174	0.2688330401	-0.121652820	-0.188895090	1.000000000	0.047344628
Perches.autresF.ha	-0.1389963341	-0.1939052161	-0.2222302017	-0.025955613	0.009277443	-0.081237725	0.023161099
Perches.epi.H	-0.0003604325	0.0097041254	0.0289154187	-0.026376858	-0.015998709	0.022203163	-0.071875684
Perches.epi.ha	0.1476890700	-0.0054219032	-0.0703574586	0.037222458	-0.027344317	0.062543420	-0.156631532
Perches.era.ha	0.1770387050	0.0001305029	-0.0282356775	0.075511591	0.163818159	0.010826399	0.109760203
Perches.feu.H	0.0116221913	-0.1334832123	-0.1409126956	0.038736565	0.035476946	-0.050922415	-0.003469249
Perches.feu.ha	0.0388882510	-0.1307896759	-0.1586105094	-0.072888641	-0.057616638	-0.046435277	-0.008053789
Perches.ha	-0.1392653700	-0.2474333131	-0.1559601694	0.139902578	0.212330292	-0.235868699	-0.179634275
Perches.het.ha	-0.0458590847	-0.1870862757	-0.1801364948	-0.036530186	-0.016568543	-0.131368197	-0.015220380
Perches.resi.ha	-0.1833835280	-0.2185184157	-0.1040627144	0.214153509	0.299377256	-0.241793303	-0.200444909
Perches.sap.H	-0.3777767488	-0.2878485964	-0.0707824966	0.234993537	0.321797754	-0.403430434	-0.036212648
Perches.sap.ha	-0.3889479015	-0.3215801763	-0.1138801213	0.380017391	0.493838550	-0.414438981	-0.087401533
Perches.sor.ha	0.2027132167	0.1152051597	0.1103045673	-0.147772655	-0.180885690	0.154277339	-0.073990729

	Ie.moy	Ntiges	Pente	Perches.autresF.ha	Perches.epi.H	Perches.epi.ha
Bas.autresF	-0.082345276	0.037011626	0.0486073164	0.0595203699	-0.1180481114	-0.0763953632
Bas.epi	0.068389483	-0.116922972	-0.2754679255	-0.0291306301	-0.0490425769	-0.0001759927
Bas.feu	0.063910725	-0.006203696	-0.1134171156	-0.1096525668	0.1752390645	0.1730715892
Bas.het	-0.021499527	-0.040400408	-0.1921545629	-0.0776436024	0.1146092501	0.0476861874
Bas.resi	-0.036818709	-0.078124114	-0.1370902729	-0.0881683230	-0.0181874750	-0.0196624389
Bas.sap	-0.016724663	-0.063836790	-0.0150141174	-0.1012619307	0.0113360691	0.0039170719
Bas.sor	0.138244628	0.011522146	-0.0699692838	-0.0944155202	0.1737417404	0.1789407315
Haut.autresF.ha	-0.136161392	0.057961596	0.0706005309	0.1885080586	0.0932408292	0.0816187214
Haut.epi.ha	0.225561069	-0.198107895	-0.0800620789	-0.0891264340	0.0028964041	0.0842122845
Haut.era.ha	0.218915807	-0.106715291	0.0065346399	-0.1389963341	-0.0003604325	0.1476890700
Haut.feu.ha	0.194823184	-0.217977611	-0.1308452852	-0.1939052161	0.0097041254	-0.0054219032
Haut.het.ha	0.114444153	-0.214745629	-0.1750547501	-0.2222302017	0.0289154187	-0.0703574586
Haut.resi.ha	0.236399878	-0.138490516	-0.0767848607	-0.0259556127	-0.0263768579	0.0372224581
Haut.sap.ha	0.116490419	-0.026496339	-0.0050485637	0.0092774428	-0.0159987087	-0.0273443172
Haut.sor.ha	0.193652020	-0.109094063	-0.1123136826	-0.0812377249	0.0222031631	0.0625434201
Perches.autresF.ha	-0.233408962	0.024923924	0.0914917617	1.0000000000	-0.1335509641	-0.1324187373
Perches.epi.H	-0.053086364	-0.005612586	0.0574921479	-0.1335509641	1.0000000000	0.5994694778
Perches.epi.ha	-0.038030839	0.091832361	0.0745261293	-0.1324187373	0.5994694778	1.0000000000
Perches.era.ha	-0.096790643	0.025020207	0.0753432313	-0.0568690841	0.1944620941	0.1047915037
Perches.feu.H	-0.138094834	0.042790076	0.0625837401	0.1884303495	0.0719252747	0.0909753869
Perches.feu.ha	-0.201911897	0.087368418	0.0644280772	0.2629782403	0.0582300509	0.1925230840
Perches.ha	-0.203199514	0.163194119	0.0212826737	0.0829913704	0.3441622764	0.5199449105
Perches.het.ha	-0.212550320	0.144893707	0.0367733024	0.1197893800	0.0238437594	0.1699962615
Perches.resi.ha	-0.097253658	0.165859404	0.0029828977	-0.0317171036	0.3675870677	0.4700557912
Perches.sap.H	-0.163325264	0.163156127	-0.1277218754	0.1062939548	-0.1533939036	-0.1417208857
Perches.sap.ha	-0.112843335	0.158245885	-0.0177342728	0.1744611157	-0.1567223720	-0.1939594528
Perches.sor.ha	0.027319611	0.075465085	0.0369979186	-0.1074609251	0.1815614708	0.2202790371

	Perches.era.ha	Perches.feu.H	Perches.feu.ha	Perches.ha	Perches.het.ha	Perches.resi.ha
Bas.autresF	-0.0687642120	-0.032916115	-0.071855201	-0.016956107	-0.0622605552	-0.001741649
Bas.epi	-0.0660407593	-0.074206462	-0.114500314	-0.105337616	-0.0824958340	-0.105774249
Bas.feu	-0.1020567131	-0.022792032	-0.062927958	-0.197106000	-0.0979594514	-0.203391232
Bas.het	-0.1700631481	0.004109850	-0.064697715	-0.172274371	-0.0342377064	-0.171534202
Bas.resi	0.0152631615	-0.048825415	-0.133625134	-0.039270485	-0.0859002609	0.005911586
Bas.sap	0.0436039266	-0.015163678	-0.089676858	0.021934909	-0.0572665730	0.076539614
Bas.sor	-0.0221234479	-0.006907641	-0.008562674	-0.162322465	-0.0947011292	-0.201853107
Haut.autresF.ha	0.0472909057	0.014138615	0.101572434	-0.107742616	0.0412349096	-0.168983204
Haut.epi.ha	0.0172575819	0.040826117	-0.001658024	0.042630554	0.0127021977	0.051789776
Haut.era.ha	0.1770387050	0.011622191	0.038888251	-0.139265370	-0.0458590847	-0.183383528
Haut.feu.ha	0.0001305029	-0.133483212	-0.130789676	-0.247433313	-0.1870862757	-0.218518416
Haut.het.ha	-0.0282356775	-0.140912696	-0.158610509	-0.155960169	-0.1801364948	-0.104062714
Haut.resi.ha	0.0755115915	0.038736565	-0.072888641	0.139902578	-0.0365301855	0.214153509
Haut.sap.ha	0.1638181589	0.035476946	-0.057616638	0.212330292	-0.0165685430	0.299377256
Haut.sor.ha	0.0108263990	-0.050922415	-0.046435277	-0.235868699	-0.1313681966	-0.241793303
Perches.autresF.ha	-0.0568690841	0.188430349	0.262978240	0.082991370	0.1197893800	-0.031717104
Perches.epi.H	0.1944620941	0.071925275	0.058230051	0.344162276	0.0238437594	0.367587068
Perches.epi.ha	0.1047915037	0.090975387	0.192523084	0.519944911	0.1699962615	0.470055791
Perches.era.ha	1.0000000000	0.083765103	0.207144970	0.173015411	0.0457600850	0.098104908
Perches.feu.H	0.0837651026	1.000000000	0.800859441	0.360289644	0.6750193743	0.006987495
Perches.feu.ha	0.2071449704	0.800859441	1.000000000	0.503402951	0.8871422833	0.018310254
Perches.ha	0.1730154106	0.360289644	0.503402951	1.000000000	0.5173803232	0.839348518
Perches.het.ha	0.0457600850	0.675019374	0.887142283	0.517380323	1.0000000000	0.091525875
Perches.resi.ha	0.0981049081	0.006987495	0.018310254	0.839348518	0.0915258753	1.000000000
Perches.sap.H	-0.0667478939	-0.054234865	-0.132557990	0.333222094	-0.0614511026	0.477568848
Perches.sap.ha	-0.0040622514	0.027051438	-0.058544091	0.427242255	0.0004129652	0.563736427
Perches.sor.ha	0.1220324324	0.387804631	0.373389672	0.144731411	0.0770954474	-0.003276797

	Perches.sap.H	Perches.sap.ha	Perches.sor.ha	V	Volume.feu	Volume.resi
Bas.autresF	0.026638534	-0.0157546832	-0.060792377	0.115596451	0.143390754	-0.1755896172
Bas.epi	-0.001042269	-0.0608437342	-0.120067724	-0.078377089	-0.202011355	-0.0530222310
Bas.feu	-0.391415780	-0.4946897228	0.178761048	0.042060704	-0.603822659	-0.2941657226
Bas.het	-0.244947981	-0.3554780382	0.054747327	0.084144783	-0.373291132	-0.2969940348
Bas.resi	0.058343769	0.0625545211	-0.141857963	-0.025314871	-0.072106609	0.1083459009
Bas.sap	0.082481285	0.1052311037	-0.081022403	-0.034409104	0.039412625	0.1720189180
Bas.sor	-0.415428101	-0.4745732642	0.234450566	0.005502744	-0.609900137	-0.2073128752
Haut.autresF.ha	-0.201123130	-0.1644253801	0.007349889	0.148297058	-0.041651678	-0.0962498550
Haut.epi.ha	0.044044305	0.0983098854	-0.024655587	-0.189196386	0.008687772	0.1105410624
Haut.era.ha	-0.377776749	-0.3889479015	0.202713217	-0.168759330	-0.568159650	-0.1057579392
Haut.feu.ha	-0.287848596	-0.3215801763	0.115205160	-0.195568070	-0.617773244	-0.1211567382
Haut.het.ha	-0.070782497	-0.1138801213	0.110304567	-0.195914464	-0.397274776	-0.0251826054
Haut.resi.ha	0.234993537	0.3800173914	-0.147772655	-0.228484426	0.190022788	0.2647288704
Haut.sap.ha	0.321797754	0.4938385501	-0.180885690	-0.166384596	0.306663806	0.3674007527
Haut.sor.ha	-0.403430434	-0.4144389807	0.154277339	-0.127909397	-0.581121699	-0.1347475004
Perches.autresF.ha	0.106293955	0.1744611157	-0.107460925	0.004097972	0.076548658	-0.0007275645
Perches.epi.H	-0.153393904	-0.1567223720	0.181561471	-0.068617367	-0.078709707	-0.0273028255
Perches.epi.ha	-0.141720886	-0.1939594528	0.220279037	-0.115321343	-0.170420629	-0.0090796212
Perches.era.ha	-0.066747894	-0.0040622514	0.122032432	-0.060947653	0.048298558	0.0142523821
Perches.feu.H	-0.054234865	0.0270514376	0.387804631	-0.001379726	-0.007240451	0.1423701914
Perches.feu.ha	-0.132557990	-0.0585440912	0.373389672	-0.012183191	-0.032432452	0.1005891391
Perches.ha	0.333222094	0.4272422549	0.144731411	-0.052698430	0.229100415	0.1201163338
Perches.het.ha	-0.061451103	0.0004129652	0.077095447	0.058979123	0.029875943	0.1455256054
Perches.resi.ha	0.477568848	0.5637364269	-0.003276797	-0.043896507	0.296612843	0.1343849596
Perches.sap.H	1.000000000	0.7928802968	-0.173513172	0.047813609	0.474632351	0.1815477794
Perches.sap.ha	0.792880297	1.0000000000	-0.169679424	0.006068013	0.549106188	0.2355205914
Perches.sor.ha	-0.173513172	-0.1696794238	1.000000000	-0.078769465	-0.149697243	-0.0300542134

Annexe 11 : Matrice de corrélation de Spearman
(données sous-placette)

En ligne : Variables à expliquer
En colonne : Variables explicatives

Remarques : Les variables des perches, dendrométriques et historiques (récoltées à l'échelle de la placette), ont été transposés aux sous-placettes. La répartition des essences ainsi que des catégories de bois sont exprimées en pourcentage de la surface terrière totale

	Altitude	Annee.depuis.feu	Annee.depuis.resi	Annee.depuis.trav	Bas.autresF	Bas.epi	Bas.feu
Bas.autresF	5.216356e-02	-0.083359609	0.052662368	0.144264180	1.000000000	-0.016529348	0.043208306
Bas.epi	3.086803e-02	0.097265923	0.044336392	-0.070064264	-0.016529348	1.000000000	0.075515986
Bas.feu	4.328939e-01	0.399305145	0.279734854	-0.057242102	0.043208306	0.075515986	1.000000000
Bas.het	2.481395e-01	0.224446794	0.171704203	0.070693178	-0.028201137	0.100409664	0.655692115
Bas.resi	-5.377630e-02	0.035007211	-0.063774168	0.067650735	0.015225882	0.612376874	0.036195316
Bas.sap	-1.313228e-01	-0.081992060	-0.109330528	0.115281100	0.020850948	0.173701803	-0.005232090
Bas.sap.abr	-9.922538e-02	-0.084031305	-0.030085772	-0.097713519	-0.023279014	0.045748764	0.036717691
Bas.sor	3.643142e-01	0.376499727	0.224490488	-0.157190745	-0.025005007	0.008955648	0.759907799
Haut.autresF.ha	5.589808e-02	0.033561307	0.103009290	0.036685893	0.079590412	0.049970439	0.045484950
Haut.epi.abr	8.187304e-02	0.070458524	0.034555193	-0.059633445	-0.007685013	-0.030635512	-0.057106463
Haut.epi.H	-4.752402e-02	0.001493898	-0.106057164	-0.055268252	-0.060062610	0.271537760	-0.152957215
Haut.epi.ha	-5.736284e-02	-0.010260767	-0.102995773	-0.069307859	-0.057875421	0.299385755	-0.166046560
Haut.epi.Haccr	-5.974110e-02	0.003796825	-0.090449528	-0.055947310	-0.034190623	0.300219835	-0.112329646
Haut.era.ha	3.376426e-01	0.353673255	0.181328434	-0.177437196	-0.062793313	-0.029192075	0.165440964
Haut.feu.H	1.824248e-02	0.225770800	-0.047412244	-0.033284413	-0.124020483	0.052656224	0.027958857
Haut.feu.ha	2.779400e-01	0.414203598	0.158308336	-0.121178313	-0.093496352	0.073781504	0.264986042
Haut.het.ha	8.367898e-02	0.231219349	-0.001599474	0.037768489	-0.079078183	0.079916404	0.146179291
Haut.resi.ha	-2.816532e-01	-0.140817553	-0.290608537	-0.029734532	-0.100906372	0.167594276	-0.305046879
Haut.sap.abr	-5.627494e-02	-0.015429930	-0.059985094	-0.047026177	-0.025798158	-0.023670181	-0.024211761
Haut.sap.H	-3.912921e-01	-0.222631209	-0.368687162	0.049479321	-0.085852803	-0.037329629	-0.299531598
Haut.sap.ha	-3.941458e-01	-0.214666980	-0.373268717	0.049969396	-0.086001408	-0.028262109	-0.290419858
Haut.sap.Haccr	-3.389710e-01	-0.250641337	-0.297114681	-0.014381823	-0.073504460	0.003206675	-0.248123920
Haut.sor.ha	3.559680e-01	0.369339423	0.267980301	-0.250093774	-0.017739218	0.092508554	0.308317269
Perches.autresF.ha	-5.023409e-02	-0.108319424	0.052072593	0.108455718	0.033852889	-0.032194559	-0.072536336
Perches.epi.H	1.113108e-01	0.133837002	0.150324819	0.107414087	-0.067626351	-0.008807908	0.116856104
Perches.epi.ha	1.394821e-01	0.177808399	0.018494919	0.080588194	-0.043390411	-0.001558507	0.112919020
Perches.era.ha	-5.613961e-02	0.016310160	0.045890357	0.127311047	-0.038721981	-0.062665273	-0.087490780
Perches.feu.H	1.440203e-02	0.131635052	-0.029105191	-0.018974357	-0.017820622	-0.012829214	-0.008535179
Perches.feu.ha	5.895223e-02	0.153118999	0.112313730	0.002295607	-0.039841002	-0.043618242	-0.046089056
Perches.ha	-2.758166e-01	-0.138746708	-0.221684629	0.127360363	-0.049350711	-0.066644614	-0.180989301
Perches.het.ha	5.322768e-03	0.124707351	0.033197401	0.037652242	-0.034544033	-0.035381360	-0.063124218
Perches.resi.ha	-3.905696e-01	-0.260685941	-0.369195545	0.154973530	-0.066456149	-0.055914978	-0.204400992
Perches.sap.H	-5.399095e-01	-0.471029111	-0.447103056	0.151454118	0.015943300	-0.025569466	-0.270332712
Perches.sap.ha	-6.386543e-01	-0.537788467	-0.491148422	0.188005924	-0.008041865	-0.067373807	-0.348588389
Perches.sor.ha	1.905287e-01	0.178063368	0.210533547	-0.080526363	-0.034044841	-0.022704245	0.131044283

	Bas.het	Bas.resi	Bas.sap	Bas.sap.abr	Bas.sor	Diff.G	G	G2000
Bas.autresF	-0.0282011373	0.0152258820	0.020850948	-0.023279014	-0.0250050068	0.037752833	0.0613195501	0.0473607366
Bas.epi	0.1004096637	0.6123768740	0.173701803	0.045748764	0.0089556479	-0.029486643	-0.0163657771	0.0388265434
Bas.feu	0.6556921147	0.0361953160	-0.005232090	0.036717691	0.7599077988	0.184918422	0.1492619882	0.0375685946
Bas.het	1.0000000000	0.0756387069	0.046011084	0.022052887	0.1396139209	0.113112044	0.0947705172	0.0384011452
Bas.resi	0.0756387069	1.0000000000	0.828666600	0.162600171	0.0001983439	-0.077472213	-0.0135986623	0.0599606373
Bas.sap	0.0460110836	0.8286665996	1.000000000	0.187295921	-0.0205958041	-0.103584972	-0.0200473013	0.0457729190
Bas.sap.abr	0.0220528870	0.1626001711	0.187295921	1.000000000	0.0512771156	-0.182900625	0.0438094669	0.1738920427
Bas.sor	0.1396139209	0.0001983439	-0.020595804	0.051277116	1.0000000000	0.163226632	0.1109408523	0.0035725809
Haut.autresF.ha	0.0455165538	0.0028601864	-0.037698853	-0.023278534	0.0407398967	0.091461236	0.0877764855	0.0420045131
Haut.epi.abr	-0.0368911683	-0.0513860222	-0.043318227	-0.007281597	-0.0431676119	-0.019619356	-0.0844437168	-0.0844998875
Haut.epi.H	-0.1762640660	0.1527382302	0.016997596	-0.008104053	-0.0799584410	-0.070465846	-0.1164623692	-0.0727012359
Haut.epi.ha	-0.1704708850	0.1702859570	0.025551923	-0.004811626	-0.0985747138	-0.065798187	-0.1218975376	-0.0751663803
Haut.epi.Haccr	-0.1633324103	0.2106540388	0.066083992	-0.025784438	-0.0569342435	-0.025931749	-0.0896961224	-0.1075674208
Haut.era.ha	-0.0525062959	-0.0692430165	-0.088894023	-0.059497049	0.2056142139	0.077896823	-0.0418192261	-0.1048188863
Haut.feu.H	0.0147722477	0.0939041808	0.062987026	-0.040096128	0.0177877645	-0.074832217	-0.1389857584	-0.0696927328
Haut.feu.ha	0.1183747180	0.0949962341	0.038185945	-0.004583939	0.2477219684	0.016406816	-0.0954965877	-0.0841519769
Haut.het.ha	0.2321784061	0.1157079216	0.080125789	0.008320071	0.0308763962	-0.010073703	-0.1037346554	-0.0942657106
Haut.resi.ha	-0.2403355735	0.2026405557	0.127722474	0.018336932	-0.2161300781	-0.137718403	-0.1669770254	-0.0654248611
Haut.sap.abr	-0.0255041857	0.1035202906	0.145848653	0.077040098	-0.0158017258	-0.117833734	-0.0332063092	0.0593630872
Haut.sap.H	-0.1782735847	0.1444629719	0.173821075	0.027229920	-0.2534673371	-0.133142199	-0.1288689572	-0.0337067896
Haut.sap.ha	-0.1812067082	0.1725665013	0.205591820	0.034640678	-0.2354491741	-0.137029880	-0.1254642064	-0.0258544250
Haut.sap.Haccr	-0.1386801237	0.1215313716	0.128722631	0.011546122	-0.2098077380	-0.073165853	-0.0918288154	-0.0499774191
Haut.sor.ha	0.0331352219	0.0789204387	0.018058478	0.068291233	0.4146338591	0.055310540	-0.0322266926	-0.0543109788
Perches.autresF.ha	-0.0238367721	-0.0676764327	-0.062350018	-0.034188752	-0.0583994121	-0.001798797	-0.0168367877	0.0499205096
Perches.epi.H	0.0715697386	-0.0329040104	-0.023202849	-0.093704191	0.1006483700	0.079419804	-0.0414908838	-0.1055384674
Perches.epi.ha	-0.0162819310	-0.0181440418	-0.024084105	-0.033762486	0.1253436366	0.103352897	-0.0498039860	-0.1565372430
Perches.era.ha	-0.1274272122	-0.0149686372	0.028343350	-0.036689314	-0.0359350624	0.041032071	-0.0441296367	-0.1431782317
Perches.feu.H	0.0090084791	-0.0105910076	-0.040019607	0.013911008	0.0024038083	-0.153228846	0.0102605812	0.1110686372
Perches.feu.ha	-0.0292899595	-0.0731997509	-0.070310675	0.043341200	-0.0300145536	-0.058474192	0.0066053539	0.0162352877
Perches.ha	-0.1757082478	-0.0778068132	-0.032002486	0.057597729	-0.1118837367	-0.047756876	-0.0737690591	-0.0901639655
Perches.het.ha	0.0015662704	-0.0523183642	-0.054643908	0.076157755	-0.0754291877	-0.061285556	0.0699898052	0.0829566325
Perches.resi.ha	-0.2197135398	-0.0380433894	0.011585664	0.056510118	-0.1144919636	-0.079245176	-0.1206888766	-0.0957046898
Perches.sap.H	-0.1559450074	0.0039130885	0.051351998	-0.015881737	-0.2512405644	-0.103871563	-0.0071565263	0.0750116388
Perches.sap.ha	-0.2194604429	-0.0048091661	0.072510322	0.072950073	-0.2879967565	-0.165079423	-0.0438496880	0.0754381762
Perches.sor.ha	0.0116440959	-0.0460385441	-0.038269761	-0.028237694	0.1534603385	0.083022606	-0.0098749757	-0.1184946487

	GautresF	GBM	Gepi	Gera	Gfeu	GGB	Ghet	GPB
Bas.autresF	0.027906556	0.0085542887	-0.0742416291	0.0137065060	0.070624472	0.004239586	0.069005468	0.001396078
Bas.epi	-0.010577788	-0.1150604375	0.0909556554	-0.0834324215	-0.069395185	0.122496108	-0.027837649	-0.032885344
Bas.feu	-0.169049574	-0.0338223293	0.2850236260	-0.2078978148	0.087508110	0.088689050	0.150940036	-0.068486704
Bas.het	-0.100399249	-0.0237897331	0.1027586686	-0.1767383706	0.148926283	0.067145300	0.221829656	-0.078496384
Bas.resi	-0.029644402	-0.0769204455	0.0227498433	-0.0007541606	-0.032686024	0.059254647	-0.003934096	-0.008142867
Bas.sap	-0.002431291	-0.0216657769	-0.0805639109	0.0798488670	-0.032637129	0.011073821	-0.034266360	-0.017192595
Bas.sap.abr	0.033286608	0.0419280314	-0.1112275251	-0.0787369514	-0.071192079	-0.046625211	-0.058372434	0.043418360
Bas.sor	-0.155850460	-0.1000582011	0.3023598312	-0.1385815882	-0.019096028	0.093043761	0.013316271	0.018712823
Haut.autresF.ha	0.030635308	0.0035630422	0.1002785638	-0.0159515961	-0.058554087	0.037422360	-0.047720263	-0.054096896
Haut.epi.abr	-0.012109198	-0.0146669582	0.0745433743	-0.0259931327	-0.075814798	0.044606265	-0.069270955	-0.045219229
Haut.epi.H	0.000148968	0.0095865244	0.0030295552	0.1260040177	-0.042855934	0.018777407	-0.071532721	-0.065337223
Haut.epi.ha	-0.002335353	0.0128301624	-0.0031466111	0.1237149522	-0.044287738	0.018544176	-0.068015044	-0.067378677
Haut.epi.Haccr	0.017156947	0.0413099519	0.0241724160	0.0824919754	-0.048910147	-0.014408879	-0.076298956	-0.058861666
Haut.era.ha	-0.098942791	-0.1104565281	0.3302199876	-0.0824184620	0.042403185	0.147038451	0.082440004	-0.080033294
Haut.feu.H	-0.225298731	-0.1031474173	0.2273828365	0.0165784091	-0.120568198	0.212412017	-0.093278187	-0.179516954
Haut.feu.ha	-0.240881141	-0.1948335426	0.3962372849	-0.1080338390	-0.041418426	0.268765584	0.017354481	-0.149860368
Haut.het.ha	-0.196198599	-0.0790735328	0.2039374153	-0.0763924470	-0.011168715	0.140273965	0.047106766	-0.109358710
Haut.resi.ha	0.082946810	0.0841929594	-0.0282845142	0.1698343604	-0.078216056	-0.067862286	-0.136985603	-0.012998788
Haut.sap.abr	-0.040649897	0.0090209038	-0.0190285172	-0.0204875331	-0.019894218	0.040980585	0.004750540	-0.040050797
Haut.sap.H	0.110971342	0.1300159967	-0.0720070422	0.1135675188	-0.061279155	-0.147840506	-0.108616211	0.062689970
Haut.sap.ha	0.088420657	0.1268284288	-0.0565078353	0.1351010779	-0.069284868	-0.134561146	-0.119944031	0.048166425
Haut.sap.Haccr	0.018523125	0.0923699636	-0.0845079673	0.1046046793	-0.075293161	-0.122752184	-0.102376786	0.074253512
Haut.sor.ha	-0.136503358	-0.2229247887	0.3419668192	-0.1095581316	-0.045346153	0.234723890	-0.019277202	-0.061838355
Perches.autresF.ha	0.355280727	0.0199498843	-0.1318544469	-0.0466560182	0.112804339	-0.080502845	0.039638873	0.082464221
Perches.epi.H	0.008703370	0.0745103162	0.1600159617	-0.0137344126	0.049292503	-0.035854937	0.025934016	-0.029083686
Perches.epi.ha	-0.011114402	0.0645599515	0.1863466473	-0.0350324337	0.017839352	-0.162508227	-0.026272155	0.151381959
Perches.era.ha	0.072412778	0.0306122835	0.0005537164	0.3563717803	-0.043447982	-0.059491778	-0.192439866	0.051860582
Perches.feu.H	0.083218444	-0.0644012677	-0.0151353632	-0.0259408267	0.069935848	-0.030045881	0.040305477	0.115932518
Perches.feu.ha	0.045896692	-0.0898624180	-0.0296611567	-0.0293815181	0.074811786	-0.065277000	0.048430562	0.177309344
Perches.ha	0.256910509	0.1493930387	-0.1691207098	0.0569005035	0.010180792	-0.328644878	-0.102356908	0.282428760
Perches.het.ha	0.014320024	-0.0384551296	-0.1258690465	-0.0555547451	0.163977273	-0.100538282	0.159483407	0.178488604
Perches.resi.ha	0.252117741	0.2471279543	-0.1714670395	0.0969654936	-0.087050691	-0.371035216	-0.206462170	0.239592765
Perches.sap.H	0.192242028	0.2789296066	-0.3901482148	0.2352521955	0.023227911	-0.307411781	-0.091413264	0.161463167
Perches.sap.ha	0.302053164	0.3391240296	-0.4635614100	0.1457579053	-0.059649855	-0.384206750	-0.166441473	0.164908304
Perches.sor.ha	-0.115292928	-0.0672073897	0.2356699205	-0.0181445644	-0.124460121	-0.069361810	-0.098127124	0.142674076

	Gresi	Gsap	Gsor	Haut.autresF.ha	Haut.epi.abr	Haut.epi.H	Haut.epi.ha	Haut.epi.Haccr
Bas.autresF	-0.074319538	0.049208996	-0.0436010710	0.079590412	-0.007685013	-0.060062610	-0.0578754205	-0.034190623
Bas.epi	0.072724529	-0.067210459	-0.0961977454	0.049970439	-0.030635512	0.271537760	0.2993857555	0.300219835
Bas.feu	-0.084465956	-0.308703879	0.0232104934	0.045484950	-0.057106463	-0.152957215	-0.1660465598	-0.112329646
Bas.het	-0.147498094	-0.144394364	-0.0599503152	0.045516554	-0.036891168	-0.176264066	-0.1704708850	-0.163332410
Bas.resi	0.029160049	0.001539039	-0.0738703328	0.002860186	-0.051386022	0.152738230	0.1702859570	0.210654039
Bas.sap	0.026808736	0.105385566	-0.0633943240	-0.037698853	-0.043318227	0.016997596	0.0255519235	0.066083992
Bas.sap.abr	0.072634047	0.140656959	0.0235566968	-0.023278534	-0.007281597	-0.008104053	-0.0048116260	-0.025784438
Bas.sor	0.021936785	-0.290791150	0.0788727869	0.040739897	-0.043167612	-0.079958441	-0.0985747138	-0.056934243
Haut.autresF.ha	0.060517670	-0.081800116	-0.0436001720	1.000000000	-0.007684855	0.029273342	0.0318165318	-0.034288571
Haut.epi.abr	0.075814290	-0.054393131	-0.0136382677	-0.007684855	1.000000000	0.058977361	0.0706527928	0.081915069
Haut.epi.H	0.046413174	0.016987911	-0.0437618061	0.029273342	0.058977361	1.000000000	0.9819320154	0.819490804
Haut.epi.ha	0.047499003	0.021465540	-0.0513801153	0.031816532	0.070652793	0.981932015	1.0000000000	0.799804081
Haut.epi.Haccr	0.051224479	-0.008266575	-0.0194539112	-0.034288571	0.081915069	0.819490804	0.7998040814	1.000000000
Haut.era.ha	-0.042317387	-0.350192561	-0.0299633976	-0.013122561	0.138168048	-0.014856613	-0.0195205694	0.020989106
Haut.feu.H	0.115113713	-0.165751819	0.0017640047	0.089457899	0.048981029	0.070486229	0.0779123643	0.071143332
Haut.feu.ha	0.042614957	-0.364092044	0.0062378525	0.151283440	0.084180278	-0.003349192	0.0042012438	-0.012321241
Haut.het.ha	0.009818898	-0.172205002	0.0018085137	0.076568612	0.086603717	0.024499929	0.0346183081	-0.018778593
Haut.resi.ha	0.077022905	0.063341914	-0.0273257419	0.046487952	0.034513753	0.704596953	0.7264590036	0.566555726
Haut.sap.abr	0.017787489	0.038123473	0.0143107742	0.073163574	-0.008069577	0.011976646	0.0097316247	-0.002738453
Haut.sap.H	0.056639307	0.101836291	-0.0003169026	0.019814686	-0.026854467	0.108310538	0.1178341908	0.066205402
Haut.sap.ha	0.063700845	0.088406659	-0.0048499072	0.021246325	-0.026900950	0.105190261	0.1156439005	0.071817565
Haut.sap.Haccr	0.068231173	0.117985726	0.0215465993	0.001379978	-0.022991947	0.089006667	0.1045391576	0.067244322
Haut.sor.ha	0.051102013	-0.324506835	0.0510531222	0.058509038	-0.030779244	-0.052005328	-0.0548365474	0.004607401
Perches.autresF.ha	-0.110348893	0.056364280	0.0686415828	0.107554192	-0.011286604	-0.051016888	-0.0525862744	-0.050968443
Perches.epi.H	-0.042720486	-0.165191741	-0.0055779203	0.052428897	-0.063072851	0.016522987	0.0098515166	0.014002041
Perches.epi.ha	-0.007448198	-0.188038914	0.1850686565	0.045699418	-0.063484214	0.073952194	0.0654860722	0.071545441
Perches.era.ha	0.045769259	0.006809587	-0.0687182619	0.027270809	-0.012112105	0.046435338	0.0307953474	0.062314141
Perches.feu.H	-0.061212779	-0.017483468	-0.0663430420	0.007121577	-0.009527492	0.011988825	0.0007515345	-0.052464161
Perches.feu.ha	-0.065425177	-0.010021174	-0.0696531264	0.056424864	0.034417821	0.002426426	-0.0101286881	-0.044084733
Perches.ha	-0.002738202	0.157881113	0.0647392335	0.028236432	-0.058876087	0.042814220	0.0426429477	0.025014429
Perches.het.ha	-0.155597174	0.071400409	-0.0789720778	0.021709479	0.048988954	0.013457805	0.0032341499	-0.033276655
Perches.resi.ha	0.090708383	0.200408411	0.1452584551	0.006142653	-0.078739975	0.078729098	0.0839150614	0.065357204
Perches.sap.H	-0.032126782	0.384044121	0.0998124166	-0.112623759	-0.056353879	-0.020042163	0.0014991950	-0.020819611
Perches.sap.ha	0.053262216	0.482008556	0.0579643225	-0.091749396	-0.056503185	0.030652639	0.0437007021	0.027098044
Perches.sor.ha	0.127514817	-0.206349296	-0.0557445356	0.004891924	-0.022887269	0.001223931	-0.0133386599	-0.003408736

	Haut.era.ha	Haut.feu.H	Haut.feu.ha	Haut.het.ha	Haut.resi.ha	Haut.sap.abr	Haut.sap.H	Haut.sap.ha
Bas.autresF	-0.062793313	-0.124020483	-0.093496352	-0.079078183	-0.100906372	-0.025798158	-0.0858528028	-0.086001408
Bas.epi	-0.029192075	0.052656224	0.073781504	0.079916404	0.167594276	-0.023670181	-0.0373296291	-0.028262109
Bas.feu	0.165440964	0.027958857	0.264986042	0.146179291	-0.305046879	-0.024211761	-0.2995315979	-0.290419858
Bas.het	-0.052506296	0.014772248	0.118374718	0.232178406	-0.240335574	-0.025504186	-0.1782735847	-0.181206708
Bas.resi	-0.069243017	0.093904181	0.094996234	0.115707922	0.202640556	0.103520291	0.1444629719	0.172566501
Bas.sap	-0.088894023	0.062987026	0.038185945	0.080125789	0.127722474	0.145848653	0.1738210753	0.205591820
Bas.sap.abr	-0.059497049	-0.040096128	-0.004583939	0.008320071	0.018336932	0.077040098	0.0272299196	0.034640678
Bas.sor	0.205614214	0.017787765	0.247721968	0.030876396	-0.216130078	-0.015801726	-0.2534673371	-0.235449174
Haut.autresF.ha	-0.013122561	0.089457899	0.151283440	0.076568612	0.046487952	0.073163574	0.0198146855	0.021246325
Haut.epi.abr	0.138168048	0.048981029	0.084180278	0.086603717	0.034513753	-0.008069577	-0.0268544667	-0.026900950
Haut.epi.H	-0.014856613	0.070486229	-0.003349192	0.024499929	0.704596953	0.011976646	0.1083105383	0.105190261
Haut.epi.ha	-0.019520569	0.077912364	0.004201244	0.034618308	0.726459004	0.009731625	0.1178341908	0.115643900
Haut.epi.Haccr	0.020989106	0.071143332	-0.012321241	-0.018778593	0.566555726	-0.002738453	0.0662054017	0.071817565
Haut.era.ha	1.000000000	0.210325990	0.469599357	0.104613736	-0.031359531	0.020443173	-0.0640460089	-0.052697257
Haut.feu.H	0.210325990	1.000000000	0.758366473	0.656649377	0.165503877	0.156036102	0.1728216206	0.185828571
Haut.feu.ha	0.469599357	0.758366473	1.000000000	0.752691835	0.017670037	0.075204030	0.0045249096	0.014485183
Haut.het.ha	0.104613736	0.656649377	0.752691835	1.000000000	0.026828418	0.068663383	0.0357809475	0.029679765
Haut.resi.ha	-0.031359531	0.165503877	0.017670037	0.026828418	1.000000000	0.160488796	0.6862415942	0.704120782
Haut.sap.abr	0.020443173	0.156036102	0.075204030	0.068663383	0.160488796	1.000000000	0.2693835382	0.264572057
Haut.sap.H	-0.064046009	0.172821621	0.004524910	0.035780948	0.686241594	0.269383538	1.0000000000	0.983408036
Haut.sap.ha	-0.052697257	0.185828571	0.014485183	0.029679765	0.704120782	0.264572057	0.9834080361	1.000000000
Haut.sap.Haccr	-0.102960787	0.177561605	0.012690709	0.043283027	0.558315041	0.181487507	0.8336356477	0.818871594
Haut.sor.ha	0.415598723	0.336246011	0.629289345	0.121314041	-0.038888395	0.052631902	-0.0464965907	-0.034691318
Perches.autresF.ha	-0.092221475	-0.148313093	-0.153623246	-0.144015081	0.003752852	-0.037888495	0.0396530777	0.026216075
Perches.epi.H	-0.002177408	-0.011567697	-0.000567593	0.016340664	-0.028213418	0.039209935	-0.0076901462	-0.012943800
Perches.epi.ha	0.071709534	-0.073341723	-0.026590171	-0.040189734	0.015103616	-0.001703541	-0.0372467880	-0.039138858
Perches.era.ha	0.080996993	0.071421132	0.009111276	-0.010923027	0.084874991	0.027461002	0.1005060554	0.113529697
Perches.feu.H	-0.010836361	-0.128011576	-0.116816992	-0.106346441	0.010594265	-0.016156879	0.0210977618	0.015820228
Perches.feu.ha	0.016920450	-0.110777049	-0.107262905	-0.100761927	-0.039134248	-0.010886473	-0.0403604989	-0.046462895
Perches.ha	-0.080574174	-0.127716932	-0.218317105	-0.132001049	0.162814453	-0.028440189	0.2007641864	0.201806986
Perches.het.ha	-0.018410741	-0.115981555	-0.140234177	-0.097142485	-0.029755426	-0.010824400	-0.0309997978	-0.034864097
Perches.resi.ha	-0.115842081	-0.067365574	-0.184639815	-0.090754865	0.245466638	-0.020389781	0.2811266564	0.288084300
Perches.sap.H	-0.238566399	-0.069460274	-0.217480096	-0.044770216	0.156119413	-0.057946310	0.2425339445	0.247103251
Perches.sap.ha	-0.265489200	-0.043684321	-0.245453587	-0.080008840	0.255722702	-0.017074376	0.3566186494	0.361648458
Perches.sor.ha	0.113525490	-0.072999433	0.060277935	0.026800246	-0.077324777	-0.001686369	-0.1011489701	-0.108894663

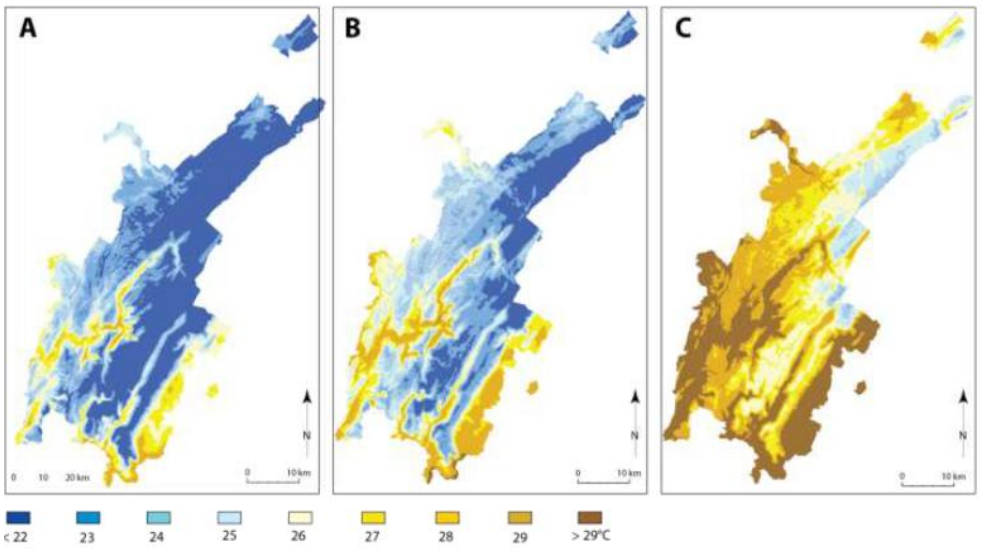
	Haut.sap.Haccr	Haut.sor.ha	Hdom	Ie	Ntiges	Pente	Perches.autresF.ha
Bas.autresF	-0.0735044601	-0.017739218	-0.013204521	-4.393871e-02	0.0217916111	0.0284060105	0.0338528887
Bas.epi	0.0032066752	0.092508554	-0.029381091	8.493869e-02	-0.0753238146	-0.1535081560	0.0321945588
Bas.feu	-0.2481239197	0.308317269	-0.075480988	-9.373612e-02	0.0413784849	-0.0882602832	-0.0725363361
Bas.het	-0.1386801237	0.033135222	-0.093133641	-1.235078e-01	0.0005562495	-0.0641205549	-0.0238367721
Bas.resi	0.1215313716	0.078920439	-0.031889446	7.248562e-02	-0.0493750775	-0.0872839846	-0.0676764327
Bas.sap	0.1287226311	0.018058478	-0.020302461	4.456236e-02	-0.0380531328	-0.0188257864	-0.0623500181
Bas.sap.abr	0.0115461219	0.068291233	-0.009727115	3.783515e-02	0.0563299788	0.0279252046	-0.0341887521
Bas.sor	-0.2098077380	0.414633859	-0.018006653	-4.100109e-02	0.0563021304	-0.0555241446	-0.0583994121
Haut.autresF.ha	0.0013799777	0.058509038	-0.017116793	1.169940e-03	0.0311944667	0.0378922027	0.1075541923
Haut.epi.abr	-0.0229919468	-0.030779244	-0.003055975	8.148843e-02	-0.0830901053	-0.0584293043	-0.0112866038
Haut.epi.H	0.0890066667	-0.052005328	0.011509560	1.649797e-01	-0.0971161807	-0.0421980353	-0.0510168880
Haut.epi.ha	0.1045391576	-0.054836547	0.005955723	1.778783e-01	-0.0999434561	-0.0492183168	-0.0525862744
Haut.epi.Haccr	0.0672443223	0.004607401	-0.006265410	1.789711e-01	-0.0742605559	-0.0517522669	-0.0509684425
Haut.era.ha	-0.1029607870	0.415598723	0.073679160	1.360184e-01	-0.0702284803	-0.0049431449	-0.0922214748
Haut.feu.H	0.1775616054	0.336246011	0.114015769	1.176960e-01	-0.2025507926	-0.1399032687	-0.1483130927
Haut.feu.ha	0.0126907086	0.629289345	0.127774474	1.075118e-01	-0.1720138647	-0.1124515427	-0.1536232462
Haut.het.ha	0.0432830273	0.121314041	0.062908415	1.780531e-02	-0.1401750427	-0.1172806266	-0.1440150813
Haut.resi.ha	0.5583150410	-0.038888395	0.025367055	2.345526e-01	-0.0822291004	-0.0447801725	0.0037528517
Haut.sap.abr	0.1814875070	0.052631902	0.031598340	2.711891e-02	-0.0440468523	0.0310632091	-0.0378884955
Haut.sap.H	0.8336356477	-0.046496591	0.014569311	1.473036e-01	-0.0217745467	-0.0147914110	0.0396530777
Haut.sap.ha	0.8188715943	-0.034691318	0.023537966	1.545156e-01	-0.0209335505	-0.0263756336	0.0262160753
Haut.sap.Haccr	1.0000000000	-0.021933597	0.009003800	1.761846e-01	0.0032061177	-0.0059028299	-0.0003211653
Haut.sor.ha	-0.0219335965	1.000000000	0.069108960	1.186898e-01	-0.0984939470	-0.0829377300	-0.0458846332
Hdom	0.0090037996	0.069108960	1.000000000	-4.141028e-02	-0.2036966620	0.2080941069	0.0231610985
Perches.autresF.ha	-0.0003211653	-0.045884633	0.023161099	-1.489273e-01	0.0249239237	0.0914917617	1.0000000000
Perches.epi.H	0.0206873686	-0.004407193	-0.071875684	-2.787719e-02	-0.0056125858	0.0574921479	-0.1335509641
Perches.epi.ha	0.0006208068	0.005128509	-0.156631532	-1.617242e-02	0.0918323609	0.0745261293	-0.1324187373
Perches.era.ha	0.0677543997	-0.027681362	0.109760203	-6.599128e-02	0.0250202074	0.0753432313	-0.0568690841
Perches.feu.H	-0.0403700199	-0.042211535	-0.003469249	-1.034797e-01	0.0427900761	0.0625837401	0.1884303495
Perches.feu.ha	-0.0789327312	-0.040310810	-0.008053789	-1.363975e-01	0.0873684175	0.0644280772	0.2629782403
Perches.ha	0.1316326470	-0.201432165	-0.122548419	-1.278054e-01	0.1745779776	0.0367585032	0.2084668412
Perches.het.ha	-0.0709887675	-0.109889379	-0.015220380	-1.371762e-01	0.1448937073	0.0367733024	0.1197893800
Perches.resi.ha	0.2156501398	-0.204619156	-0.139545018	-4.825346e-02	0.1519511055	0.0413141414	0.1065582859
Perches.sap.H	0.1869194736	-0.299916544	-0.036212648	-9.324037e-02	0.1631561272	-0.1277218754	0.1062939548
Perches.sap.ha	0.2669907954	-0.298447270	-0.087401533	-5.828843e-02	0.1582458846	-0.0177342728	0.1744611157
Perches.sor.ha	-0.0951693392	0.128221929	-0.073990729	1.632783e-02	0.0754650845	0.0369979186	-0.1074609251

	Perches.epi.H	Perches.epi.ha	Perches.era.ha	Perches.feu.H	Perches.feu.ha	Perches.ha	Perches.het.ha
Bas.autresF	-0.067626351	-0.0433904106	-0.0387219812	-0.0178206222	-0.039841002	-0.049350711	-0.0345440330
Bas.epi	-0.008807908	-0.0015585065	-0.0626652733	-0.0128292141	-0.043618242	-0.066644614	-0.0353813600
Bas.feu	0.116856104	0.1129190205	-0.0874907795	-0.0085351793	-0.046089056	-0.180989301	-0.0631242178
Bas.het	0.071569739	-0.0162819310	-0.1274272122	0.0090084791	-0.029289959	-0.175708248	0.0015662704
Bas.resi	-0.032904010	-0.0181440418	-0.0149686372	-0.0105910076	-0.073199751	-0.077806813	-0.0523183642
Bas.sap	-0.023202849	-0.0240841048	0.0283433496	-0.0400196074	-0.070310675	-0.032002486	-0.0546439077
Bas.sap.abr	-0.093704191	-0.0337624858	-0.0366893143	0.0139110075	0.043341200	0.057597729	0.0761577552
Bas.sor	0.100648370	0.1253436366	-0.0359350624	0.0024038083	-0.030014554	-0.111883737	-0.0754291877
Haut.autresF.ha	0.052428897	0.0456994181	0.0272708090	0.0071215768	0.056424864	0.028236432	0.0217094788
Haut.epi.abr	-0.063072851	-0.0634842138	-0.0121121049	-0.0095274924	0.034417821	-0.058876087	0.0489889535
Haut.epi.H	0.016522987	0.0739521940	0.0464353380	0.0119888252	0.002426426	0.042814220	0.0134578054
Haut.epi.ha	0.009851517	0.0654860722	0.0307953474	0.0007515345	-0.010128688	0.042642948	0.0032341499
Haut.epi.Haccr	0.014002041	0.0715454412	0.0623141406	-0.0524641607	-0.044084733	0.025014429	-0.0332766553
Haut.era.ha	-0.002177408	0.0717095344	0.0809969930	-0.0108363611	0.016920450	-0.080574174	-0.0184107408
Haut.feu.H	-0.011567697	-0.0733417227	0.0714211318	-0.1280115759	-0.110777049	-0.127716932	-0.1159815555
Haut.feu.ha	-0.000567593	-0.0265901708	0.0091112761	-0.1168169925	-0.107262905	-0.218317105	-0.1402341766
Haut.het.ha	0.016340664	-0.0401897344	-0.0109230269	-0.1063464407	-0.100761927	-0.132001049	-0.0971424853
Haut.resi.ha	-0.028213418	0.0151036161	0.0848749912	0.0105942652	-0.039134248	0.162814453	-0.0297554260
Haut.sap.abr	0.039209935	-0.0017035407	0.0274610019	-0.0161568790	-0.010886473	-0.028440189	-0.0108244000
Haut.sap.H	-0.007690146	-0.0372467880	0.1005060554	0.0210977618	-0.040360499	0.200764186	-0.0309997978
Haut.sap.ha	-0.012943800	-0.0391388576	0.1135296969	0.0158202283	-0.046462895	0.201806986	-0.0348640967
Haut.sap.Haccr	0.020687369	0.0006208068	0.0677543997	-0.0403700199	-0.078932731	0.131632647	-0.0709887675
Haut.sor.ha	-0.004407193	0.0051285087	-0.0276813617	-0.0422115354	-0.040310810	-0.201432165	-0.1098893788
Perches.autresF.ha	-0.133550964	-0.1324187373	-0.0568690841	0.1884303495	0.262978240	0.208466841	0.1197893800
Perches.epi.H	1.000000000	0.5994694778	0.1944620941	0.0719252747	0.058230051	0.195082774	0.0238437594
Perches.epi.ha	0.599469478	1.0000000000	0.1047915037	0.0909753869	0.192523084	0.503296340	0.1699962615
Perches.era.ha	0.194462094	0.1047915037	1.0000000000	0.0837651026	0.207144970	0.182274848	0.0457600850
Perches.feu.H	0.071925275	0.0909753869	0.0837651026	1.0000000000	0.800859441	0.449309186	0.6750193743
Perches.feu.ha	0.058230051	0.1925230840	0.2071449704	0.8008594413	1.000000000	0.598941771	0.8871422833
Perches.ha	0.195082774	0.5032963398	0.1822748480	0.4493091863	0.598941771	1.000000000	0.5556782204
Perches.het.ha	0.023843759	0.1699962615	0.0457600850	0.6750193743	0.887142283	0.555678220	1.0000000000
Perches.resi.ha	0.213421369	0.5232956254	0.0919355808	0.1351765959	0.135261284	0.831699036	0.1332287996
Perches.sap.H	-0.153393904	-0.1417208857	-0.0667478939	-0.0542348652	-0.132557990	0.327346100	-0.0614511026
Perches.sap.ha	-0.156722372	-0.1939594528	-0.0040622514	0.0270514376	-0.058544091	0.481595346	0.0004129652
Perches.sor.ha	0.181561471	0.2202790371	0.1220324324	0.3878046306	0.373389672	0.177283826	0.0770954474

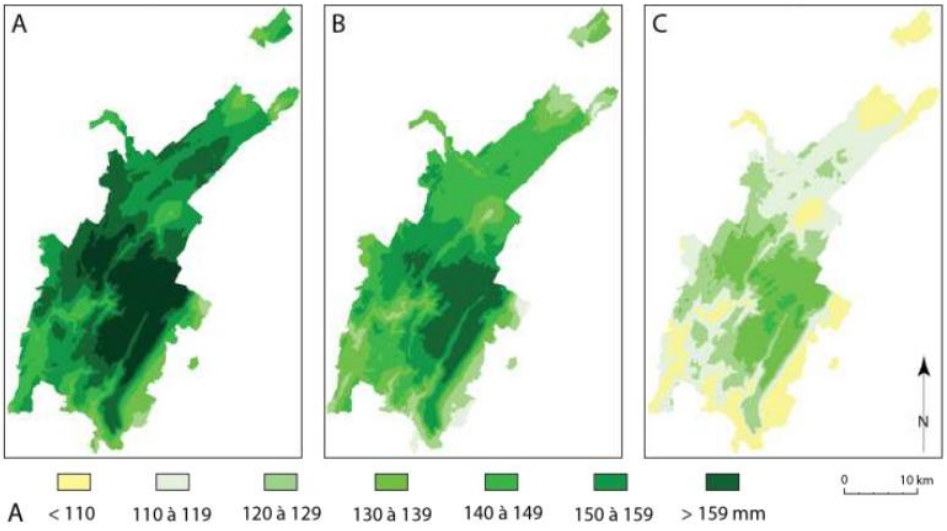
	Perches.resi.ha	Perches.sap.H	Perches.sap.ha	Perches.sor.ha	Station	V	Volume.feu	Volume.resi
Bas.autresF	-0.066456149	0.015943300	-0.0080418650	-0.034044841	-0.098442790	0.065710204	0.081746462	-0.0981427274
Bas.epi	-0.055914978	-0.025569466	-0.0673738069	-0.022704245	0.046874684	-0.025915921	-0.104518177	-0.0216635731
Bas.feu	-0.204400992	-0.270332712	-0.3485883892	0.131044283	0.322580127	0.081730132	-0.403677829	-0.2012853382
Bas.het	-0.219713540	-0.155945007	-0.2194604429	0.011644096	0.109451848	0.075994513	-0.215420865	-0.1873989483
Bas.resi	-0.038043389	0.003913089	-0.0048091661	-0.046038544	-0.038147069	-0.010616482	-0.048955146	0.0875106099
Bas.sap	0.011585664	0.051351998	0.0725103218	-0.038269761	-0.124835023	0.000382898	0.063528576	0.1181747513
Bas.sap.abr	0.056510118	-0.015881737	0.0729500734	-0.028237694	-0.094382135	0.038064848	0.075116057	0.1212087048
Bas.sor	-0.114491964	-0.251240564	-0.2879967565	0.153460338	0.362562260	0.035533273	-0.380850031	-0.1003651759
Haut.autresF.ha	0.006142653	-0.112623759	-0.0917493960	0.004891924	0.082013367	0.082529505	-0.023504183	-0.0543837380
Haut.epi.abr	-0.078739975	-0.056353879	-0.0565031853	-0.022887269	0.047495123	-0.084312019	-0.070500851	-0.0631291390
Haut.epi.H	0.078729098	-0.020042163	0.0306526391	0.001223931	-0.006550455	-0.113599475	-0.019103380	0.0720317581
Haut.epi.ha	0.083915061	0.001499195	0.0437007021	-0.013338660	-0.022498870	-0.116468892	-0.009339631	0.0667355889
Haut.epi.Haccr	0.065357204	-0.020819611	0.0270980437	-0.003408736	-0.014996463	-0.094011859	-0.020272557	0.0914670459
Haut.era.ha	-0.115842081	-0.238566399	-0.2654892002	0.113525490	0.329383505	-0.098608836	-0.391962011	-0.0975215879
Haut.feu.H	-0.067365574	-0.069460274	-0.0436843214	-0.072999433	0.031310574	-0.124997209	-0.277795811	0.0474228540
Haut.feu.ha	-0.184639815	-0.217480096	-0.2454535871	0.060277935	0.256472679	-0.130335556	-0.492307375	-0.0664339427
Haut.het.ha	-0.090754865	-0.044770216	-0.0800088404	0.026800246	0.046296649	-0.111603865	-0.292577214	-0.0206425813
Haut.resi.ha	0.245466638	0.156119413	0.2557227015	-0.077324777	-0.141428836	-0.148817072	0.133907647	0.1669191432
Haut.sap.abr	-0.020389781	-0.057946310	-0.0170743760	-0.001686369	-0.061615973	-0.021385831	-0.004597861	0.1084147134
Haut.sap.H	0.281126656	0.242533945	0.3566186494	-0.101148970	-0.214126688	-0.100484521	0.234236085	0.1831507118
Haut.sap.ha	0.288084300	0.247103251	0.3616484582	-0.108894663	-0.218652364	-0.096264686	0.229318314	0.1962419168
Haut.sap.Haccr	0.215650140	0.186919474	0.2669907954	-0.095169339	-0.192294032	-0.066541878	0.221754734	0.1424565148
Haut.sor.ha	-0.204619156	-0.299916544	-0.2984472699	0.128221929	0.386857601	-0.088809607	-0.447959668	-0.0850756076
Perches.autresF.ha	0.106558286	0.106293955	0.1744611157	-0.107460925	-0.098648119	0.004097972	0.076548658	-0.0007275645
Perches.epi.H	0.213421369	-0.153393904	-0.1567223720	0.181561471	0.177131164	-0.068617367	-0.078709707	-0.0273028255
Perches.epi.ha	0.523295625	-0.141720886	-0.1939594528	0.220279037	0.240642335	-0.115321343	-0.170420629	-0.0090796212
Perches.era.ha	0.091935581	-0.066747894	-0.0040622514	0.122032432	0.123044991	-0.060947653	0.048298558	0.0142523821
Perches.feu.H	0.135176596	-0.054234865	0.0270514376	0.387804631	-0.028470928	-0.001379726	-0.007240451	0.1423701914
Perches.feu.ha	0.135261284	-0.132557990	-0.0585440912	0.373389672	0.001730499	-0.012183191	-0.032432452	0.1005891391
Perches.ha	0.831699036	0.327346100	0.4815953456	0.177283826	-0.203285244	-0.097022653	0.205456136	0.1956111030
Perches.het.ha	0.133228800	-0.061451103	0.0004129652	0.077095447	-0.052272068	0.058979123	0.029875943	0.1455256054
Perches.resi.ha	1.000000000	0.487330528	0.6639658325	0.038723385	-0.244355406	-0.132516859	0.268538027	0.2086312168
Perches.sap.H	0.487330528	1.000000000	0.7928802968	-0.173513172	-0.489508041	0.047813609	0.474632351	0.1815477994
Perches.sap.ha	0.663965832	0.792880297	1.0000000000	-0.169679424	-0.576353470	0.006068013	0.549106188	0.2355205914
Perches.sor.ha	0.038723385	-0.173513172	-0.1696794238	1.000000000	0.182360003	-0.078769465	-0.149697243	-0.0300542134

Annexe 12 : Changement climatique (D'après Lucot et Joly)

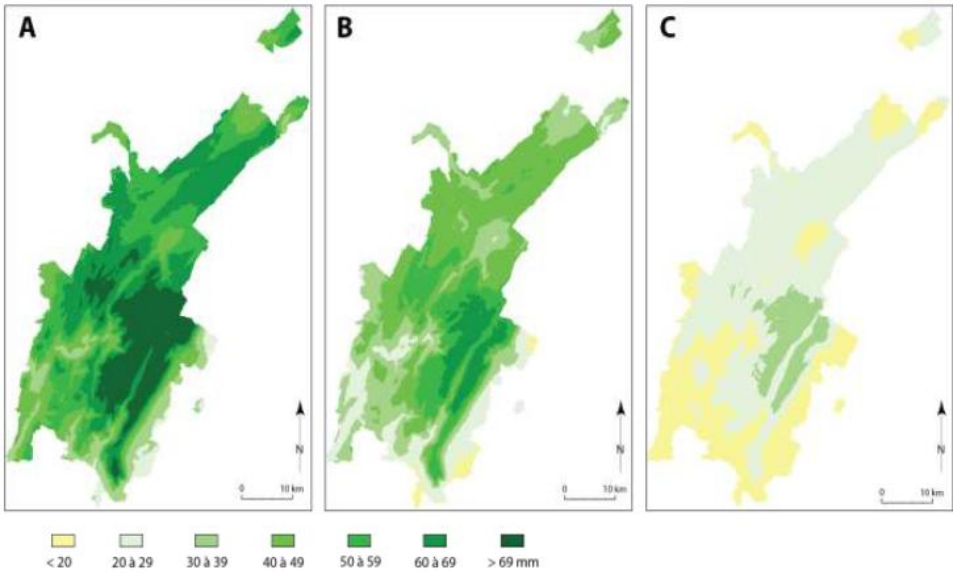
A : 1981 – 2010 B : 2021 – 2050 C : 2071 -2100



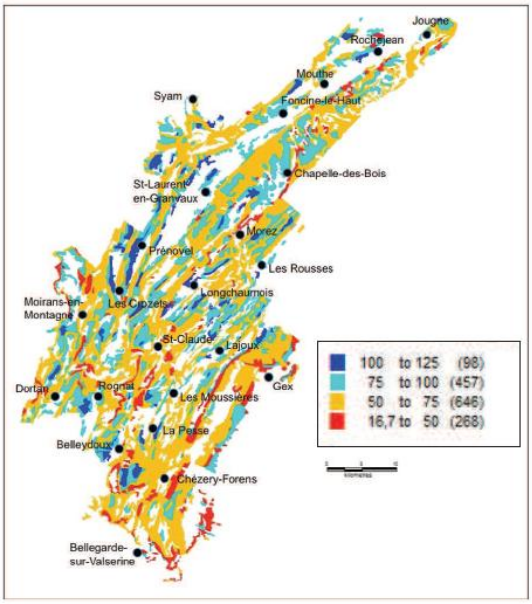
Températures maximales de juillet



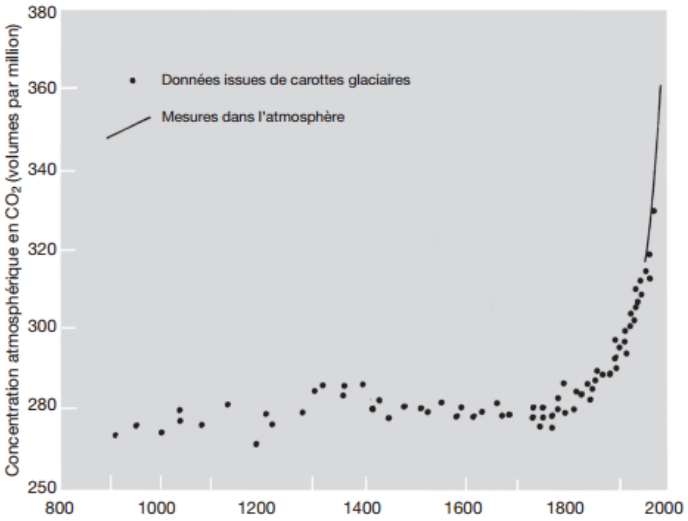
Précipitations au mois de juillet



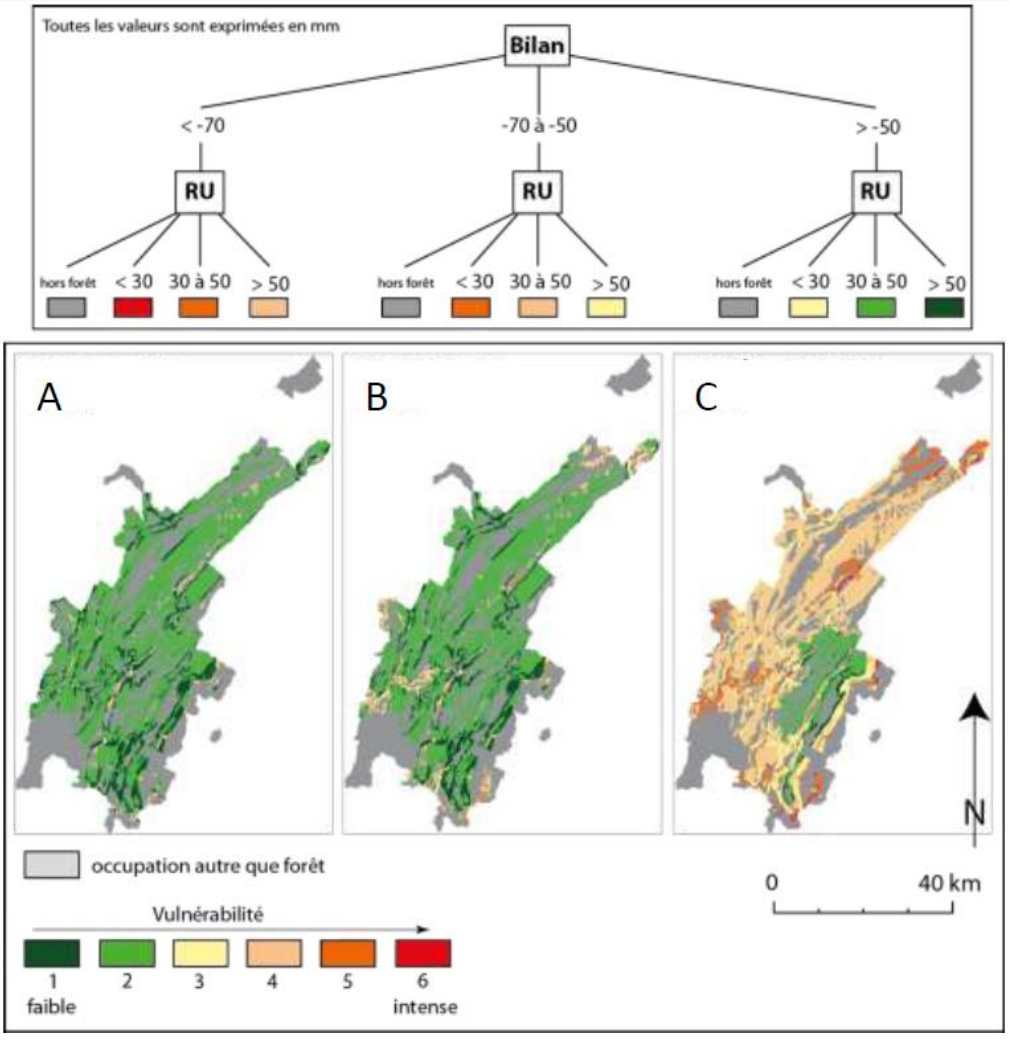
Bilan hydrique = Précipitations - ETP

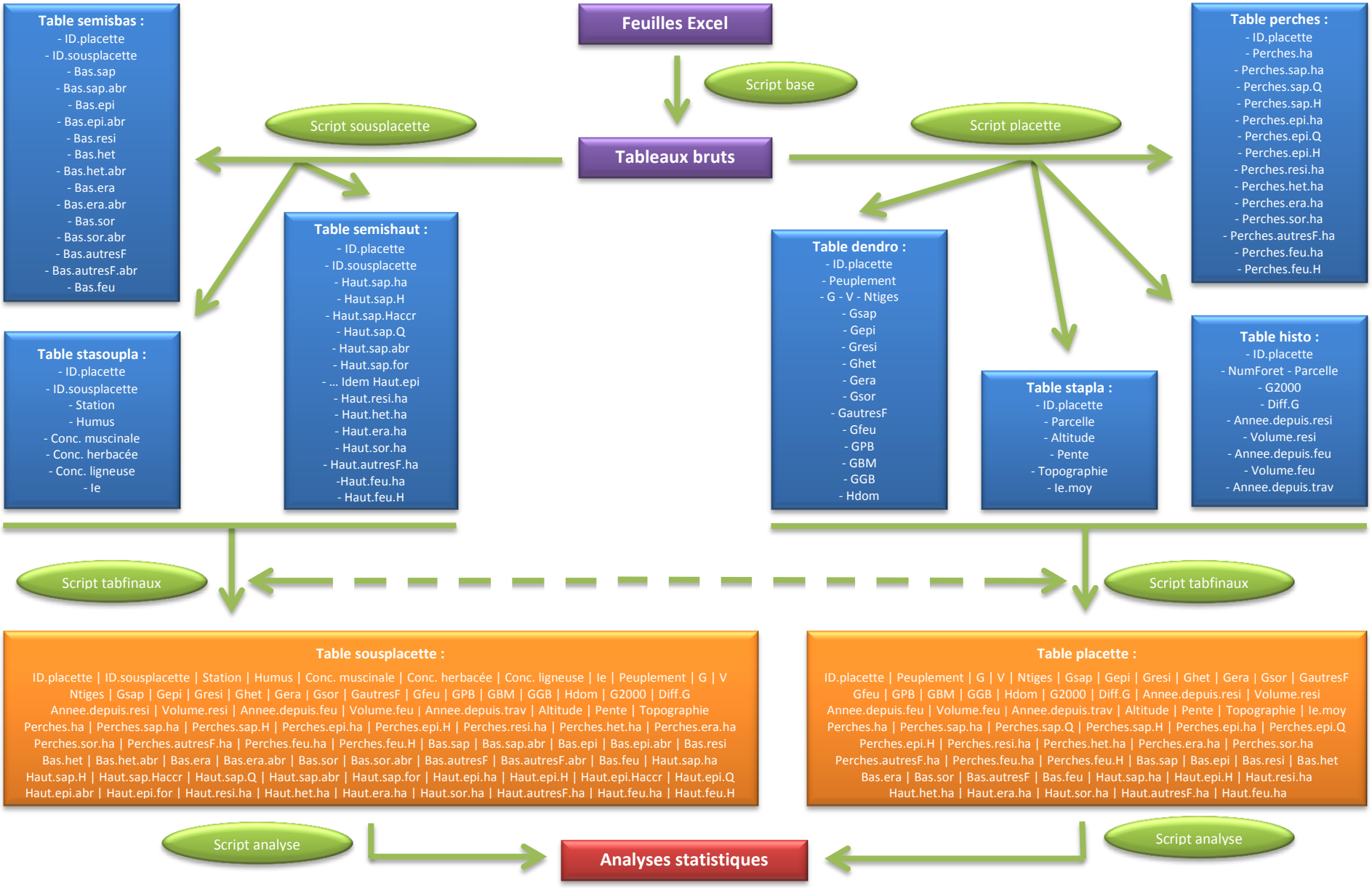


Réserve utile moyenne



Evolution de la concentration atmosphérique en CO_2 (D'après Guehl et al. RFF 1999)



Indice de vulnérabilité au changement climatique pour les forêts

Annexe 13 : Cheminement pour le croisement des données