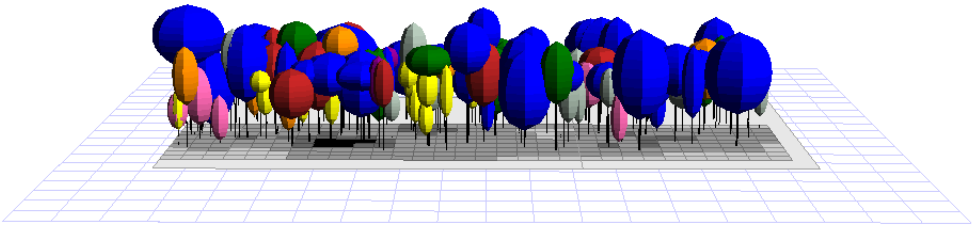
Simulation de sylviculture irrégulière sur marteloscope avec le modèle Samsara

Mémoire de dominante d'approfondissement : Gestion forestière



Présenté par : Camille BASTIANELLI

Stage effectué du 02/03/2020 au 14/08/2020
À INRAE, centre de Grenoble, LESSEM, équipe Dynamics

Maitre de stage : Benoit COURBAUD
Enseignant référent : Eric LACOMBE

soutenu le : 29/09/2020

Année 2019/2020

AgroParisTech-Nancy INRAE

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE

Simulation de sylviculture irrégulière sur marteloscope avec le modèle Samsara

Dominante d'approfondissement
Gestion forestière

Camille BASTIANELLI Année 2019/2020

Résumé

Un marteloscope est une parcelle forestière servant d'outil pédagogique en permettant l'analyse d'une coupe fictive. Son potentiel est actuellement limité en projection sur le moyen et long terme, éléments centraux de la gestion forestière. Des modèles existent et permettraient donc d'enrichir les discussions, mais les techniques d'utilisation des outils ne sont pas adaptées à une journée de formation.
Le document explicite une méthode pour réaliser une transition entre les mesures de terrain et celles nécessaires au fonctionnement du modèle. Il présente aussi une manière d'ajuster les paramètres du modèle SAMSARA2 à un contexte local. Un rapport automatique liant les sorties du modèle et les données de martelages de terrain est également proposé. Les résultats sont encourageants pour reproduire une telle démarche à grande échelle. Enfin, des pistes de modifications des outils, encore en phase de test, sont suggérées.

Abstract

A marteloscope is a forest plot used as an educational tool by allowing the analysis of a fictitious cut. Its potential is currently limited when projected over the medium and long term, central elements of forest management. Models exist and would therefore enrich the discussions, but the techniques for using the tools are not adapted to a day's training.
This document explains a method for making a transition between field measurements and those necessary for the model to work. It also presents a way to adjust the parameters of the SAMSARA2 model to a local context. An automatic report linking the model outputs and the field hammering data is also proposed. The results are encouraging for reproducing such an approach on a large scale. Finally, suggestions for modifying the tools, which are still in the test phase, are suggested.

AgroParisTech

Engagement de non plagiat

❶ Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris a autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux :
  - ➢ Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive.
  - ➢ Recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

❷ Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sur d'en citer la source.

❸ Sanction : En cas de manquement à ces consignes, la DEVE/le correcteur se réservent le droit d'exiger la réécriture du document sans préjuger d'éventuelles sanctions disciplinaires.

❹ Engagement :

Je soussigné (e) Camille BASTIANELLI

Reconnaît avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

A Lodgues le 11/05/20

Signature :

Cet engagement de non plagiat doit être inséré en début de tous les rapports, dossiers, mémoires.

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVE

AgroParisTech	**TRAVAIL D'ÉLÈVE**
TITRE : Simulation de sylviculture en irrégulier avec le modèle Samsara2.	Mots clés : Irrégulier, modélisation, marteloscope
AUTEUR ou AUTRICE : BASTIANELLI Camille	Année : 2020
Caractéristiques : 71 pages ; 18 figures ; 9 tableaux ; 7 annexes ; bibliographie	

CADRE DU TRAVAIL

ORGANISME DE STAGE : INRAE

Nom du responsable : COURBAUD Benoit

Fonction : Chercheur (HDR)

Nom du correspondant APT : LACOMBE Eric

☐ 1A ☐ 2A ☒ 3A	☐ Stage entreprise ☐ Stage assistant ingénieur ☒ Stage fin d'études Date de remise :	☐ Autre

SUITE À DONNER (*à compléter par AgroParisTech*)

☒ Consultable et diffusable

☐ Confidentiel de façon permanente

☐ Confidentiel jusqu'au ……/……/…… , puis diffusable

Remerciements

Je tiens à remercier Benoît Courbaud qui a accepté de me prendre en stage à INRAE Grenoble. Il a su me laisser une grande autonomie sur le sujet tout en assurant un encadrement rigoureux dans les aspects complexes de ce travail.

Un grand merci à Eric Lacombe, pour son aide précieuse, le suivi de l'étude et ses conseils.

Merci à Benoit Méheux pour sa disponibilité, son appui technique autour du marteloscope et les bons moments partagés.

Je tenais aussi à remercier particulièrement Jean-Jacques Boutteaux et Sébastien Lagay pour les données fournies, les échanges et leur intérêt pour l'étude.

Merci à Salomé Fournier, pour son aide incommensurable !

Table des matières

1 Introduction **7**
- 1.1 Les marteloscopes . . . 7
- 1.2 Un modèle : SAMSARA . . . 8
  - 1.2.1 Simulation de la dynamique forestière . . . 9
  - 1.2.2 Fonctionnement de l'algorithme multi-critères . . . 10
- 1.3 Problématique et objectifs . . . 11

2 Initialisation : transformation des relevés de terrain en un fichier standard d'état initial, lisible par le modèle **13**
- 2.1 Une parcelle rectangulaire . . . 13
  - 2.1.1 Méthode . . . 13
- 2.2 Les dendromicrohabitats . . . 14
  - 2.2.1 Méthode . . . 14
  - 2.2.2 Résultats et discussions . . . 14
- 2.3 La régénération . . . 16
  - 2.3.1 Méthode et résultats . . . 16
- 2.4 La qualité . . . 18
  - 2.4.1 Méthode . . . 18
  - 2.4.2 Résultats et discussions . . . 19
- 2.5 Conclusion : l'initialisation, un processus chronophage en voie de simplification, permettant de contourner les approximations du modèle . . . 20

3 Calibration : ajustement des paramètres du modèle au contexte local **20**
- 3.1 Allométrie secondaires : rayon du houppier et hauteur en fonction du diamètre de l'arbre . . . 20
  - 3.1.1 Méthode . . . 20
  - 3.1.2 Équations . . . 21
  - 3.1.3 Résultats . . . 21
- 3.2 Équation accroissement en surface terrière en fonction de l'énergie lumineuse reçue par l'arbre . . . 22
  - 3.2.1 Démarche . . . 22
  - 3.2.2 Méthode . . . 23
  - 3.2.3 Détail de la construction des placettes SAMSARA2 . . . 23
  - 3.2.4 Résultats . . . 24
  - 3.2.5 Discussions . . . 27
- 3.3 Estimation des paramètres sans étude statistique . . . 29
  - 3.3.1 La régénération . . . 29
  - 3.3.2 La qualité . . . 29

4 Lien entre le marteloscope, la sylviculture et le modèle **30**
- 4.1 Démarche . . . 30
- 4.2 Méthode . . . 30
- 4.3 Résultats et discussions . . . 31

5 Discussions et perspectives **33**
- 5.1 Résolution des points techniques . . . 33
  - 5.1.1 Simulation du peuplement . . . 33
  - 5.1.2 Simulation de la sylviculture pratiquée . . . 34
  - 5.1.3 Lien entre les simulations et la journée au marteloscope . . . 34
- 5.2 Potentiel des outils . . . 34
  - 5.2.1 Réduction des manipulations . . . 34

5.2.2 Explorer le potentiel des outils 34
5.2.3 Pistes d'amélioration de l'analyse post-martelage 35
5.2.4 Pistes d'amélioration de l'algorithme multi-critères 35
5.3 Reproductibilité de la démarche sur d'autres marteloscopes 36

6 Conclusion **37**

7 Annexes **40**
A Typologie utilisée pour relever les dendromicrohabitats au marteloscope d'Auberive. 40
B Typologie des dendromicrohabitats utlisée dans le modèle SAMSARA2. . . 41
C Exemple de sortie automatique de l'analyse d'un martelage fictif à Auberive. 42
D Protocole de relevé de la régénération au marteloscope d'Auberive. 55
E Guide d'utilisation de l'outil développé. 57
F Exemple de fichier de commande (extrait), permettant de lancer Samsara automatiquement. 65
G Vérifications graphiques de la transformation des placettes réelles en placettes SAMSARA. 65

Table des figures

1 Principe de fonctionnement du modèle d'évolution de peuplement 9
2 Prise en compte des bordures dans le modèle SAMSARA2. 10
3 Comparaison d'un graphique issu du tableur (en haut) et d'un autre issu du modèle Samsara sous Capsis (en bas). 12
4 Visualisation de la partie périphérique, fictive et de la partie de cœur, correspondant au marteloscope. 14
5 Schéma des limites d'un marteloscope à Auberive. 16
6 Schéma de la régénération recréée sur une placette fictive Samsara, à partir de zones délimitées sur le terrain et de sous-placeaux inventoriés en plein. . 17
7 Schéma récapitulatif de la préparation des données. 23
8 Schéma récapitulatif de la préparation des placettes Samsara à partir du réseau de placettes permanentes. 24
9 Représentation des effets individuels des charmes issus du réseau de placettes permanentes. 25
10 Visualisation des prédictions en accroissement du modèle, des arbres issus du réseau de placettes permanentes, en fonction de la lumière calculée et des essences. 26
11 Répartition du nombre de tiges à l'hectare, par classe de diamètre, des placettes permanentes du réseau SIGFRA, utilisées pour l'ajustement du modèle SAMSARA2. La répartition est celle des diamètres mesurés lors de la première campagne de mesure. 27
12 Visualisation des accroissements en diamètre (durant la première période), des arbres issus du réseau de placettes permanentes, en fonction de leur diamètre initial et des essences. 28
13 Visualisation du modèle d'accroissement pour le hêtre 28
14 Schéma de la chaine de traitement entre les informations données par le marteleur et le rapport d'analyse. 30
15 Représentation du peuplement après 50 ans d'évolution. 32
16 Représentation des arbres choisis par l'algorithme multi-critères. 33
17 Comparaison des surfaces terrières entre les placettes réelles et fictives, pour les arbres inventoriés à rayon fixe. 66
18 Comparaison des surfaces terrières entre les placettes réelles et fictives, pour les arbres inventoriés à angle constant. 66

Liste des tableaux

1 Récapitulatif des dendromicrohabitats relevés sur le marteloscope d'Auberive. 15
2 Détail des dendromicrohabitats relevés sur le terrain, n'ayant pas d'équivalence avec la typologie du modèle. 15
3 Récapitulatif des données de régénération à l'hectare. 18
4 Répartition, en pourcentage, des qualités estimées des arbres situés dans la région d'Auberive, étant dans la classe de diamètre 25 cm. 19
5 Paramètres des modèles régissant le rayon du houppier d'un arbre en fonction du diamètre, calibrés à l'aide des données d'un marteloscope situé à Auberive. 22
6 Comparaison des deux estimateurs, pour l'allométrie régissant le rayon du houppier d'un arbre en fonction de son diamètre (toutes essences confondues), calibrée à l'aide des données d'un marteloscope situé à Auberive. . . 22
7 Paramètres du modèle non-linéaire, régissant la hauteur d'un arbre en fonction de son diamètre, calibrés à l'aide des données d'un marteloscope situé à Auberive. 22
8 Extrait du tableau de données construit et utilisé pour calibrer l'équation accroissement en fonction de la lumière. 25
9 Paramètres d'ajustement de l'allométrie accroissement en surface terrière $\sim$ lumière, présente dans le modèle SAMSARA2. 26

Avant-Propos

L'étude présentée dans ce rapport a été réalisée dans le cadre de mon stage de fin d'études d'ingénieur AgroParisTech. Ce stage s'est déroulé à INRAE Grenoble au sein du laboratoire des écosystèmes et des sociétés en montagne, dans l'équipe Dynamics.

Le thème de cette étude s'inscrit pleinement dans la démarche de recherche de l'équipe dans laquelle je me suis intégrée. Les techniques de modélisation et simulation y sont utilisées et développées depuis de nombreuses années. Parmi leurs travaux, le modèle de dynamique forestière Samsara 2 peut être cité.

Cet outil permet d'obtenir les données dendrométriques d'un peuplement dans plusieurs années. D'autre part, un algorithme est intégré à ce modèle, qui est ainsi en capacité de simuler des stratégies sylvicoles en peuplement irrégulier.

Dans le cadre du projet Amphi-forêt, des marteloscopes ont été installés et suivis en France. Les marteloscopes sont des outils pédagogiques plébiscités pour la formation initiale et continue en sylviculture. Ils permettent en particulier de tester sur le terrain l'application d'une stratégie de coupe et d'en voir les conséquences sur la structure du peuplement. Toutefois, l'outil marteloscope seul ne permet pas de se projeter au-delà de la coupe qui vient d'être réalisée fictivement.

Dans ce contexte, coupler un modèle de dynamique forestière, qui autorise la simulation de gestion forestière, avec un marteloscope, permettra d'apporter des indicateurs pertinents aux échanges naissants lors des journées de formation.

1 Introduction

1.1 Les marteloscopes

Le martelage cristallise une gestion forestière. C'est le moment où les arbres prélevés sont martelés, c'est-à-dire choisis. Plusieurs critères peuvent être invoqués au moment de cette prise de décision. Classiquement, en gestion irrégulière, un arbre est choisi en fonction de sa vigueur et de sa qualité. Le raisonnement d'un marteleur peut être un des suivants : « Je choisis un arbre car je considère qu'il est : mûr pour la récolte (critère économique), ou qu'il est dangereux pour les promeneurs (critère de protection), ou encore qu'il gêne un arbre que je souhaite préserver (critère d'amélioration) ». À l'inverse, c'est aussi le moment où le gestionnaire désigne les arbres qu'il souhaite conserver, par exemple au profit de la biodiversité. Ainsi, la décision finale est souvent un compromis entre plusieurs solutions et dépend de la sensibilité de chaque sylviculteur. Par ailleurs, prélever un arbre affecte aussi le devenir du peuplement en influant sur la régénération (quantité et essences présentes), la croissance et la composition du peuplement (Soucy et al., 2016). Le martelage apparaît donc comme une des tâches les plus complexes pour un forestier. Or, l'étude de Vítková et al. (2016) suggère que l'expérience et l'entrainement au martelage sont le gage de cohérence dans le travail effectué (pour des professionnels). Le choix de l'arbre à prélever requiert donc des qualités spécifiques à cet exercice (Soucy et al., 2016). Par ailleurs, le coût de cette opération de marquage est élevé (Cimon-Morin et al., 2010). C'est aussi grâce aux coupes que le bois peut être vendu, la vente de bois étant le principal revenu. Ainsi, le martelage est une étape importante économiquement, écologiquement et socialement. En permettant analyse, discussions et entraînement, des parcelles expérimentales en forêt, dédiées à la réalisation de martelages fictifs, deviennent incontournables.

Les marteloscopes[1] sont des outils relativement nouveaux, (Meredieu et al., 2009), et les utilisations qui en découlent sont variées : certains les définissent en premier lieu par une approche de formation des personnes, d'autres comme un terrain expérimental. Leur développement à une échelle internationale est actuellement en cours (Soucy et al., 2016; Spinelli et al., 2016; Vítková et al., 2016). Un marteloscope permet de simuler un martelage, servant ainsi de support aux échanges autour des raisons et des conséquences du prélèvement d'un arbre plutôt qu'un autre (Cosyns et al., 2019; Kraus et al., 2018). Un martelosocope est donc avant tout, un *outil pédagogique*, qui vise aussi bien à échanger entre sylviculteurs aguerris, qu'à initier les plus néophytes à la gestion forestière, tout en assurant une partie de la formation des élèves, futurs acteurs du monde forestier. En particulier lorsque de nouvelles méthodes de gestion forestière sont introduites (ex. la gestion irrégulière) ou encore que de nouveaux critères sont pris en compte (ex. gestion en faveur de la biodiversité), les experts forestiers tendent à reproduire la sylviculture dont ils ont l'habitude, au détriment de celle souhaitée (Vítková et al., 2016). Le marteloscope permet d'étudier et de faire prendre conscience de ce phénomène. Chaque marteloscope est caractérisé par une thématique, par exemple conversion d'un ancien taillis-sous-futaie. Concrètement, il s'agit d'une *parcelle forestière*, de 0.7 à 1.2 ha la plus souvent, dans laquelle tous les arbres sont inventoriés. Ainsi, chaque arbre possède un numéro d'identification, des coordonnées dans l'espace et des caractéristiques dendrométriques comme son essence, son diamètre, ses dendromicrohabitats éventuels ou encore sa qualité estimée. Les informations recueillies lors d'inventaires réguliers permettent de fournir des données quantifiées qui servent d'appui aux discussions et analyses.

Une journée (ou demi-journée) type dans un marteloscope se déroule en plusieurs temps. Tout d'abord, les spécificités du lieu sont évoquées. Les indicateurs classiques d'un martelage sont transmis et expliqués aux participants. Notamment, les graphiques, tableaux sont des outils indispensables à la transmission rapide et claire des informations.

[1] L'écriture martelloscope peut également être utilisé.

Ainsi, les objectifs du martelage sont fixés. Dans un deuxième temps, chacun (ou en petit groupe) effectue un *martelage fictif* en relevant les numéros des arbres qu'il ou elle aurait prélevé. Enfin, un *temps d'analyse* permet d'échanger et de comparer les résultats attendus, de ceux obtenus. Actuellement, l'analyse est effectuée grâce à des tableurs déjà formatés pour produire une série de graphiques et tableaux, tant sur la nature du prélèvement, que sur l'analyse du peuplement restant après le martelage. La limite de cette analyse est naturellement temporelle, car la quantification des résultats se limite à la coupe qui vient d'être faite. La projection dans le temps est un facteur particulièrement important pour les sylviculteurs. En effet, « le temps long forestier » est volontiers évoqué pour signifier la croissance lente des arbres par rapport au temps de vie humain. En pratique, les conséquences d'un martelage peuvent se visualiser à l'issue de quelques années. Plusieurs martelages sont parfois nécessaires à un gestionnaire pour parvenir à ce qu'il souhaite pour sa parcelle. Inversement, il est probable que des conséquences indésirables et inattendues mettent plusieurs années à se manifester, retardant d'autant la rectification des erreurs. Dans ce cadre, la modélisation de l'évolution du peuplement en fonction de la sylviculture réalisée constitue un réel atout pour les marteloscopes et donc pour la formation des forestiers. L'intérêt de la modélisation, comme outil pour franchir la barrière de la projection dans l'avenir, avait déjà été soulevé lors d'entretiens, réalisés en 2010 (Gineste, 2010). Coupler un modèle avec un marteloscope permettrait de combler ce manque et de franchir une étape supplémentaire dans l'analyse. Le choix du modèle à utiliser, en France, est aujourd'hui illusoire : il n'existe qu'un seul modèle capable de générer un peuplement irrégulier et mélangé, SAMSARA. Une première version de SAMSARA avait déjà été couplée à des marteloscopes (Courbaud, 2004; Gauquelin et al., 2008), permettant d'observer la conséquence des interventions sur la croissance du peuplement.

1.2 Un modèle : SAMSARA

Le modèle SAMSARA2, développé à l'INRAE Grenoble (Courbaud et al., 2015), est un modèle de dynamique forestière conçu pour la sapinière-pessière-hêtraie de montagne. Il est implémenté sous la plateforme Capsis, *Computer-Aided Projection of Strategies In Silvicultur)*, (Dufour-Kowalski et al., 2012). Ce modèle est qualifié d'individu-centré et spatialement explicite. En effet, chaque arbre est décrit par un ensemble de variables dendrométriques ainsi qu'une position dans l'espace (3 dimensions). Le fonctionnement du modèle repose sur la lumière, qui conditionne la croissance, la régénération et la mortalité de chaque individu (voir figure 1).

La survie et la croissance des semis dépendent de la lumière arrivant au sol. Plus la lumière au sol est importante, plus la croissance des semis est importante. Celle-ci joue également sur la répartition des essences présentes au stade de semis : les essences héliophiles seront privilégiées avec une intensité lumineuse élevée, inversement avec les essences dryades.

La mortalité dans le peuplement n'est pas directement dépendante de la lumière, elle est fonction de deux facteurs : sa taille (plus l'arbre est grand, plus sa probabilité de mourir par sénescence est importante) et de son voisinage. En effet, plus la densité d'arbres, présents dans un rayon défini par l'utilisateur et plus gros que l'individu, est importante, plus l'arbre a de probabilité de réduire sa croissance et de mourir par compétition.

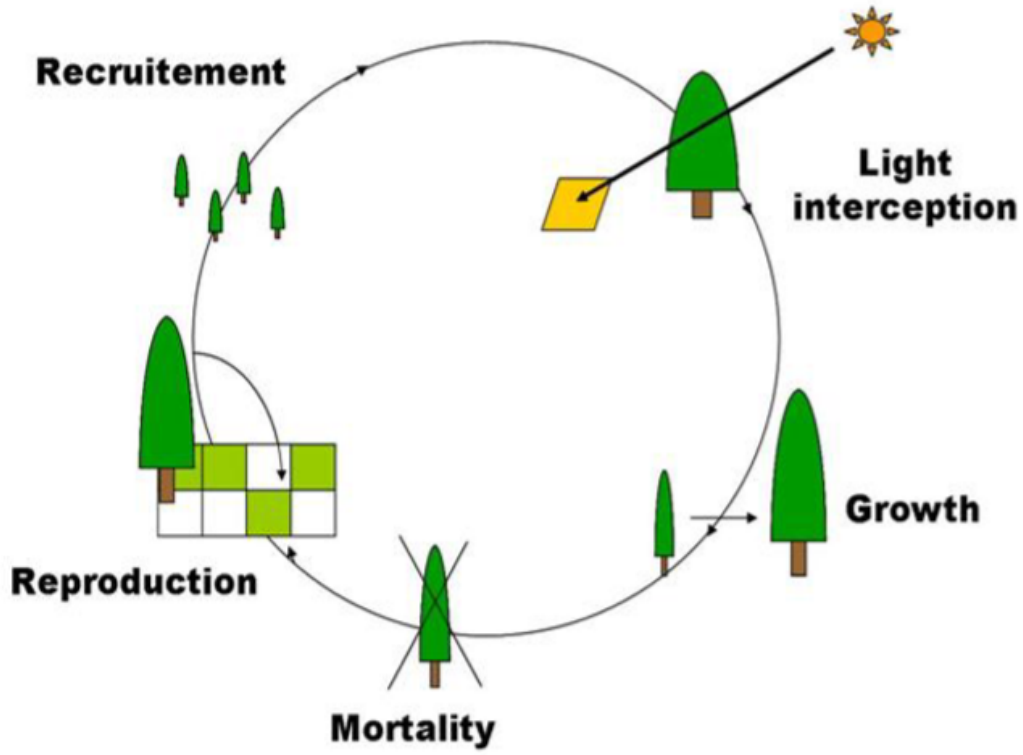


FIGURE 1 : Principe de fonctionnement du modèle d'évolution de peuplement d'après Courbaud et al. (2015).

1.2.1 Simulation de la dynamique forestière

Chaque processus démographique est décrit par une équation dont les paramètres sont estimés à partir de données de terrain. Pour des prédictions précises à l'échelle locale, il est préférable de recalibrer le modèle avec des données locales. La croissance est le processus le plus facile à recalibrer et influe fortement sur les prédictions de production, un critère essentiel pour le sylviculteur.

L'hypothèse posée et mise en équation dans SAMSARA est la suivante : la croissance de chaque individu est fonction de la lumière interceptée par le houppier. Plus celui-ci est important, plus sa croissance est importante. L'énergie lumineuse reçue est générée par Samsara. Il est ainsi nécessaire de réaliser des simulations SAMSARA pour calibrer l'équation principale. Trois autres équations allométriques, qui peuvent également être calibrées, influent sur le calcul de la lumière interceptée :

- hauteur en fonction du diamètre ;
- rayon du houppier en fonction du diamètre ;
- hauteur de base du houppier en fonction de la hauteur.

L'environnement d'un arbre est également une variable déterminante dans le calcul de l'énergie lumineuse. En effet, les rayons lumineux sont interceptés par les arbres voisins. Afin d'estimer correctement la croissance d'un individu, il est donc nécessaire de gérer les lisières de parcelles modélisées. Le système imaginé correspond à une répétition de la parcelle, à l'infini (voir figure 2). Conséquence directe pour l'utilisateur, la parcelle forestière doit être *rectangulaire*.

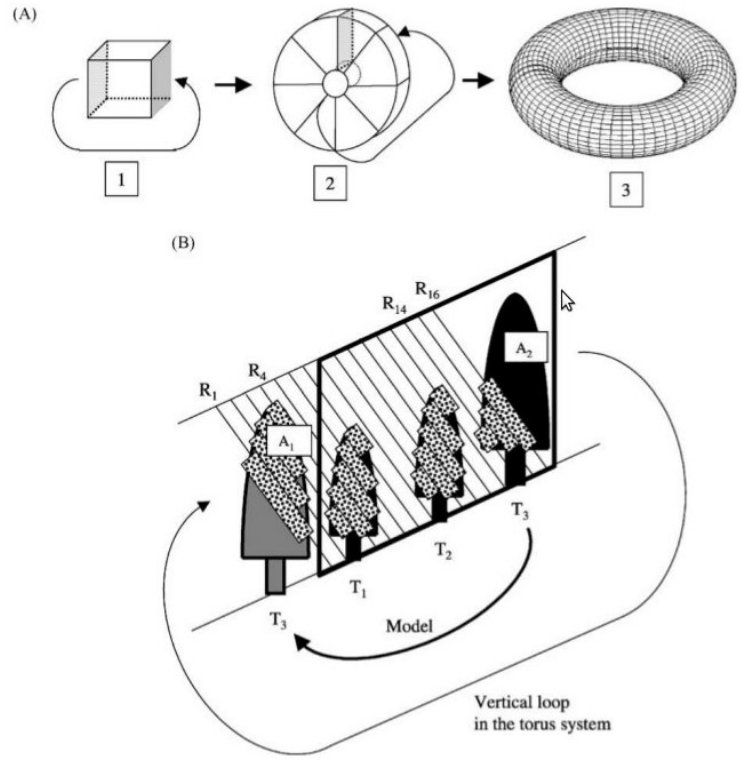


FIGURE 2 : Prise en compte des bordures dans le modèle SAMSARA2.
Figure extraite de Courbaud et al. (2003)
(A) Pricipe de torus : la parcelle initiale (1). Les bords droits rejoignent les bords gauche. Le système prend alors la forme d'un tube (2). Même transformation : les bords se rejoignent formant un système sans bordure (3).
(B) Application du principe de torus au modèle : une position virtuelle est donnée aux arbres pour calculer l'énergie lumineuse dans une ambiance forestière.

Ainsi, l'utilisation de SAMSARA2 permet de projeter les caractéristiques dendrométriques des arbres dans le temps, proposant des éléments sur le devenir du peuplement. Le calcul de l'énergie lumineuse fournit également des indicateurs inédits en matière de gestion.

1.2.2 Fonctionnement de l'algorithme multi-critères

En parallèle, des modules permettent d'ajouter la simulation de la gestion forestière pratiquée. Il existe plusieurs modules permettant de simuler une sylviculture avec SAMSARA2, (Lafond et al., 2012, 2014). Lors de l'élaboration de ce sujet de stage, l'algorithme multi-critères a été retenu. Pour sélectionner des arbres à marteler, il est possible d'utiliser deux outils :

- rentrer une liste d'arbres à prélever, réalisant la simulation d'une coupe prédéfinie ;
- compléter une série de critères définissant sa sylviculture, autorisant l'automatisation de la gestion (algorithme multi-critères).

Le premier cas correspond par exemple à un martelage fictif de terrain, les opérateurs ont alors relevé la liste des arbres à prélever.

Dans le deuxième cas, les arbres sont choisis par l'algorithme. L'utilisateur détermine une importance des critères pour 3 types d'arbres : de rétention, focaux et à marteler. Les arbres ayant le score le plus élevé sont sélectionnés. Le score de chaque arbre est une combinaison linéaire de critères décrivant les caractéristiques des arbres (diamètre, distance aux voisins etc.), pondérés par un poids défini par l'utilisateur pour chaque critère.

En premier lieu, l'utilisateur détermine un nombre d'arbres *de rétention*. Les critères à sa disposition sont l'essence, le diamètre, la distance à un arbre équivalent et un critère écologique. L'utilisateur détermine ensuite le nombre d'arbres *focaux* souhaités. Les arbres focaux sont des individus cibles par exemple d'un point de vue économique, mais ils peuvent aussi déterminer le centre de trouées. Pour sélectionner les individus, l'algorithme classe les arbres en fonction des critères suivants : les essences, leur diamètre, leur vigueur, un élément écologique, un élément économique et des distances aux arbres voisins. L'utilisateur choisit le poids qu'il donne à chacun de ces critères, permettant d'attribuer un score à chaque arbre. Le poids peut être positif, négatif ou nul. En parallèle, l'utilisateur détermine une surface terrière cible à l'hectare, ce qui permet à l'algorithme de trouver un nombre d'arbres *à marteler*. De même, les arbres sont classés. En outre, ils peuvent être désignés en fonction des arbres focaux choisis : l'utilisateur renseigne un poids sur la distance entre les arbres à prélever et les arbres focaux. Cette deuxième sélection aboutit au prélèvement des arbres.

Ainsi, trois séries d'arbres sont déterminées par l'algorithme en suivant les critères souhaités par l'utilisateur. Pour la première coupe, ces arbres s'affichent directement dans une fenêtre, permettant de gagner en transparence et précision entre le modèle et l'utilisateur. Cet outil, en phase de test, devrait permettre de simuler la gestion d'un sylviculteur sur le long terme.

1.3 Problématique et objectifs

Coupler des marteloscopes avec un modèle de dynamique forestière, capable de surcroît de simuler des sylvicultures, constitue l'enjeu de ce stage. Plusieurs phases sont requises : l'élaboration d'un état initial, une calibration adaptée au contexte local et la production d'un rapport standardisé.

En effet, un point d'attention se situe dans la mise en forme des données. Le modèle est implémenté dans la plateforme de modélisation Capsis. Cette dernière est prévue pour tester, chercher les meilleures combinaisons possibles. Les graphiques disponibles sont donc peu stabilisés et peu lisibles par rapport à ce qui est produit actuellement dans l'analyse du marteloscope (ex. figure 3).

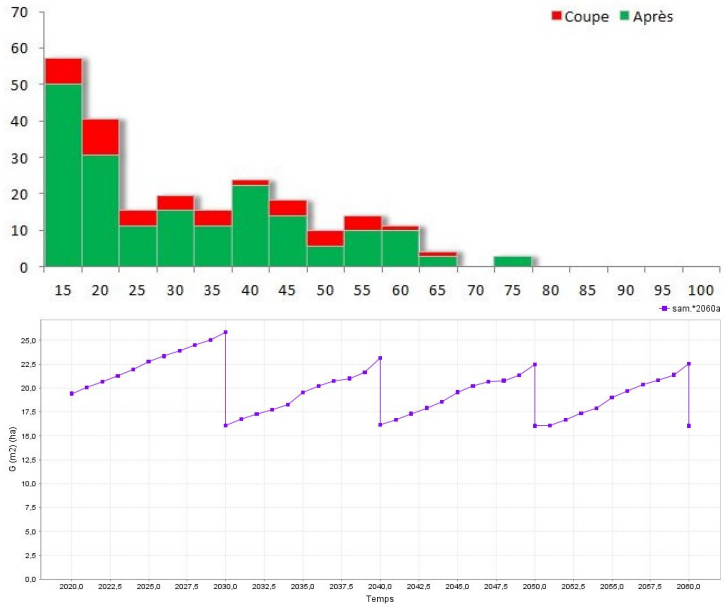


FIGURE 3 : Comparaison d'un graphique issu du tableur (en haut) et d'un autre issu du modèle Samsara sous Capsis (en bas).
Répartition du nombre de tiges en fonction des classes de diamètre (au-dessus).
Évolution du nombre de tiges tout au long de la simulation, (en dessous).
Le tableur autorise une comparaison fine des résultats du martelage, en visualisant sur un même graphique, le peuplement avant, et après coupe, tandis que les résultats d'une simulation permettent une projection dans le temps.

Au vu du déroulement d'une journée passée sur la parcelle forestière, il est aussi nécessaire que ces graphiques soient produits rapidement. Ainsi, un des objectifs de ce stage est de développer un formulaire de sortie standardisé, reprenant les informations déjà utilisées aujourd'hui dans l'analyse du martelage fictif et ajoutant des éléments de simulation.

Enfin, l'algorithme multi-critères est en phase de test. Il s'agit d'éprouver sa capacité à reproduire la sylviculture souhaitée par les différents utilisateurs.

Ainsi, l'objectif est de proposer à la fois une projection d'évolution court terme, suite au martelage de terrain, et une projection d'évolution moyen terme avec l'utilisation de l'algorithme multi-critères. Pour que le couplage, entre le modèle et l'opérateur de terrain, soit fluide et aussi rapide que possible, il est nécessaire de lever divers verrous techniques :

- la calibration locale du modèle ;
- l'initialisation du marteloscope ;
- la simulation de la sylviculture grâce à deux algorithmes ;
- l'écriture d'un rapport, généré automatiquement.

Cela représente de l'écriture de codes R, des développements interne au modèle à imaginer et effectuer, une petite étude statistique pour la calibration et enfin, une évaluation par des acteurs forestiers.

Cette étude s'est appuyée sur un marteloscope en particulier, car inscrite dans le projet « AmphiForêt ». Celui-ci est situé à Auberive, en Haute-Marne (52). Les essences majoritaires sont les hêtres et chênes, en mélange avec divers feuillus (ex. charme, érables, alisiers). L'Office national des forêts (ONF) est le gestionnaire de la parcelle forestière et un des partenaires du projet. Ancien taillis-sous-futaie, il est géré en irrégulier depuis une vingtaine d'années. Ce site est inclus dans le massif forestier du Syndicat intercommunal de gestion forestière de la région d'Auberive (SIGFRA), qui bénéficie d'un réseau de placettes permanentes important avec, à ce jour, 3 (re)mesures.

2 Initialisation : transformation des relevés de terrain en un fichier standard d'état initial, lisible par le modèle

La construction d'une parcelle rectangulaire, indispensable au fonctionnement du modèle (voir 1.2.1), a nécessité une attention particulière. De même, le travail autour de la correspondance entre des dendromicrohabitats relevés et ceux présents dans le modèle, est détaillé ci-dessous.

2.1 Une parcelle rectangulaire

Afin de gérer les lisières de parcelle dans le calcul de la croissance des arbres, une parcelle rectangulaire est nécessaire au fonctionnement du modèle. Toutefois, les marteloscopes ont souvent une forme différente. Nous avons donc élaboré une approche intégrant le marteloscope au sein d'une placette rectangulaire plus large (voir figure 4). Les arbres de la zone périphérique sont créés par le modèle en correspondance avec les caractéristiques du marteloscope. De cette manière, tous les arbres ont des voisins. En effet, si ces individus ne sont pas ajoutés, le modèle considère la surface périphérique comme une trouée. L'utilisateur ne s'en rend pas compte directement car le modèle crée lui-même un rectangle, vide, autour du marteloscope. Dans ce cas, les arbres en bordure du marteloscope ont une croissance surestimée (lumière trop importante) et tous les indicateurs calculés à l'hectare par le modèle sont faussés. Enfin, Samsara doit être capable de gérer de manière différenciée les arbres du marteloscope et les arbres de la zone périphérique pour fournir les résultats de simulation sur le marteloscope uniquement.

2.1.1 Méthode

Pour compléter cette zone périphérique (cf figure 4) un tirage parmi les arbres réellement mesurés a été réalisé, voir 1.2.1. La probabilité de tirage correspond à la surface de la zone de cœur, divisée par la zone périphérique. Ainsi, chaque arbre possède la même probabilité d'être dupliqué. La fonction $sample_n$ de R a été utilisée. Un individu fictif possède exactement les mêmes caractéristiques dendrométriques qu'un individu réel. Une position aléatoire leur a été attribuée grâce à la fonction *spsample* du logiciel R, version 3.6.2. Un rectangle parallèle aux axes est nécessaire à la bonne lecture des données par le modèle. Une fois ces arbres fictifs créés, il est important de les gérer dans le modèle : les calculs effectués et les résultats générés ne doivent pas tenir compte de ces arbres fictifs. Pour faciliter les modifications de l'algorithme de SAMSARA2, effectuées par François de Coligny, Benoit Courbaud et Nicolas Bedez, il a été décidé de renseigner les limites des coordonnées de la zone réelle, également appelée zone de cœur.

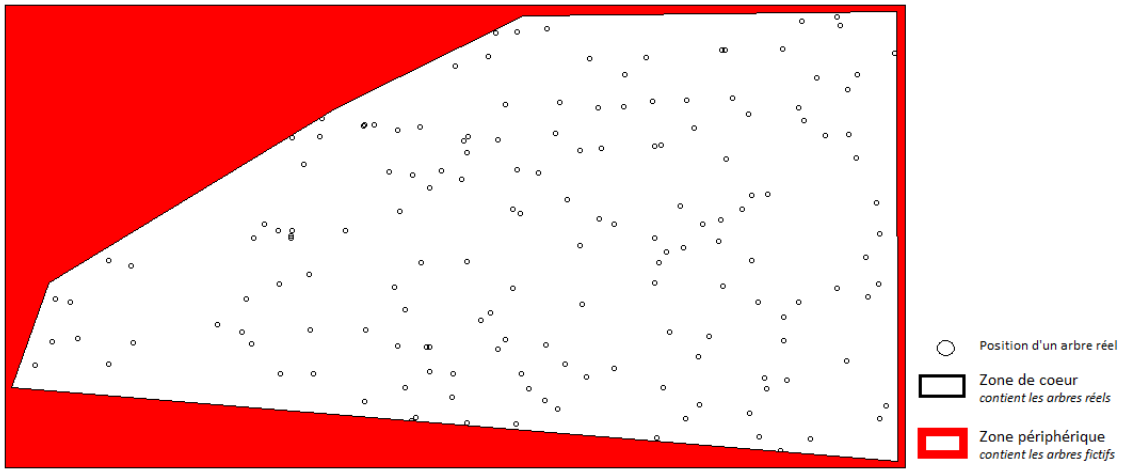


FIGURE 4 : Visualisation de la partie périphérique, fictive et de la partie de cœur, correspondant au marteloscope.

2.2 Les dendromicrohabitats

Les dendromicrohabitats constituent un critère de martelage primordial car leur présence ou absence est un des premiers critères de la qualité d'un arbre. Inversement, leur présence en nombre important sur un même arbre constitue une raison de préserver un arbre pour sa forte valeur écologique, (de TURCKHEIM and Bruciamacchie, 2005). Ainsi, suivant les objectifs d'un martelage, il peut s'agir d'un critère déterminant. Or, la liste, c'est-à-dire la typologie de ces dendromicrohabitats, est différente entre les mesures effectuées sur le terrain, voir l'annexe A, et celle utilisée dans le modèle. La typologie du modèle s'appuie sur celle de Larrieu et al. (2018), qui regroupe 7 formes, 15 groupes et 47 types et constitue le standard Européen. Dans le modèle, les dendromicrohabitats sont classés selon 11 types, voir annexe B. La typologie utilisée pour relever les dendromicrohabitats dans le marteloscope d'Auberive comporte 95 types. Ils sont distingués selon :

- leur nature, notée à l'aide d'une lettre, par exemple, une fente est notée f, une cavité g ;
- lorsque c'est pertinent, la place de l'habitat sur l'arbre, notée à l'aide d'un chiffre, par exemple des champignons au pied et sur le fûts seront notés respectivement c1 et c2. Par contre, une fourche sera indiquée k : il n'est pas possible de détailler sa position avec cette typologie.

2.2.1 Méthode

Dans un premier temps, chaque type de chaque codification est décrit. Ensuite, nous avons jugé en fonction du sens de chaque classe s'il était pertinent de réaliser, ou non, une équivalence. Par exemple, les champignons notés c, c1, c2, c3 (typologie ENGREF) correspondent à Polypore (typologie du modèle). Par contre, aucune correspondance n'est possible pour la présence de mousse, qui n'a pas d'équivalence dans la typologie du modèle. Inversement, les dendrotelmes ne sont pas relevés dans la codification ENGREF.

2.2.2 Résultats et discussions

Après le travail de correspondance entre la typologie utilisée sur le marteloscope et celle comprise dans le modèle, 5 dendromicrohabitats sont présents dans le modèle, sans être relevés sur le terrain (voir annexe B). Deux cas se distinguent : le type a une incidence, ou non, sur la qualité de l'arbre. Dans le premier cas, l'habitat n'est pas relevé, donc il n'est

pas pris en compte par le modèle. Toutefois, dans la réalité, il sera partie intégrante des critères du gestionnaire car il participe à l'estimation de la qualité de l'arbre. Le modèle surestimera sa valeur économique. Ainsi, seule l'initialisation peut être biaisée, car le modèle crée ensuite les dendromicrohabitats manquants. Donc, sur le long terme, l'écart théorique entre la prédiction et la réalité devrait diminuer. Cette erreur, conséquence de la pluralité des usages potentiels lors des constructions du modèle et des protocoles de mesure, peut-être rectifiée par un nouvel inventaire complémentaire. Le deuxième cas peut s'avérer délicat. Ici, le modèle ne simule pas correctement le raisonnement d'un gestionnaire. En effet, on peut faire l'hypothèse qu'il s'agit des types qui ne sont pas relevés par les gestionnaires car ils ne sont pas pris en compte dans la sylviculture. Cependant, un score écologique est en construction et permet de rapprocher les simulations de la gestion terrain : les dendromicrohabitats seront hiérarchisés selon leur vitesse de reconstitution, leur densité en forêt exploitée et naturelle, et selon leur taille ou abondance (voir détail au 1.2.2). La valeur écologique des arbres sera donc mieux approchée. Les dendromicrohabitats concernés par le premier cas pourraient être : cœur exposé, cavité à la base d'un tronc. Tandis que ceux correspondant au deuxième cas sont : les dendrotelmes, chancres et loupes, coulée de sève.

Type	Nombre
Bark.Loss	7
Crack	3
Rot.Hole	14
NA	110
Total	134

Tableau 1 : Récapitulatif des dendromicrohabitats relevés sur le marteloscope d'Auberive.
Les NA correspondent aux types qui n'ont pas d'équivalence.

Inversement, une fois la correspondance réalisée, 80% des habitats relevés n'ont pas d'équivalence (tableau 1). Ainsi, il est important d'utiliser la typologie de référence au niveau Européen, désormais disponible, (Larrieu et al., 2018). Dans certains cas, cette typologie, utilisée en version simplifiée dans le modèle, se révèle insuffisante. Des dendromicrohabitats non pris en compte, peuvent être des éléments de décision en gestion sylvicole (tableau 2). Le cas du hêtre ayant des trous de pics ou des grandes branches mortes illustre ce cas.Néanmoins, les dendromicrohabitats relevés, mais qui ne sont pas pris en compte dans le modèle, sont souvent des habitats avec une importance économique et écologique faible (tableau 2).

Type	Nombre	Description
a	1	Attaques de pics
b	44	Mousse
l	1	Lichen
r	5	Lierre
s	31	Petites branches mortes
x	25	Moyennes branches mortes
y	3	Grandes branches mortes
Total	110	

Tableau 2 : Détail des dendromicrohabitats relevés sur le terrain, n'ayant pas d'équivalence avec la typologie du modèle.
Les chiffres, détaillant la position du dendromicrohabitat, ne sont pas précisés dans ce tableau. Par exemple, la catégorie, b inclus également b1, b2, et b3.

2.3 La régénération

Deux problèmes se sont posés pour l'initialisation de la régénération. Dans un premier temps, la régénération n'était pas encore relevée au sein du marteloscope. Dans un second temps, comme pour les arbres, il est nécessaire de transformer les données de manière à obtenir un rectangle. SAMSARA2 gère chaque arbre individuellement, c'est également le cas pour la régénération. Chaque semis est caractérisé par une essence, une position dans l'espace (x, y), et une hauteur.

2.3.1 Méthode et résultats

Dans un premier temps, deux cas ont été identifiés pour la mesure de la régénération. Il a été décidé de réaliser un inventaire en plein de toutes les tiges ayant un diamètre supérieur à 2.5 cm (essence et position). L'inventaire des tiges supérieures ayant déjà été réalisé à l'installation du marteloscope. Dans le temps imparti et avec les moyens disponibles, il n'était pas envisageable d'inventorier toute la régénération présente dans le marteloscope. De plus, classiquement, un protocole permettant d'estimer la régénération ne prend pas en compte la position dans l'espace des semis. Ainsi, pour les semis (0.50 cm Hauteur $<$ Semis $<$ 2.5 cm de diamètre), un protocole (voir annexe D), mixant des placeaux de mesure précises, et des zones, délimitées en s'appuyant des arbres inventoriés, a été mis en place (voir figure 5). L'objectif étant d'avoir des informations sur la composition, la hauteur (inventaire par strates) et la position, grâce aux zones jugées homogènes (en matière de composition, hauteur ou densité).

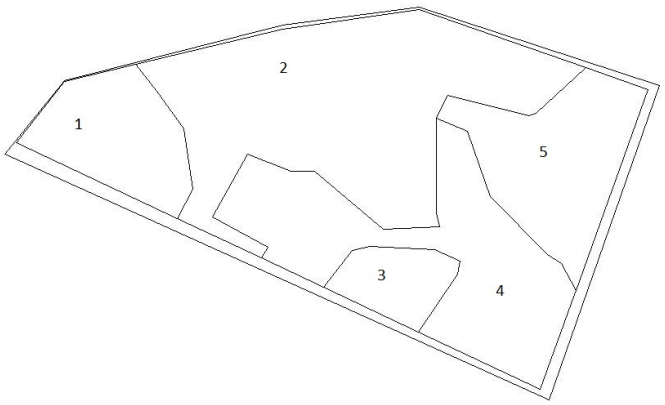


FIGURE 5 : Schéma des limites d'un marteloscope à Auberive.
La marge extérieure permet d'inclure tous les arbres, même les arbres limites.
Les délimitations intérieures correspondent aux différentes zones de régénérations identifiées sur le terrain.
Zone 1 : Les semis sont relativement nombreux et les essences variées. Zone 2 : Présence d'un couvert de ronces, les semis sont pratiquement absents. Zone 3 : La densité de semis est plus élevée. Zone 4 : Les semis, notamment d'érable, sont présents de manière significative. Zone 5 : La densité de semis est plus élevée, tout en ayant des semis d'érable.

À partir de ces informations, une régénération fictive a été réalisée : par zone et par essence, une densité équivalente à l'hectare à été calculée. L'effort d'échantillonnage (c'est à dire le nombre de placeaux par zone) dépend de la surface de la zone. En tout, 22 placeaux de 2 m de rayon ont été inventoriés dans 5 zones, correspondant à $5 \times (\pi * 2^2) = 63\text{m}^2$, soit 0.8 % de la surface du marteloscope. Un inventaire de régénération en plein, sur le marteloscope, est ainsi obtenu. Une régénération fictive a été créée en périphérie, de manière à compléter le rectangle : les semis de toutes les zones ont été sommés, puis le total, divisé par la surface (figure 6). Le travail a été réalisé en distinguant les essences. Une position aléatoire leur a ensuite été attribuée. Ces manipulations ont été réalisées grâce au logiciel R.

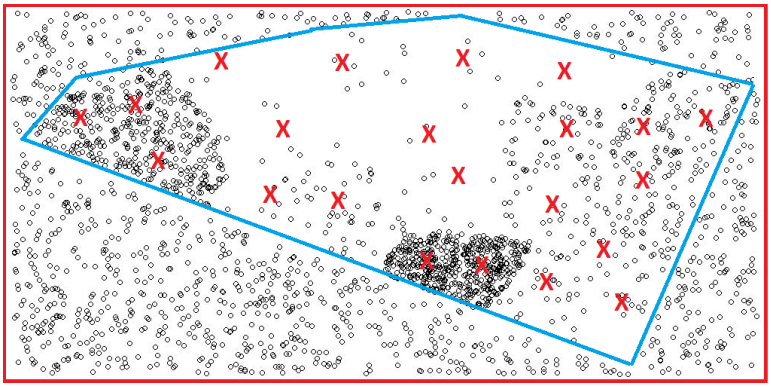


FIGURE 6 : Schéma de la régénération recréée sur une placette fictive Samsara, à partir de zones délimitées sur le terrain et de sous-placeaux inventoriés en plein.

Les localisations des sous-placeaux inventoriés sont représentées par des croix rouges. Ces sont les endroits où un inventaire a été réalisé. Dans la zone entourée en bleu, (contours du marteloscope), les informations recueillies ont été moyennées par essence et par zone, permettant de reconstituer la régénération. La zone extérieure, entourée en rouge, a été construite en moyennant les informations par essence, mais toutes zones confondues. Comme pour les arbres contenus dans la zone périphérique, il s'agit d'une régénération fictive, utile à la gestion des lisières au sein du modèle.

Les semis dont la hauteur est inférieure à 50 cm ne sont pas pris en compte dans l'initialisation (tableau 3) mais sont générés automatiquement par la suite grâce à un module de SAMSARA. En effet, ces semis présentent une difficulté supérieure de mesure par leur nombre très important tout en ayant un enjeu plus faible. Pour cette étude, l'horizon temporel de modélisation a été choisi arbitrairement à 50 ans pour des raisons de pertinence des résultats générés, notamment liés à des difficultés de modélisation de la régénération (Courbaud et al., 2015).

NumZone	NbPlac	Aire_m2	N50	N150	N2.5
1	3	836	794	7.97	0
2	7	2916	27	20.6	5.72
3	2	389	2443	10.3	5.14
4	6	1859	152	80.7	0
5	4	1173	1943	0	0

TABLEAU 3 : Récapitulatif des données de régénération à l'hectare.
Les valeurs sont des moyennes des sous-placeaux de chaque zone, toutes essences confondues. *N50, N150 et N2.5 = nombre de semis à l'hectare pour les classes de hauteur 10-50 cm ; 50-150cm ; 150cm et 2.5 cm de diamètre ; NbPlac = Nombre de sous-placeaux inventoriés dans la zone.*

Les données montrent une très forte chute de densité de semis entre 50 cm et 1 m qui n'était pas bien représentée dans la dynamique du modèle. Pour obtenir des prédictions de recrutement plus réalistes sur le long terme malgré les limites du modèle, la densité de petits semis par rapport à l'inventaire de terrain a été artificiellement réduite, 30 % des semis ont été conservés (voir partie 3.3.1).

2.4 La qualité

Dans le fichier d'inventaire nécessaire au fonctionnement du modèle, les caractéristiques des arbres sont à renseigner. L'utilisateur arbitre pour le diamètre de recrutement des arbres, c'est-à-dire qu'il détermine dans le fichier d'initialisation quels individus sont des semis ou au contraire, des arbres. Dans le cadre de cette étude, le diamètre seuil était imposé à la fois par les contraintes du modèle et celles du martelage : seuls les arbres initialisés comme « arbre » sont pris en compte dans les sorties du modèle et proposés par l'algorithme multi-critères au martelage. Or, sur le terrain, tous les arbres ayant un diamètre supérieur à 12.5 cm sont proposés au martelage. Le diamètre de recrutement des arbres est donc de 12.5 cm au sein du modèle. Il se trouve que SAMSARA2 n'est pas en capacité, actuellement, de simuler l'évolution de la qualité d'un arbre au cours de sa croissance. Lors du passage à la futaie, une qualité est attribuée définitivement à chaque arbre nouveau, selon des probabilités définies par l'utilisateur. Les semis ne possèdent pas de qualité au sein du modèle. Par ailleurs, sur le terrain, les perches ont souvent une qualité médiocre, qui s'améliore globalement jusqu'au stade petit bois. Si la qualité réelle est renseignée pour ces arbres dans le modèle, le risque est d'obtenir dans les simulations un nombre anormal d'arbres de faible qualité. Dès lors, à l'initialisation et pour les arbres de faible diamètre, il s'agit de renseigner une qualité potentielle et non réelle. Comme pour la régénération, l'initialisation est volontairement faussée de manière à contourner une limite interne au modèle.

2.4.1 Méthode

Les données proviennent d'un réseau de placettes permanentes installé dans la région du marteloscope (base de données du Syndicat intercommunal de gestion forestière de la région d'Auberive, SIGFRA, couvrant plus de 6 000 ha, gérés en irrégulier depuis plus de 20 ans par l'ONF). Les données étant nombreuses, il a été jugé plus pertinent d'utiliser seulement les placettes se situant sur la même station que le marteloscope calibré. L'hypothèse étant que le type de sol influe sur la qualité des arbres. L'évolution de la qualité en fonction du diamètre a été tracée. L'hypothèse posée est la suivante : l'évolution constatée des classes de qualité tire son origine soit de l'action du sylviculteur (simulée par SAMSARA), soit de la dynamique naturelle (non-simulée). Il s'agit donc de déterminer les proportions des

différentes classes de qualité, pour un diamètre où le sylviculteur n'a pas encore sélectionné les tiges mais où la qualité actuelle d'un arbre se rapproche de sa qualité potentielle. Un diamètre de 25 cm, nous a semblé pertinent pour répondre à ce compromis. Les proportions des qualités par essence pour un diamètre de 25 cm ont ainsi été calculées. Ces mêmes proportions ont été respectées pour les arbres du marteloscope ayant un diamètre inférieur ou égal à 25 cm. La qualité estimée sur le terrain a été conservée pour les arbres d'un diamètre supérieur. Ainsi, la qualité renseignée dans le fichier d'initialisation est :

- estimée dans le but de s'approcher de la qualité potentielle de l'arbre, pour les arbres de diamètre inférieur à 30 cm ;
- observée directement sur le terrain, pour les arbres de diamètre supérieur ou égal à 30 cm.

2.4.2 Résultats et discussions

Essence	Qualité A	Qualité B	Qualité C	Qualité D
Hêtre	5	17	32	46
Alisier B	17	33	33	17
Alisier T	26	44	24	6
Charme	1	7	46	46
Chêne	6	21	57	16
Érable C	15	15	40	30
Merisier	21	31	37	11
Feuillus	13	47	33	7
Moyenne	13	27	38	22

Tableau 4 : Répartition, en pourcentage, des qualités estimées des arbres situés dans la région d'Auberive, étant dans la classe de diamètre 25 cm.

Certaines essences ont été regroupées dans la catégorie « Feuillus » de manière à obtenir un nombre de données pertinent. Alisier B = Alisier Blanc ; Alisier T = Alisier Torminal, Érable C = Érable Champêtre ; Érable S = Érable Sycomore ; Feuillus = Frêne, Érable Sycomore, et Tilleuil

Une variabilité interespèce est observée : par exemple le charme possède seulement 1 % de qualité A tandis que l'Alisier Torminal en présente 26 %. Les différentes stratégies des essences peuvent en partie expliquer ces écarts. En effet pour poursuivre l'exemple, certains arbres comme le charme, ont une dynamique naturelle au taillis, plus importante que d'autres essences, comme l'Alisier Torminal, qui ont une croissance majoritairement rectiligne. Un Alisier aura donc tendance à avoir une meilleure qualité, sans que le sylviculteur n'intervienne. Toutefois, en moyenne, le pourcentage de qualité A est élevé, tandis que le pourcentage de qualité D est relativement faible (voir tableau 4). Ces résultats suggèrent donc que le travail de sélection du sylviculteur est déjà visible lorsque les tiges ont 25 cm. À Auberive, ce résultat est confirmé par le sylviculteur, qui commence le travail de sélection au stage perche. Pour identifier et vérifier l'existence d'un diamètre seuil, il serait intéressant dans un premier temps de suivre l'évolution de la qualité de certains arbres. Toutefois, il ne semble pas exister de jeu de données ayant des mesures de qualité sur un aussi long terme. Si tel était le cas, le diamètre auquel la qualité d'un arbre se stabilise, pourrait être identifié. La question du biais de l'opérateur qui estime la qualité peut également interférer dans cette vérification. Dans un second temps, pour déterminer l'action du sylviculteur, il serait également judicieux d'obtenir des données dans des forêts en gestion et au contraire des forêts laissées en libre évolution. De plus, pour réaliser une telle comparaison, les caractéristiques de la forêt (ex. la station) doivent être égales. En comparant les proportions de qualité entre ces types de forêts, un diamètre d'intervention du sylviculteur pourrait

être fixé. Ainsi, faute de données, une démarche rigoureuse semble donc hors de portée aujourd'hui. La démarche d'initialisation de la qualité, vise donc à approcher une qualité potentielle pour les arbres de faible diamètre, dans le but d'obtenir un outil pédagogique fonctionnel, et non de prédiction.

2.5 Conclusion : l'initialisation, un processus chronophage en voie de simplification, permettant de contourner les approximations du modèle

Ainsi, les limites de l'initialisation, ayant des conséquences sur les performances du modèle, concernent principalement la correspondance restreinte entre les dendromicrohabitats mesurés et ceux présents dans le modèle. L'utilisation d'une typologie commune à l'échelle Européenne devrait faciliter cette étape.
Pour ce qui concerne la régénération, l'utilisateur est contraint à la fois par le modèle et par l'essence même de la donnée. En effet, l'estimation de la régénération, en particulier pour les stades les plus jeunes est approchée, mais peut suffire dans le but d'une utilisation pédagogique. En revanche, à ce stade, pour des raisons de gestion de la dynamique des semis dans le modèle, il est nécessaire de diminuer le nombre de semis réels. « L'erreur » d'initialisation corrige ainsi une approximation du modèle. De même, il est nécessaire de modifier les qualités observées en qualité potentielle pour les arbres de petits diamètres, SAMSARA2 ne permettant pas à la qualité d'un arbre d'évoluer au cours d'une simulation alors que jusqu'à un certain diamètre, la qualité des arbres s'améliore.
Enfin, pour un utilisateur novice souhaitant utiliser le modèle, la limite prépondérante concerne le temps, non négligeable et nécessaire à la prise en main des fichiers d'initialisation, ainsi qu'à la création d'arbres et semis fictifs. Toutefois, la génération d'arbres périphériques devrait bientôt être transparente à l'utilisateur, car inclue dans le modèle.

3 Calibration : ajustement des paramètres du modèle au contexte local

Le modèle fonctionne grâce à des paramètres que l'utilisateur renseigne à l'initialisation. Ces paramètres, fixes, permettent d'ajuster les équations qui régissent SAMSARA2 (cf explications au 1.2). Une calibration locale peut-être réalisée : c'est-à-dire une estimation de ces valeurs fixes, grâce à des données mesurées directement dans le marteloscope, ou à proximité, lorsque le nombre de données est insuffisant. Deux types de calibration statistiques ont été réalisés lors de ce stage. La première vise à estimer les paramètres des équations entre le diamètre d'un arbre et le rayon de son houppier, ou bien de sa hauteur. Les données ont été directement recueillies dans le marteloscope. Au vu du faible nombre de données (39 hauteurs et 30 rayons de houppier), les équations ne sont pas ajustées pour toutes les essences. Le second type de calibration porte sur l'équation accroissement en surface terrière en fonction de l'énergie lumineuse reçue par l'arbre au cours d'une saison de végétation. Cette équation a été ajustée grâce aux données des placettes permanentes, recueillies dans la région, sur les forêts du SIGFRA gérées en irrégulier (6 000 ha). Cette deuxième allométrie, plus générale, nécessite que les allométries secondaires soient réalisées.

3.1 Allométrie secondaires : rayon du houppier et hauteur en fonction du diamètre de l'arbre

3.1.1 Méthode

Pour ces deux allométries, la même méthode a été suivie. Des mesures de hauteur et de rayon de houppier ont été réalisées, au sein du marteloscope. Avec ces données, un modèle

non-linéaire a été ajusté. Pour l'allométrie rayon du houppier en fonction du diamètre de l'arbre, un modèle linéaire à également été ajusté. Pour juger du modèle le plus pertinent, les *Mean Squared Deviation*, MSD ont été calculés, selon la méthode développée par Gauch et al. (2003). Plus le MSD se rapproche de zéro, meilleure est la prédiction. Le calcul prend en compte la translation, rotation et la dispersion. Les paramètres du modèle le plus pertinent ont été retenus. L'ajustement linéaire de la deuxième allométrie n'a pas été réalisé car d'une part la linéarisation n'est pas immédiate, d'autre part, le modèle non-linéaire donnait de meilleurs résultats. La fonction $lm()$ est utilisée avec le modèle linéarisé, tandis que la fonction $nls()$ permet d'ajuster le modèle non linéaire.

3.1.2 Équations

Les équations des modèles sont les suivantes.

$$R_{it} = k_i D_{it}^b \cdot \exp(\varepsilon_{it})$$

R_{it}, en cm, correspond au rayon du houppier d'un seul arbre t et pour une année i.
D_{it}, en cm, correspond au diamètre de l'arbre t pour une année i.
k_i et b sont les paramètres du modèle,
ε_{it} correspond aux résidus. Elle peut être linéarisée sous la forme :

$$\ln(R_{it}) = \ln(k_i) + b\ln(D_{it}) + \varepsilon_{it}$$

avec $\ln(k_i) \sim \mathcal{N}(mk, sk^2)$.

$$H_{it} = k_i \exp[-\ln(\frac{k_i}{1.3})\exp(-rD_{it})] \cdot \exp(\varepsilon_{it})$$

H_{it}, en m, correspond à la hauteur d'un arbre t, pour une année i.
D_{it}, en cm, correspond au diamètre de l'arbre t pour une année i.
k_i et r sont les paramètres du modèle,
ε_{it} correspond aux résidus.

3.1.3 Résultats

Les résultats obtenus sont détaillés dans les tableaux 5, et 7. Les paramètres ont permis d'une part d'initialiser directement les allométries du marteloscope, d'autre part d'initialiser les placettes virtuelles permettant de calculer la lumière, voir partie 3.2.3. Le tableau 6, montre que les modèles linéaire et non linéaire ont un MSD et LC équivalents, par contre SB et NU sont plus faibles pour le second type de modèle. C'est donc les paramètres issus de l'ajustement des modèles non linéaires qui ont été retenus.

	b	k	Nombre de mesures
Modèle linéaire			
Hêtre	0.9588	0.1206	8
Chêne	1.229	0.0328	7
Général	0.7536	0.2598	30
Modèle non-linéaire			
Hêtre	0.8667	0.2151	8
Chêne	1.069	0.0617	7
Général	0.7943	0.2326	30

TABLEAU 5 : Paramètres des modèles régissant le rayon du houppier d'un arbre en fonction du diamètre, calibrés à l'aide des données d'un marteloscope situé à Auberive.

Le paramètre k est donné au logarithme par le modèle linéaire, il a été transformé à l'exponentielle dans ce tableau pour faciliter la comparaison.

	MSD	SB	NU	LC
Modèle linéaire	1.01	$1.84 \cdot 10^{-2}$	$1.08 \cdot 10^{-2}$	0.977
Modèle non-linéaire	0.975	$2.84 \cdot 10^{-5}$	$1.94 \cdot 10^{-4}$	0.975

TABLEAU 6 : Comparaison des deux estimateurs, pour l'allométrie régissant le rayon du houppier d'un arbre en fonction de son diamètre (toutes essences confondues), calibrée à l'aide des données d'un marteloscope situé à Auberive.

MSD = Mean Saquared-Deviation ; SB = Squared Biais, Translation ; NU = Non Unity Slope, Rotation ; LC = Lack of Correlation, Dispersion.

	r	k	Nombre de mesures
Hêtre	0.1447	26.1	10
Chêne	0.0963	26.2	7
Général	0.1372	25.17	39

TABLEAU 7 : Paramètres du modèle non-linéaire, régissant la hauteur d'un arbre en fonction de son diamètre, calibrés à l'aide des données d'un marteloscope situé à Auberive.

3.2 Équation accroissement en surface terrière en fonction de l'énergie lumineuse reçue par l'arbre

3.2.1 Démarche

L'équation à paramétrer est la suivante.

$$\triangle G_{it} = a_{it} E_{it}^{b} \cdot \exp(\varepsilon_{it})$$

$\triangle G_{it}$, en cm^2/an, correspond à l'accroissement en diamètre d'un arbre t, pour une année i.
E_{it}^{b}, en GJ/an, correspond à l'énergie lumineuse reçue par un arbre t pour une année i.
a_{it} et b sont les paramètres du modèle,
ε_{it} correspond aux résidus.

L'accroissement en surface terrière est calculé sur deux périodes, puis divisé par le nombre d'années séparant les prises de mesures. Les données du SIGFRA ont été utilisées (voir 2.4.1). Afin de prendre en compte la variabilité individuelle des arbres, il a été choisi de conserver uniquement les arbres ayant 3 mesures, c'est à dire une mesure à chaque cycle. Le calcul de l'énergie lumineuse nécessite d'utiliser SAMSARA2. Chaque placette permanente a été transformée de manière à donner une placette fictive SAMSARA2. Une

des transformations nécessaire, est de rendre la parcelle rectangulaire. Pour cela, les arbres réels ont été dupliqués en arbres fictifs. En sortie de simulation, pour chaque arbre fictif, une énergie lumineuse est calculée. Les énergies lumineuses obtenues pour chaque arbre fictif sont moyennées, permettant d'obtenir une énergie lumineuse moyenne pour chaque arbre réel. Ainsi, au début des deux premiers cycles de mesure, une énergie lumineuse, en GJ/an, est combinée avec l'accroissement en surface terrière de l'arbre correspondant (voir figure 7).

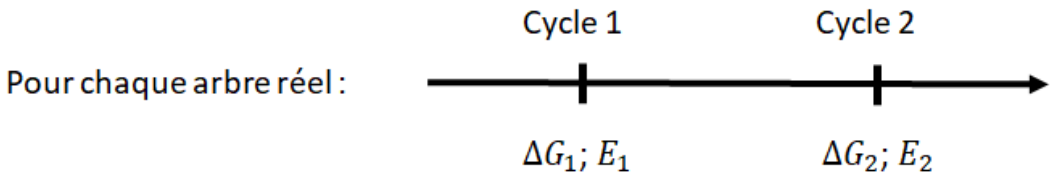


FIGURE 7 : Schéma récapitulatif de la préparation des données.
Un cycle correspond à un instant où les placettes sont mesurées. E correspond à l'énergie lumineuse, moyennée par arbre réel, $\triangle G$, à l'accroissement calculé sur la période, et ramené à l'année.

3.2.2 Méthode

Les données pour la calibration de cette équation proviennent de placettes permanentes, mesurées dans la région du marteloscope. Les mesures sont découpées en 9 zones, 7 d'entre elles ayant été remesurées 3 fois. Le travail s'est donc focalisé sur ces 7 zones, pour prendre en compte la variabilitié individuelle des arbres. Les dates de mesures n'étaient pas les mêmes selon les zones, le traitement de chacune d'entre elles a été réalisé séparément. La variabilité interannuelle qui en découle a été volontairement négligée. Les données étant nombreuses, il a été jugé plus pertinent d'utiliser seulement les placettes se situant sur la même station que le marteloscope calibré. Au total, le travail a été effectué pour 75 placettes, soit 891 arbres, pour chaque période. Parmi ces individus, 42 représentent des essences absentes du marteloscope (douglas et pins, fruitiers), ou sont présentes en trop faible quantité pour faire l'objet d'une étude (Frêne et Alisier blanc). Aussi, ces arbres ont été exclus de l'analyse. Avec 3 mesures de diamètre, un accroissement individuel peut être calculé sur les deux périodes, puis ramené à l'année. Chaque arbre a ainsi 2 accroissements moyens, en cm^2/an. Les accroissements négatifs ont été conservés, car il n'est pas possible de détecter l'erreur de mesure des arbres dont la croissance a été surestimée. Toutefois, ce type de données interdit toute transformation linéaire.

3.2.3 Détail de la construction des placettes SAMSARA2

Les placettes permanentes issues du réseau SIGFRA sont inventoriées à l'aide de deux types d'inventaires :

1. relascopique pour les tiges dont le diamètre est supérieur à 17.5 cm ;
2. en plein, autour d'un cercle au centre de la placette pour les tiges comprises entre 12.5 et 17.5 cm de diamètre.

SAMSARA fonctionne avec un inventaire en plein uniquement. La transformation d'un inventaire à l'autre a été réalisée en calculant les indicateurs de peuplements à l'hectare, puis en dupliquant les arbres réels jusqu'à parvenir à répliquer le peuplement échantillonné de la placette, à l'échelle d'un hectare (voir figure 8). Les variables indicatrices, nombre de tiges et surface terrière, ont été calculées par classe de diamètre et par essence. De même,

un peuplement objectif à l'hectare est calculé à partir des données de la placette. Ici, les indicateurs sont simplement multipliés par le ratio entre la surface inventoriée, et la surface à l'hectare. Dans un second temps, les arbres réels ont été dupliqués jusqu'à obtenir le nombre de tiges à l'hectare cible. Chaque arbre est tiré au sort parmi la classe de diamètre et l'essence correspondante. Le peuplement atteint en reproduisant des arbres réels, est ensuite vérifié graphiquement, par rapport au peuplement cible calculé. Les vérifications graphiques sont effectuées par année d'inventaire et par zone (voir exemple en annexe G). Les positions des arbres sont attribuées au hasard. Un formatage de fichier d'inventaire lu par SAMSARA est ensuite effectué automatiquement. Les calculs, transformations et vérifications ont été réalisées grâce au logiciel R.

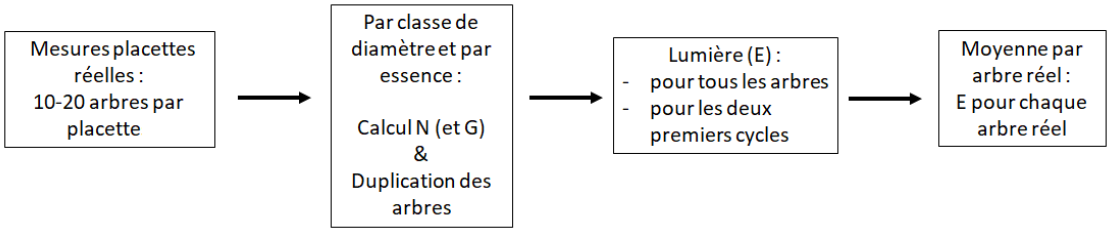


FIGURE 8 : Schéma récapitulatif de la préparation des placettes Samsara à partir du réseau de placettes permanentes.
N = nombre de tiges à l'hectare, G = Surface terrière à l'hectare, E = énergie lumineuse calculée par le modèle tous les 5 ans.

Le taillis est également inventorié, toutefois le calcul de l'accroissement de ces tiges pose problème : un nombre estimé de brins est renseigné, pour un diamètre moyen commun à toute la cépée. De plus, la distinction taillis/perches est effectuée à partir de 12.5 cm de diamètre, à la qualité. Un biais existe alors entre les essences qui seront qualifiées de perches et celles qui seront identifiées comme du taillis. De plus, le modèle ne permet pas de simuler la croissance d'un taillis, et simuler la croissance d'un taillis comme celle d'une perche comporte trop d'incertitudes. Ainsi, pour la construction des placettes permanentes, seules les perches ont été retenues, ce qui signifie que le taillis n'est ni pris en compte pendant la calibration, ni simulé.

Pour les deux premiers inventaires et pour chaque placette, le modèle est lancé automatiquement, et tourne pendant 5 ans. Cette opération est effectuée grâce à un fichier de commande (voir exemple en annexe F). L'année de début est propre à chaque zone et correspond à l'année où le premier inventaire a été effectué. L'énergie lumineuse de l'année de lancement est ensuite extraite des sorties des simulations du modèle. L'identifiant des arbres doit ainsi pouvoir être retrouvé entre l'inventaire en plein, l'évolution et la sortie du modèle. Pour cela, dans le script R de construction des placettes SAMSARA, un tableau de correspondance (identifiant SAMSARA et réel) est enregistré pour chaque placette. Un tableau de données est donc construit avec pour chaque arbre réel, un accroissement en surface terrière, et une lumière moyenne, pour la première et la deuxième période.

3.2.4 Résultats

Avec ces données (voir tableau 8), il n'a pas été possible d'ajuster un modèle non-linéaire avec effet mixte pour toutes les essences. L'ajustement du modèle avec les données pour le hêtre, le charme et le merisier, aussi bien avec la fonction *nlme*, que *nlmer*, des librairies nlme et lme4, renvoie un message d'erreur. Celui-ci a été interprété comme une trop grande variation dans les données. Les effets individuels du charme peuvent être visualisés en figure 9.

ID_vrai	deltaG	Essence	Group	DBH	Simulation	Lux	Periode
115_832_1	59.404661	Chêne S	Chêne	49.0	7	117413.20	1
115_832_10	-10.602875	Chêne S	Chêne	49.5	7	181378.43	1
115_832_11	6.211786	Chêne P	Chêne	43.0	7	96812.44	1
115_832_13	13.494568	Chêne S	Chêne	30.0	7	34825.70	1
115_832_14	25.775340	Chêne S	Chêne	34.0	7	53013.44	1
115_832_15	21.598450	Chêne P	Chêne	41.5	7	78715.18	1

TABLEAU 8 : Extrait du tableau de données construit et utilisé pour calibrer l'équation accroissement en fonction de la lumière.

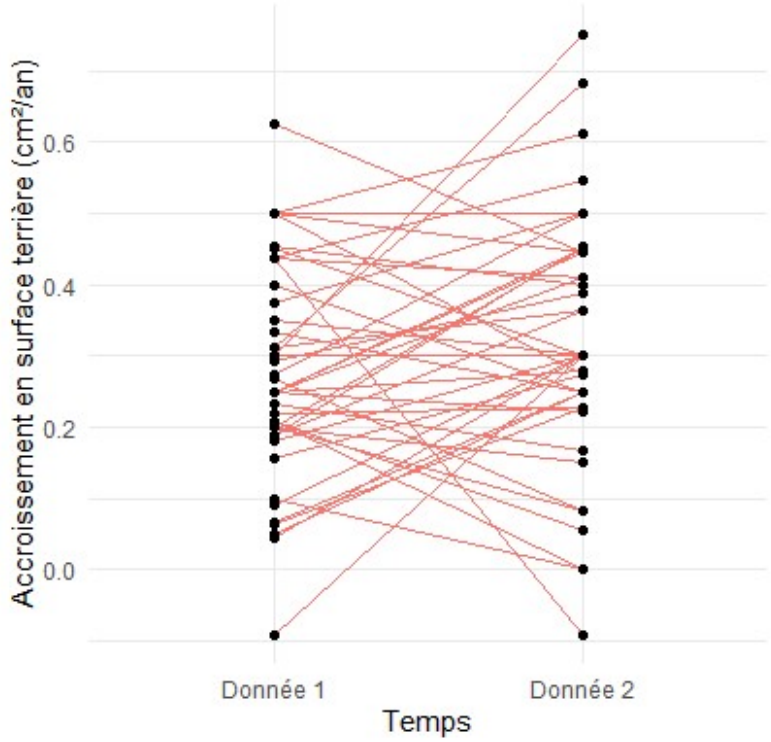


FIGURE 9 : Représentation des effets individuels des charmes issus du réseau de placettes permanentes.

Cette essence a été choisie car elle a un nombre d'individus suffisant, tout en permettant visuellement de suivre chaque individu. Elle appartient également au groupe pour lequel il est impossible d'ajuster un effet individuel.

Les paramètres de cette équation ont donc été ajustés sans effets individuels (voir tableau 9 et figure 10), grâce à la fonction *nls*. Ces résultats montrent une différence de croissance cohérente entre les essences. Les essences à forte croissance comme le hêtre ont une croissance, observée sur le terrain, plus importante que les essences à plus faible dynamique, comme le chêne ou l'alisier torminal, ce qui est retrouvé dans les prédictions réalisées par le modèle (voir figure 10).

Essence	a	log.a	b	Nombre.d'arbres
Alisier T	0.003551	-2.449	0.7801	42
Charme	1.255	0.0986	0.2383	90
Chêne	0.06972	-1.156	0.4817	830
Hêtre	1.146	0.05936	0.2795	612
Merisier	1.712	0.2336	0.2270	40
PionnierF	0.6341	-0.1978	0.3345	40
Erable C	0.1675	-0.7759	0.4374	44

TABLEAU 9 : Paramètres d'ajustement de l'allométrie accroissement en surface terrière ∼ lumière, présente dans le modèle SAMSARA2.

a et b correspondent aux paramètres de l'équation, voir 3.2.1. Le logarithme de a est calculé, c'est sous cette forme que ce paramètre est renseigné au modèle.

PionnierF = Érable sycomore et Tilleul, les essences ont été regroupées car elles ne sont pas présentes en un nombre suffisant pour être calibrées seules.

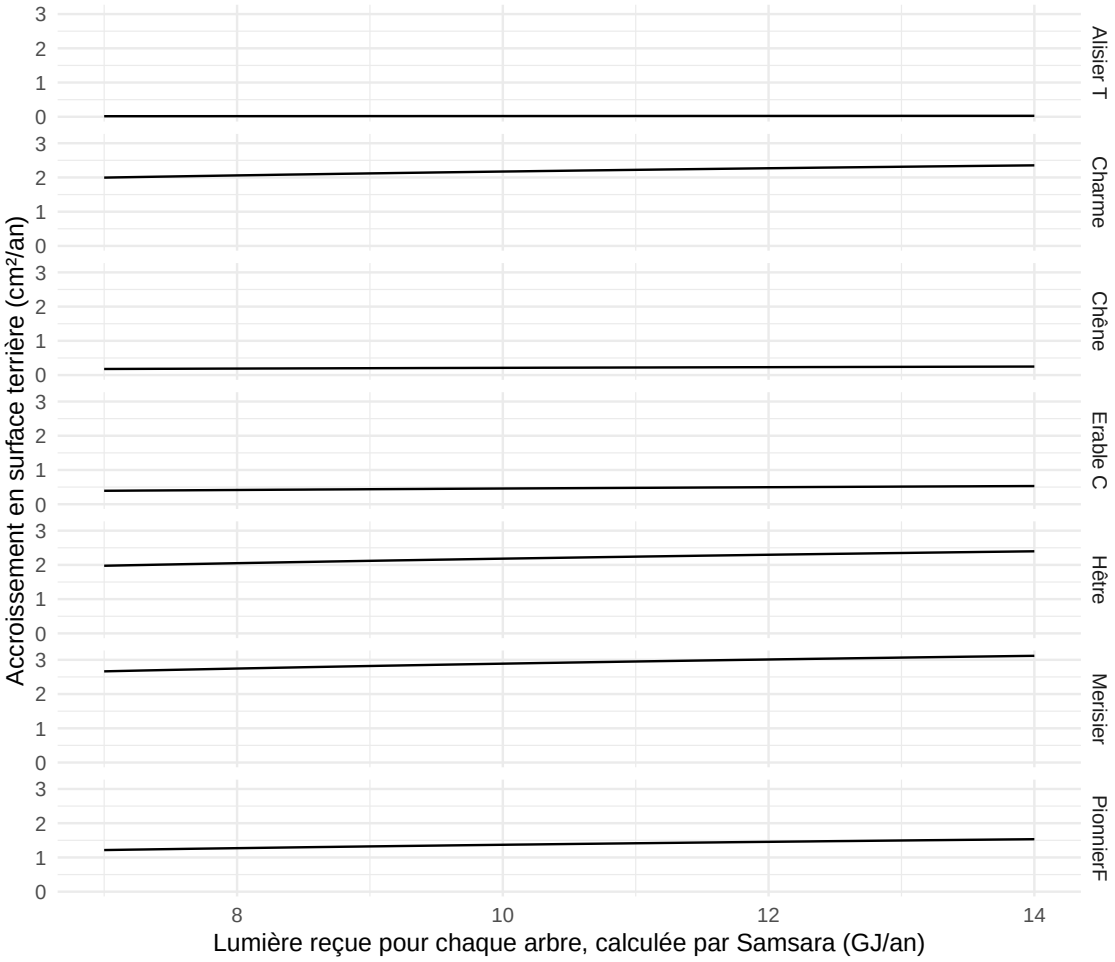


FIGURE 10 : Visualisation des prédictions en accroissement du modèle, des arbres issus du réseau de placettes permanentes, en fonction de la lumière calculée et des essences.
Les individus appartiennent à la station du marteloscope.

3.2.5 Discussions

Plusieurs raisons peuvent être invoquées pour expliquer les difficultés rencontrées lors de cette calibration. Premièrement, la forme du modèle a une grande influence sur les gros bois. Or, le jeu de données rend difficile l'ajustement des paramètres sur de telles tiges. En effet, cette catégorie est peu représentée en nombre, du fait de la structure des forêts (voir figure 11). De plus, le marteloscope possède un nombre de gros bois plus important que le reste du massif forestier, cf figure de présentation dans l'annexe C, à comparer avec la figure de répartition (voir figure 11). L'erreur liée à la calibration en est donc d'autant plus importante. Il est aussi nécessaire de mettre en avant l'importance de ces tiges dans le calcul de l'accroissement (en surface terrière ou volume) : pour un accroissement en diamètre donné, l'accroissement en surface terrière sera plus conséquent pour un arbre de diamètre 50 cm que pour un arbre avec un plus faible diamètre. Les incertitudes sur ces arbres ont donc une influence non négligeable lors de l'estimation de la croissance du peuplement composant le marteloscope.

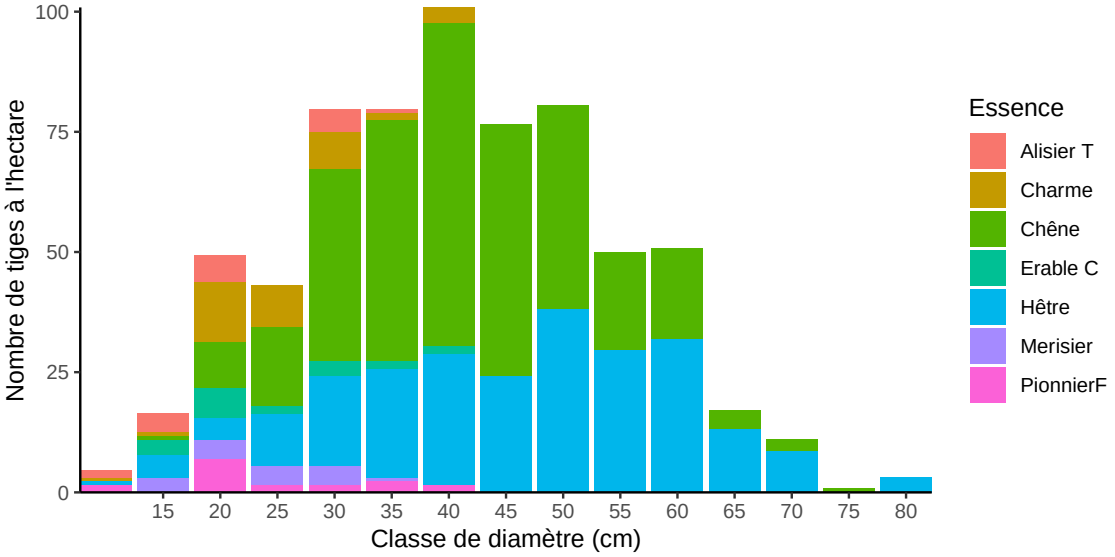


FIGURE 11 : Répartition du nombre de tiges à l'hectare, par classe de diamètre, des placettes permanentes du réseau SIGFRA, utilisées pour l'ajustement du modèle SAMSARA2. La répartition est celle des diamètres mesurés lors de la première campagne de mesure.

Deuxièmement, l'équation qui régit la croissance des arbres, à partir du calcul de lumière, peut être remise en cause. En effet, un tel modèle ne prévoit pas de plateau de saturation dans l'accroissement possible par les arbres,voir l'exemple du hêtre en figure 13. Il serait donc intéressant de tester une équation de la forme $\triangle G_{it} = a_{it} \cdot (1 - E^{-b_{it}}) \cdot \exp(\varepsilon_{it})$. Il pourrait être pertinent de tester une dimension historique : certaines essences, lorsqu'elles sont mises en lumière à l'âge adulte, par le sylviculteur ou par un autre événement, peuvent avoir un plus fort accroissement, c'est par exemple le cas du merisier. Toutefois, il est reconnu que certaines essences ont plutôt une tendance à réaliser des petites branches sur le fût, sans gagner en accroissement, c'est par exemple le cas du chêne. Lorsque la mise en lumière est trop importante et trop rapide, l'arbre peut même diminuer en accroissement. Enfin, si la durée de la phase de compression est trop importante, la perche, même mise en lumière, risque de ne pas transformer le surplus d'énergie lumineuse reçue en accroissement. Ce phénomène dépend des essences, le sapin étant connu pour supporter des durées de phase de compression importantes. Par ailleurs, il est possible que la structure même des données soit difficile à modéliser : les accroissements en diamètre mesurés ont la forme d'un nuage de point peu structuré, quelle que soit l'essence (figure 12).

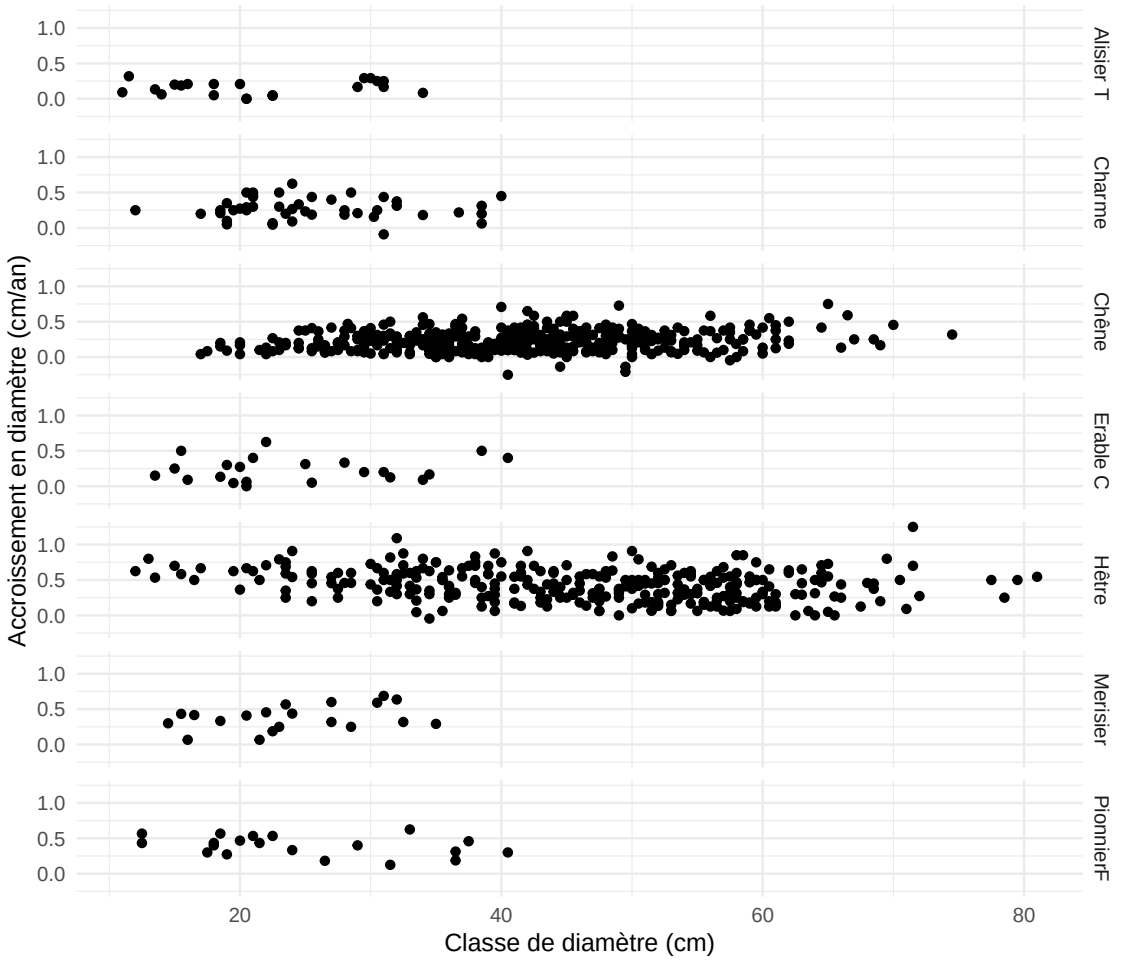


FIGURE 12 : Visualisation des accroissements en diamètre (durant la première période), des arbres issus du réseau de placettes permanentes, en fonction de leur diamètre initial et des essences.
Les individus appartiennent à la station du marteloscope.

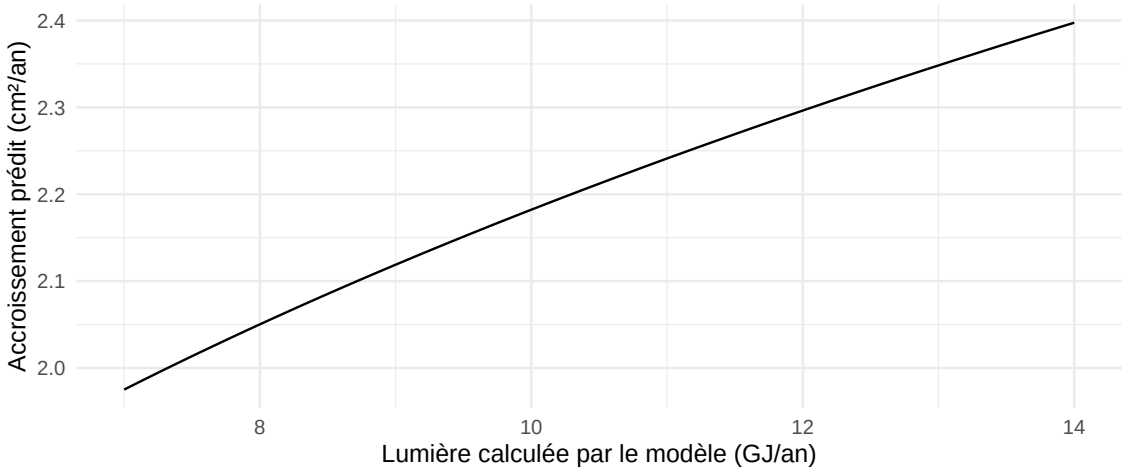


FIGURE 13 : Visualisation du modèle d'accroissement pour le hêtre

Enfin, la méthode en elle-même comporte des imprécisions :

1. la lumière n'a pas été calculée en conservant la position réelle des arbres dans l'espace. Pour mémoire, la position des arbres, n'ayant pas été relevée, a été attribuée aléatoirement. Par conséquent, pour certaines essences comme l'alisier torminal, un biais est créé. En effet, l'ajustement du modèle est réalisé avec une lumière reçue moyenne, distribuée aléatoirement suivant les arbres. Or, l'alisier torminal est en réalité très souvent détouré par les sylviculteurs. L'accroissement de cette essence est donc surestimé lors de la calibration. Un biais anthropique est ainsi observé. Une autre conséquence directe se dégage de cette méthode. Il est difficile de calculer les effets individuels de chaque arbre (voir 3.2.4). Il est possible que ce soit lié au moins en partie, au calcul de la lumière. En effet, l'arbre n'ayant pas conservé sa position fictive entre les deux périodes, il a deux environnements et donc deux quantités de lumière fictive reçue. Il est difficile de conserver ce même environnement car la croissance simulée par samsara jusqu'à la deuxième période, amènera difficilement les arbres a être à leur diamètre réel, mesuré à cette date. Pour réduire cette erreur, il aurait été possible de conserver la position des arbres ayant été mesurés sur les deux périodes, mais leur environnement n'aurait toujours pas correspondu à la réalité, et certains arbres auraient quand même eu une place aléatoire entre les deux périodes (recrus, morts, oubliés).
2. certains accroissements sont négatifs. Or, un arbre ne peut pas physiquement « maigrir ». Ces accroissements négatifs mettent en exergue les erreurs de mesures. Celles-ci ne peuvent pas être corrigées car si l'erreur est observée dans ce sens, il y a, de même, des accroissements surestimés. Ils ne sont en revanche pas quantifiables.

3.3 Estimation des paramètres sans étude statistique

3.3.1 La régénération

Plusieurs paramètres permettent de calibrer la régénération dans SAMSARA2. Toutefois, ces paramètres sont communs à toutes les classes de semis. Il est apparu que le modèle ne permet pas de simuler le décrochement du nombre de semis dans les petites classes de hauteur : lorsque l'initialisation est réalisée avec des valeurs vraisemblables, un pic de recrus apparait après 30 ans de simulation. Or, si la mortalité est augmentée, elle ne sera plus vraisemblable pour les classes de semis supérieures, qui est plus faible. Ainsi, le nombre de semis, à l'initialisation et par la suite généré par le modèle, est en dessous de la réalité, mais permet avec des paramètres de mortalité adaptée, de simuler un nombre de recrus réaliste. Comme l'objectif du marteloscope n'est pas de se focaliser sur les travaux forestiers, cette méthode ne présente pas de conséquences directes pour l'utilisateur. Pour cette étude, les paramètres d'ajustement de la création et de la mortalité des semis ont été trouvés par essais/erreurs.

3.3.2 La qualité

Le modèle attribue une qualité aux arbres qui sont recrutés, en fonction de proportions définies par l'utilisateur. Une fois cette qualité attribuée, elle reste la même tout au long de la durée de vie de l'arbre. Les résultats produits pour initialiser la qualité ont été repris (voir partie 2.4, tableau4). La catégorie T est une classe de qualité qui n'existe pas dans la base de données ou dans les relevés de qualités du marteloscope, seulement dans le modèle. Par soucis de cohérence, la probabilité qu'un arbre recruté ait une qualité T, a été volontairement mise à 0.

4 Lien entre le marteloscope, la sylviculture et le modèle

Les objectifs de ce travail sont de visualiser dans un rapport formalisé et automatisé, en plus des informations déjà analysées jusqu'à présent via le tableur, les effets directs de la coupe virtuelle après une évolution du peuplement de 10 ans (comparaison de l'état avant la coupe fictive, et du peuplement avant la deuxième coupe simulée). De plus, l'algorithme multi-critères doit être capable de reprendre les idées générales d'un sylviculteur, de manière à simuler des coupes. Ainsi, la visualisation des impacts d'une sylviculture sur le long terme (50 ans) est rendue possible. Enfin, des variables explicatives calculées grâce au modèle peuvent être ajoutées.

4.1 Démarche

L'objectif, qui a été atteint, était de réaliser une chaine de traitement entre les données récoltées auprès du marteleur, et le rapport d'analyse, en passant par le modèle Samsara (voir figure 14).

FIGURE 14 : Schéma de la chaine de traitement entre les informations données par le marteleur et le rapport d'analyse.
LaTeXest un langage qui permet de gérer automatiquement la mise en forme de rapports. Il existe des types de fichiers, Sweave par exemple, qui lisent à la fois du code (permettant de générer les figures, et LaTeX.

Le marteleur doit remplir 2 fichiers concernant : le martelage et sa sylviculture sur le long terme. Le premier inventorie les arbres martelés, favorisés et les raisons identifiées au prélèvement d'un arbre. Le second permet de qualifier la sylviculture de chaque marteleur en fonction de 3 grandes catégories d'arbres : arbres cibles écologiquement, économiquement et ceux à marteler (détails partie 1.2.2). Le second classeur n'est pas lu directement par Samsara. L'animateur se charge de renseigner ces informations dans un fichier texte, qui permet de lancer les simulations du modèle. Le modèle est lancé et simule une évolution du peuplement et la sylviculture choisie. Samsara produit alors des fichiers textes, lus par l'intermédiaire de scripts r. Ces fichiers contiennent toutes les informations dendrométriques des arbres, de l'année d'initialisation, jusqu'à la fin de la simulation. Les mêmes scripts génèrent ensuite un rapport pdf, regroupant à la fois les informations par groupe de marteleur, et celles des arbres du marteloscope, aux années souhaitées.

4.2 Méthode

Actuellement, l'analyse se fait grâce à un tableur. Chaque équipe présente reportant les arbres choisis dans un fichier spécifique. L'idée est de changer le moins possible les habitudes. Ce fichier de saisie reste donc le même. De même, les tableaux et graphiques d'analyse du martelage ont été dans leur très large majorité, repris de ceux construits grâce au tableur. Par ailleurs, pour illustrer la dynamique du peuplement grâce au modèle lors d'une journée au marteloscope, les besoins sont différents. De plus, les graphiques proposés

par la plateforme Capsis ne sont actuellement pas directement exploitables pour l'analyse d'un martelage. Ainsi, le choix de l'outil s'est imposé : R (via un markdown ou un sweave) est capable de lire des fichiers issus de tableurs, d'écrire tableaux et graphiques et de lancer Capsis, et ce, dans un temps raisonnable. Le choix de l'utilisation d'un fichier Sweave plutôt qu'un Markdown a été réalisé car je possède un nombre d'exemples de rapport de ce type plus important, mais aussi car la compilation d'un fichier pdf est légèrement plus rapide. De plus, le rapport n'a pas vocation à être modifié, l'utilisation du format pdf est donc justifiée.

La majorité des fonctions utilisées pour la construction des figures sont ggplot et grid.arrange. La manipulation des fichiers et des données est principalement effectuée à l'aide des fonctions contenues dans les librairies dplyr et tidyr. Les tableaux sont générés en utilisant le langage LaTeX(fonction kable).

4.3 Résultats et discussions

Un rapport (voir annexe C), est effectivement produit à partir de plusieurs documents :

1. un tableur contenant la liste des arbres martelés ;
2. un fichier texte de lancement du modèle ;
3. les fichiers textes d'initialisation de la placette du modèle correspondant au martelo-scope (qui ne nécessitent pas de modifications).

Toutefois, le code actuel du rapport ne permet pas de lancer Capsis directement. L'animateur doit rentrer un chemin d'accès et une ligne de code depuis un invite de commande. De plus, la création d'un pdf est bien automatisée mais elle nécessite, par exemple, d'ouvrir RStudio et d'appuyer sur « Compiler » plusieurs fois. En effet, pour faciliter la manipulation et structurer le code, le code du rapport est séparé dans quelques sous-fichiers. Une notice explicative a été produite, de manière à faciliter l'utilisation des fichiers mais aussi leur manipulation (voir annexe E). Elle contient ainsi un mode d'emploi illustré et une brève explication de la construction du rapport et les conséquences directes induites sur les fichiers ou les lignes de codes.

En parallèle, le modèle et l'algorithme multi-critères répondent aux attentes, notamment en permettant d'illustrer pédagogiquement des scénarios contrastés dans le temps (voir figure 15). Des graphiques et tableaux de comparaison sont également générés et autorisent une analyse fine du martelage terrain. De plus, une comparaison avec les marteleurs présents le même jour est également accessible sur l'effet immédiat de la coupe (voir les tableaux 7 et 8 de l'annexe C), mais aussi sur le peuplement 10 ans après, voir partie « *Comparaison du peuplement : avant les deux premières coupes* ». La sylviculture plus globale de chacun est à renseigner et est ensuite étudiée à un horizon de 50 ans, sur des questions dendrométriques, écologiques et économiques (voir annexe C, partie « *Évolution du peuplement géré pendant 50 ans* ». Des indicateurs inédits ont également été introduits. Soit ils proviennent d'une amélioration liée à l'utilisation du modèle, comme par exemple la visualisation de l'apport de lumière au sol suite à un martelage (voir figure N de l'annexe C). Soit les nouvelles variables ont été ajoutées suite à la réflexion menée, par exemple, les arbres favorisés sont relevés, puis analysés voir tableaux 9 et 10 de l'annexe C. Enfin, la visualisation de certains indicateurs a été optimisée, par exemple les raisons de martelage sont affichés sous forme d'un nuage de mots, voir annexe C.

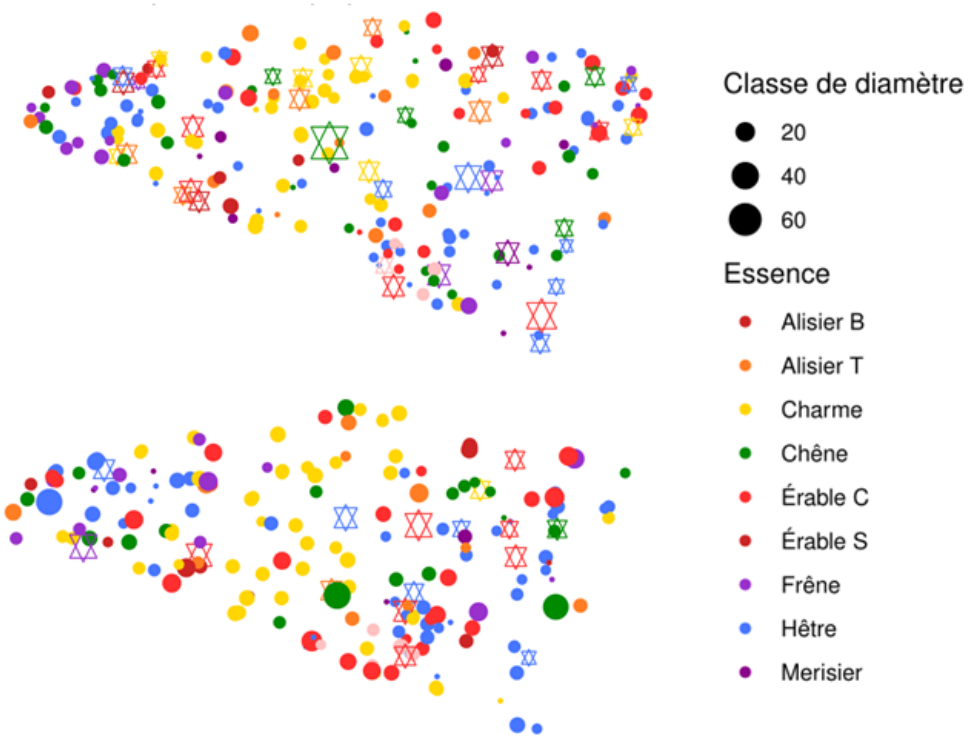


FIGURE 15 : Représentation du peuplement après 50 ans d'évolution.
Les étoiles représentes les arbres porteurs de dendromicrohabitats. La première carte correspond à une sylviculture plus écologique, tandis que la deuxième permet de visualiser le peuplement issu d'une gestion plus productiviste. Les cartes sont issues du rapport automatique codé au cours de ce travail.

En résumé, la procédure est la suivante : chaque marteleur note les arbres martelés, les raisons de ce choix et les arbres favorisés. Ces informations sont ensuite retransmises par l'animateur du marteloscope dans un fichier csv formaté à cet effet. Puis, les marteleurs qualifient leur sylviculture selon l'algorithme multi-critères. De même, une fiche terrain de relevés est prévue, les informations sont retranscrites par l'animateur dans le fichier de commande. Avoir recours à un animateur pour ces phases de transcription permet d'éviter les erreurs d'inattention et de gagner en fluidité pour les marteleurs. L'animateur lance alors le modèle, et récupère 2 fichiers créés, utilisés par la suite pour générer le rapport automatique, en appuyant sur « Compiler » dans Rstudio. Un rapport, sous format pdf est alors généré, pour le marteleur concerné : il suffit de changer le numéro de marteleur dans un tableur pour générer le rapport d'un autre marteleur. La démarche est détaillée dans le guide d'utilisation (voir annexe E), rédigée en premier lieu à l'attention des animateurs, de manière à ce qu'ils puissent utiliser les outils mis en place aisément mais aussi réaliser quelques modifications. Cette démarche peut être modifiée selon l'évolution des outils et le temps disponible. Par exemple, il est possible de visualiser les critères renseignés à l'algorithme multi-critères sous Capsis (en version intéractive) (voir figure 16). Le marteleur gagne par exemple en transparence entre ce qu'il imagine et les arbres réellement choisis.

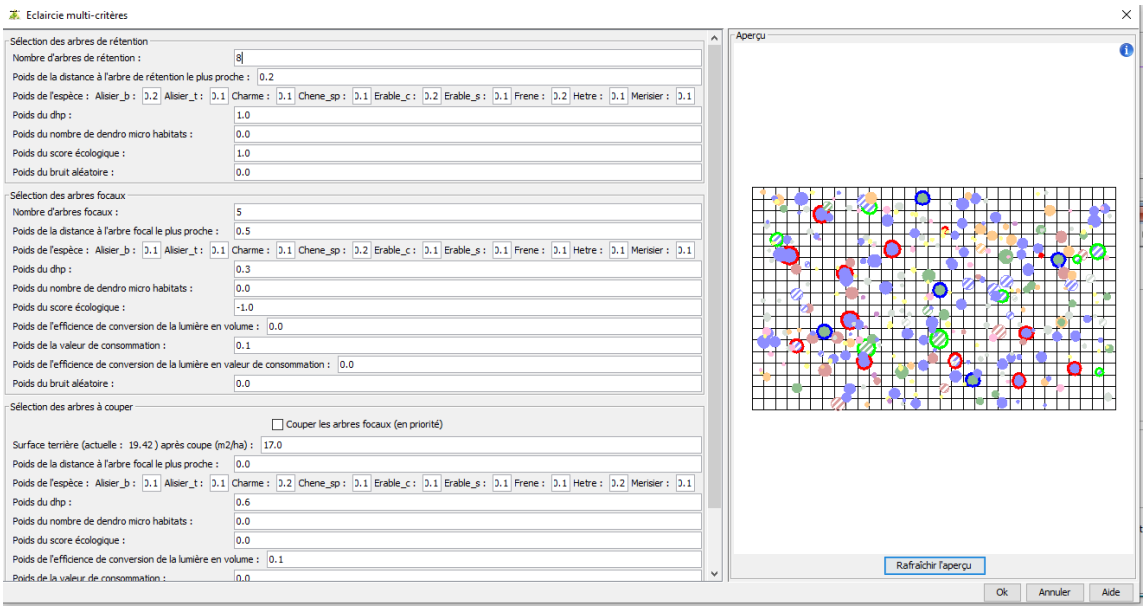


FIGURE 16 : Représentation des arbres choisis par l'algorithme multi-critères.
Les arbres cerclés de vert, bleu et rouge correspondent respectivement aux arbres de rétention, cibles et martelés.

5 Discussions et perspectives

5.1 Résolution des points techniques

Cette partie vise à faire le point sur la levée des verrous scientifiques lors de ce stage.

5.1.1 Simulation du peuplement

L'initialisation, c'est à dire la transformation des informations réelles en informations standardisées pour simuler le peuplement a pu être réalisée, notamment en complétant les informations de la régénération par un nouvel inventaire mais surtout en réalisant une parcelle rectangulaire, tout en prenant en compte les arbres réels seulement. Toutefois, la méthode utilisée comporte des limites en ce qui concerne la correspondance des dendromicrohabitats, une partie de la qualité et la régénération, en lien avec la calibration. Cette dernière vise à renseigner les paramètres des équations régissant le modèle. C'est la partie qui a été le moins aboutie par manque de :

- données, par exemple pour calibrer l'allométrie entre les bases de houppiers ou encore pour renseigner la position des arbres dans le calcul de la lumière ;
- robustesse de l'ajustement du modèle par rapport aux données : la grande variabilité de croissance entre les individus ne peut seulement être expliquée par des différences d'interception de la lumière ;
- données adaptées à la méthode, par exemple en attribuant des positions différentes aux arbres pour les deux périodes.

Indépendamment du travail réalisé, certains points du modèle semblent être un frein à la manipulation voire à la pertinence des outils : la gestion de la régénération ou encore de la qualité des arbres peuvent être cités.

Par ailleurs, à la fin du travail, la simulation de la dynamique du peuplement permet d'atteindre des ordres de grandeur pertinents en matière de croissance forestière et de régénération. La gestion de la qualité et des dendromicrohabitats autorisent également la réalisation de comparaisons entre les différents choix sylvicoles des marteleurs.

5.1.2 Simulation de la sylviculture pratiquée

L'outil permettant de simuler la sylviculture irrégulière, utilisé au cours de ce stage est l'algorithme multi-critères. Il a fait l'objet d'une première modification, permettant de choisir à la fois des arbres à visée économique, et écologique. D'autres améliorations sont prévues (voir 5.2.4). Toutefois, les discussions avec les experts forestiers, permettant d'identifier si la robustesse de l'outil à simuler correctement une sylviculture, sont à prévoir pour évaluer la performance de ces outils.

5.1.3 Lien entre les simulations et la journée au marteloscope

Les divers fichiers permettent de lancer les simulations du modèle et d'obtenir un rapport d'analyse rapidement. Toutefois, ces manipulations nécessitent, de la part de l'animateur du marteloscope, un certain degré de compréhension des outils. Les opérations à réaliser, ainsi que les potentielles erreurs ont été réduites. Un document (voir annexe E) récapitulant la démarche et donc la structure des fichiers et du code du rapport, ainsi qu'une notice d'utilisation ont également été produits de manière à faciliter la transmission de ce travail, qui a vocation à être poursuivi. En effet, il est envisageable par la suite d'approfondir le travail de simplification en utilisant des outils comme développer un Shiny[2], de manière à éviter des erreurs de saisie, et à minimiser la manipulation de fichiers peu familiers à l'animateur. L'objectif à terme étant que chaque participant à la journée puisse être autonome avec sa tablette. Ce travail informatique ne nécessiterait pas de compétences forestières et serait effectué grâce aux financements de ce projet « AmphiForêt », soutenu par Agreenium et le MAA (DGER).

5.2 Potentiel des outils

5.2.1 Réduction des manipulations

Il est prévu de rendre plus agréable à un opérateur l'initialisation et la calibration du marteloscope. Premièrement, les transformations réalisées de manière à avoir un modèle fonctionnel (donc une parcelle rectangulaire) devraient être intégrées à l'intérieur du modèle, c'est à dire, être rendues invisibles aux yeux de l'utilisateur. Par ailleurs, une estimation des paramètres du modèle pour toutes les essences (à partir des données de l'IGN) est en cours. Il y aurait donc une base disponible de paramètres, fournissant un ordre de grandeur, qui devrait suffire à utiliser le modèle à des fins pédagogiques. L'utilisateur n'aurait donc plus de calibration à réaliser, ou alors de simples ajustements par méthode d'essais, erreurs.

5.2.2 Explorer le potentiel des outils

L'outil a actuellement des possibilités encore inexploitées. Parmi elles, la simulation de la sylviculture est prévue d'être renseignée une seule fois. Il est possible avec l'algorithme de qualifier plusieurs sylvicultures, pour une même personne. En outre, des études ont été menées autour du biais sociologique existant lors d'un martelage, (Bravo-Oviedo et al., 2020; Spinelli et al., 2016; Vítková et al., 2016). Les données concernant la qualification de la sylviculture par chaque opérateur pourraient être utilisées et analysées afin de poursuivre ces investigations.

[2]Un Shiny est un package R qui permet de faciliter la manipulation des codes, par exemple en changeant de manière intéractive et sans rentrer dans les fichiers r, des paramètres choisis.

5.2.3 Pistes d'amélioration de l'analyse post-martelage

Dans un contexte où les préoccupations envers les essences qui pourront le mieux réagir face au changement climatique, sont en constante augmentation, jusqu'à jouer un rôle majeur dans certaines zones géographiques, il est apparu pertinent de construire un indice « changement climatique », en plus du critère biodiversité et du critère production.
L'objectif est de mesurer la diversification des essences pertinentes face au changement climatique, qui sont présentes sur le marteloscope. L'indice climat pourrait être construit comme suit. Trois groupes d'essences pourront être identifiées selon un gradient de résistance estimé par des experts, face au changement climatique : les essences considérées comme peu résistantes (ex. épicéa de plaine), celles dont l'avenir est incertain (ex. le chêne sessile), celles qui pourraient avoir de l'avenir (ex. certains érables). Un poids est ensuite attribué à chacun de ces groupes, puis multiplié au nombre d'arbres de l'essence considérée, qui, en sommant ces scores, donnerait l'indice. Par exemple, plus le poids est important, plus le groupe a des chances de résistance face au changement climatique, donc plus le martelage favoriserait la résilience du peuplement, plus l'indice serait élevé. Celui-ci pourrait ensuite être analysé dans le rapport automatique et mis en parallèle de l'indice biodiversité par exemple. L'hypothèse peut être faite que les arbres porteurs de dendromicrohabitats appartiennent à des essences faiblement résistantes au changement climatique. Ce nouvel indice permettrait donc de vérifier qu'un sylviculteur qui cherche à améliorer la résilience de sa forêt le fait effectivement dans les faits, et pourrait également faire ressortir un compromis à trouver entre résilience de la strate arborée, et biodiversité.

Une autre limite intrinsèque au marteloscope est celle lié à l'échelle : tous les problèmes rencontrés au niveau du peuplement ne peuvent être abordés. Parmi eux, peuvent être cités : les enjeux paysagers qui préoccupent de plus en plus les citoyens, la construction des dessertes, ainsi qu'une partie des enjeux écologiques qui sont de plus en plus tournés vers la connectivité, tandis que les indices plus classiques restent difficiles à appréhender. Par exemple, les préconisations pour les arbres à conserver pour la biodiversité sont données à l'hectare et dépendent fortement du type de forêt. L'idée pourrait être d'utiliser des couches SIG (par exemple celles des peuplements de l'IGN) afin d'initialiser un modèle, moins précis, mais qui permet de visualiser ces enjeux.

5.2.4 Pistes d'amélioration de l'algorithme multi-critères

Dans le but d'améliorer la simulation de la sylviculture, plusieurs modifications peuvent être développées :

1. un indicateur « régénération » ;
   Certains sylviculteurs, au moment de décider si tel arbre sera martelé, peuvent prendre en compte la régénération. Schématiquement, il est inutile de prélever un arbre pour amener de la lumière à des semis, qui sont absents. Inversement, un sylviculteur souhaitera déclencher la régénération autour d'un arbre mûr, en prélevant du taillis dans un premier temps, puis le semencier à la coupe suivante. Un tel indice peut être calculé en comptant le nombre de semis dans un rayon de 5 mètres autour de l'arbre, ou encore dans un rayon correspondant à celui de son houppier, et en multipliant par un poids attribué à chaque essence (les semis de chênes importent plus que ceux de hêtre). L'indice de chaque arbre est obtenu en sommant les sous-totaux estimés par essence.

2. un nouvel indicateur économique ;
   Actuellement, et contrairement aux tableurs classiques d'analyse, seule la valeur d'un arbre à un instant donné est calculée dans le modèle. Toutefois, l'accroissement des arbres en valeur diffère. Un arbre avec une forte valeur mais un gain faible, est à marteler, si le seul critère économique est pris en compte. Inversement, certains arbres

à faible diamètre ont une valeur à un instant donné faible, mais auront une forte valeur dans le futur. Ces arbres-là sont au contraire à conserver. D'après Association Futaie Irrégulière (2009), la valeur potentielle s'écrit $Vp = \frac{Gain}{\theta}$, avec $Gain = Prix \cdot \frac{\triangle D}{\triangle t} \cdot (\frac{\triangle PU}{PU} + \frac{\triangle V}{V}) / \triangle D$ *PU = Prix Unitaire, V = Volume, θ = Taux d'actualisation*

3. une surface terrière cible multiple ;
   Il est actuellement possible de modéliser une sylviculture qui atteint une surface terrière cible (Gc). Pour le faire en plusieurs fois, il faut renseigner des sylvicultures différentes au modèle. En lançant Samsara depuis le fichier de commande, l'utilisateur réalise alors des copié-collés des paramètres renseignés, en modifiant Gc uniquement. Puis, les interventions souhaitées sont inscrites à des dates différentes.
   Deux solutions peuvent simplifier cette démarche, en ajoutant un critère à l'algorithme multi-critères. Soit Gc correspond au maximum entre un pourcentage de la surface terrière avant coupe et Gc. Le pourcentage gérant l'intensité de coupe est donc choisi par l'utilisateur. Soit l'utilisateur renseigne une importance d'atteindre la surface terrière cible. Par exemple, il choisit 1,2 ou 3. Valeur traduite ensuite par l'algorithme en : Gc est atteinte à la première, deuxième ou troisième intervention sylvicole. Pour les années intermédiaires, donc sans Gc renseignée, l'intensité de coupe peut être calculée en choisissant de conserver 75 % du peuplement, soit 75 % de la surface terrière avant coupe. Le pourcentage de surface terrière est alors intégré au modèle.

4. un nouveau seuil pour les calculs à l'hectare ;
   Actuellement, dans Samsara, le seuil de recrutement est également le seuil qui est utilisé pour calculer les indicateurs. Or, pour le marteloscope, les tiges ayant un diamètre supérieur à 12,5 cm sont proposées à la coupe. De fait, ces tiges sont également prises en compte dans les calculs, comme par exemple ceux de la surface terrière à l'hectare. Il n'est pas possible de proposer à la fois ces tiges au martelage pendant la simulation, tout en ayant les sorties du modèle calculées à partir de 17,5 cm de diamètre. Pour des questions de visibilité lors des formations, il a été jugé judicieux de modifier le modèle de manière à calculer les variables à partir du seuil largement utilisé couramment (17,5 cm de diamètre).

5. développement du score écologique en cours.
   Actuellement, deux critères écologiques peuvent être utilisés : le nombre de dendromicrohabitats ainsi que le score écologique. Le premier comporte un biais évident : tous les habitats n'ont pas la même valeur écologique. Le second critère est actuellement en cours de développement. Il s'agit de calculer une note, pour chaque arbre, grâce à un système de points. Les critères sont les suivants :

   - la *vitesse de reconstitution* du type de dendromicrohabitat :
   - la *densité du type dans les forêts gérées*, l'objectif étant de donner du poids aux habitats rares en forêt gérée ;
   - la *densité relative par rapport à la fréquence dans les forêts subnaturelles*, l'objectif étant de donner plus de poids aux habitats sous-abondants localement ou au contraire de diminuer l'importance d'un type surabondant ponctuellement ;
   - la *taille ou l'abondance*, l'objectif étant de donner plus de poids à un arbre portant un type de dendromicrohabitat de grande taille ou de donner de l'importance à un arbre ayant plusieurs fois le même type d'habitat.

5.3 Reproductibilité de la démarche sur d'autres marteloscopes

La première étape à franchir si une personne souhaite coupler SAMSARA2 avec un marteloscope, est celle de la compréhension et la manipulation des fichiers. Ils sont organisés en fichiers textes, mais pour des raisons de visualisation des colonnes, il est nécessaire d'ouvrir les fichiers à l'aide d'un tableur. Une notice disponible à l'attention des utilisateurs faciliterait l'appropriation du modèle, en particulier pour avoir les unités des variables ou le détail des formules de celles calculées.

L'initialisation devrait être reproductible, mais de même, les difficultés de correspondance des dendromicrohabitats devraient apparaître. Si la personne chargée de la tâche ne

connait pas le fonctionnement de SAMSARA2, elle risque aussi d'avoir la simulation et les sorties faussées car le modèle ne renvoie pas de message d'erreur lorsque la parcelle n'est pas rectangulaire et considère que les endroits sans arbres sont des trouées. La réplication des arbres et semis nécessite une certaine connaissance des outils. Toutefois, la gestion de la périphérie devrait être intégrée au modèle, permettant de rendre cette étape transparente à l'utilisateur.

La reproduction du processus de calibration à l'identique est peu plausible. D'une part, les résultats obtenus grâce à cette méthode ne sont pas probants. D'autre part, les données utilisées sont particulières à cette zone. Toutefois, un travail en cours devrait permettre de trouver des paramètres propres à chaque essence, à l'échelle de la France. Il serait alors plus aisé de s'appuyer sur ces données, qui devraient fournir des premiers paramètres, probablement suffisants pour une utilisation à but pédagogique.

Enfin, la structure interne de SAMSARA permet maintenant de renseigner les arbres réels, quel que soit le marteloscope. De même, les indicateurs de suivi du martelage prévus dans le modèle, puis traités sous forme de rapport automatique ont pour vocation d'être utilisables pour tout type de marteloscope.

Ainsi, les principaux freins à la reproductibilité d'une telle démarche se situent au niveau des connaissances dans le modèle de la personne chargée du couplage (et du temps nécessaire à les acquérir), la réplication des arbres pour faire une parcelle fictive rectangulaire, et la régénération (gestion des paramètres et initialisation).

6 Conclusion

Ainsi ce travail a permis de réaliser un premier couplage d'un marteloscope avec le modèle SAMSARA2, simulant à la fois un peuplement et des sylvicultures, tout en autorisant une projection sur le moyen et long terme. De surcroit, de nouveaux indicateurs de gestion, concernant la lumière, permettent d'ouvrir des discussions inédites lors de l'analyse du martelage fictif.

L'outil, liant le modèle à la réalité de terrain en produisant un rapport automatique, nécessite une légère compréhension de l'informatique de la part de l'animateur du marteloscope, mais les manipulations à réaliser sont simples et rapides. Il permet de rendre disponible les résultats pertinents apportés par le modèle. Par exemple, pour un sylviculteur, visualiser son peuplement sur 50 ans permet d'améliorer l'analyse des choix sylvicoles. En effet, la gestion forestière se conçoit sur le long terme, l'ordre de grandeur des itinéraires sylvicoles étant la centaine d'années. Pour des néophytes, cette analyse visuelle permet de les projeter dans le temps long forestier et ainsi d'illustrer les problématiques des gestionnaires, souvent méconnues du grand public.

La reproductibilité de cette démarche à grande échelle est à l'heure actuelle délicate car la transformation des inventaires en fichiers lisibles pour le modèle et l'ajustement des allométries aux essences locales est chronophage. Toutefois, des améliorations ont été réalisées, sont prévues et à prévoir, et ce, concernant tous les aspects du modèle et des outils. À la suite de cette étude, il est donc possible d'entrevoir à court terme une généralisation du couplage de Samsara avec des marteloscopes, et ce, d'autant plus qu'il est déjà prévu de continuer ce travail.

Références

Association Futaie Irrégulière, A.
2009. *Le traitement des forêts irrégulière. Valoriser les fonctions multiples de la forêt.* Broché.

Bravo-Oviedo, A., M. Marchi, D. Travaglini, F. Pelleri, M. C. Manetti, P. Corona, F. Cruz, F. Bravo, and S. Nocentini
2020. Adoption of new silvicultural methods in mediterranean forests : the influence of educational background and sociodemographic factors on marker decisions. *Annals of Forest Science*, 77(2).

Cimon-Morin, J., J.-C. Ruel, M. Darveau, J.-M. Lussier, P. Meek, and V. Roy
2010. Essais de jardinage sans martelage dans des peuplements irréguliers de sapin baumier et d'épinette noire. *The Forestry Chronicle*, 86(4) :498–510.

Cosyns, H., D. Kraus, F. Krumm, T. Schulz, and P. Pyttel
2019. Reconciling the tradeoff between economic and ecological objectives in habitat-tree selection : a comparison between students, foresters, and forestry trainers. *Forest Science*, 65(2) :223–234.

Courbaud, B.
2004. Intérêt des modèles pour lingénierie écologique : exemples à partir du modèle de dynamique des peuplements forestiers samsara. *Ingénieries n spécial Ingénierie écologique*, Pp. 49–56.

Courbaud, B., F. De Coligny, and T. Cordonnier
2003. Simulating radiation distribution in a heterogeneous norway spruce forest on a slope. *Agricultural and Forest Meteorology*, 116(1-2) :1–18.

Courbaud, B., V. Lafond, G. Lagarrigues, G. Vieilledent, T. Cordonnier, F. Jabot, and F. De Coligny
2015. Applying ecological model evaludation : Lessons learned with the forest dynamics model samsara2. *Ecological Modelling*, 314 :1–14.

de TURCKHEIM, B. and M. Bruciamacchie
2005. *La futaie irrégulière : théorie et pratique de la sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature.* Edisud Saint-Remy-de-Provence.

Dufour-Kowalski, S., B. Courbaud, P. Dreyfus, C. Meredieu, and F. De Coligny
2012. Capsis : an open software framework and community for forest growth modelling. *Annals of forest science*, 69(2) :221–233.

Gauch, H. G., J. G. Hwang, and G. W. Fick
2003. Model evaluation by comparison of model-based predictions and measured values. *Agronomy Journal*, 95(6) :1442–1446.

Gauquelin, X., B. Courbaud, J. FAY, F. BERGER, and E. MERMIN
2008. Conduite de peuplements mélangés en forêts de montagne : exemple d'une collaboration chercheurs-gestionnaires. *Revue Forestière Française.*

Gineste, M.
2010. Martéloscope : dé'veloppement d'une interface pédagogique pour un public non spécialisé. Mémoire de fin d'études.

Kraus, D., A. Schuck, F. Krumm, R. Bütler Sauvain, H. Cosyns, B. Courbaud, L. Larrieu, U. Mergner, P. Pyttel, S. Varis, et al.
2018. Seeing is building better understanding-the integrate+ marteloscopes. Technical report, Integrate+ Technical Paper.

Lafond, V., T. Cordonnier, F. De Coligny, and B. Courbaud
2012. Reconstructing harvesting diameter distribution from aggregate data. *Annals of forest science*, 69(2) :235–243.

Lafond, V., G. Lagarrigues, T. Cordonnier, and B. Courbaud
2014. Uneven-aged management options to promote forest resilience for climate change adaptation : effects of group selection and harvesting intensity. *Annals of forest science*, 71(2) :173–186.

Larrieu, L., Y. Paillet, S. Winter, R. Bütler, D. Kraus, F. Krumm, T. Lachat, A. K. Michel, B. Regnery, and K. Vandekerkhove
2018. Tree related microhabitats in temperate and mediterranean european forests : A hierarchical typology for inventory standardization. *Ecological Indicators*, 84 :194–207.

Meredieu, C., P. Dreyfus, V. Cucchi, L. Saint-André, S. Perret, C. Deleuze, J.-F. Dhote, and F. De Coligny
2009. Utilisation du logiciel capsis pour la gestion forestière. *Forêt Entreprise*, (186) :32–36.

Soucy, M., H. G. Adégbidi, R. Spinelli, and M. Béland
2016. Increasing the effectiveness of knowledge transfer activities and training of the forestry workforce with marteloscopes. *The Forestry Chronicle*, 92(4) :418–427.

Spinelli, R., N. Magagnotti, L. Pari, and M. Soucy
2016. Comparing tree selection as performed by different professional figures. *Forest Science*, 62(2) :213–219.

Vítková, L., Á. Ní Dhubháin, and A. Pommerening
2016. Agreement in tree marking : what is the uncertainty of human tree selection in selective forest management ? *Forest Science*, 62(3) :288–296.

7 Annexes

A Typologie utilisée pour relever les dendromicrohabitats au martelo-scope d'Auberive.

Codes écologiques

Critères par localisation *(en présence absence)*

G	Cavité (gap)	**Localisation :**
H	Loge (house) (mettre autant de H que de loges)	1 Pied (<1m)
F	Fente (>1cm)	2 Fût
A	Attaques de pics (pour consommation)	3 Houppier
P	Pourriture	
I	Blessure (injury)	
C	Champignon	
E	Ecorce déhiscente	
B	Mousse (bryophyte)	>1/2 surface développée
L	Lichen	
R	Lierre	

Branches mortes (en nombre)

S	Petites (small) - Diam = 5-10 cm
X	Moyennes - Diam = 10-30 cm
Y	Grandes - Diam >30 cm
Z	Ensemble du squelette (dans ce cas il n'est pas nécessaire de préciser le nombre) (dès que S+X+Y > 10)

Autres codes :

K	Fourche (fork) *(uniquement si présomption de terreau)*
T	Tête cassée ou sèche
D	Individu dépérissant
U	Individu bas branchu, sineux, tortueux
J	Individu en lisière, en bordure d'un chemin, d'un cloisonnement
Q	Individu situé à proximité de bois mort au sol (rôle de couvert)
M1	Individu mort - Diam < 30 cm
M2	Individu mort - Diam > 30 cm
V	Diversité en espèce autochtone
W	Diversité en structure verticale

Exemple

Arbre possédant un champignon au pied, une loge dans le houppier, dont l'écorce est déhiscente au pied et dans le houppier, avec 4 branches de petites tailles et une de taille moyenne

Code : *c1h3e1e3s4y1*

B Typologie des dendromicrohabitats utlisée dans le modèle SAMSARA2.

Type	Description traduite	Correspondance ENGREF
Breed.Woodpecker	Loge créée par attaque de pic	Oui
Rot.Hole	Trou en décomposition	Oui
Dendrotelm	Dendrotelme : habitat aquatique, résultant souvent de la décomposition des souches	Non
Root.Concav	Cavité naturelle à la base d'un tronc, formée par les racines et le sol	Non
Bark.Loss	Perte d'écorce	Oui
Exposed.HeartWood	Cœur exposé	Non
Crack	Fente	Oui
Crown.DeadWood	Bois mort dans le houppier	Oui
Burr.canker	Chancre et loupe	Non
Polypore	Polypore : champignon se développant sur les arbes	Oui
Sap.Run	Coulée de sève fraiche et significante	Non

C Exemple de sortie automatique de l'analyse d'un martelage fictif à Auberive.

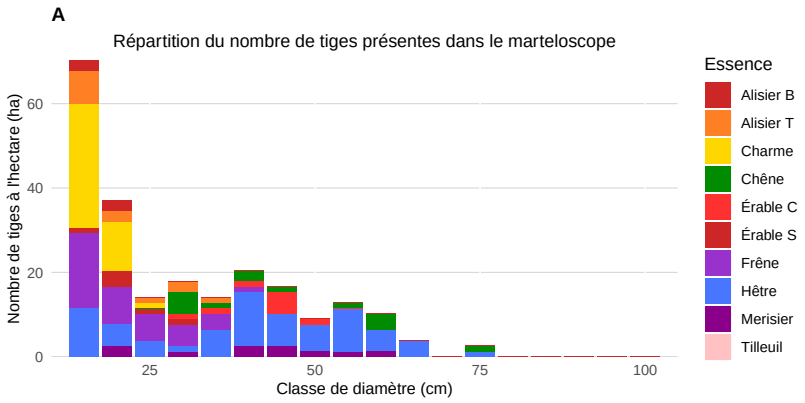
Présentation du marteloscope

Tableau 1 – Capital

N (ha)	G (m^2/ha)	V (m3/ha)
229	20	408

Tableau 2 – Détail du nombre de tiges et de la surface terrière par classe de diamètre

Classe de diamètre	N (ha)	G (m^2/ha)
15	70.3	1.2
20	37.1	1.1
25	14.1	0.7
30	17.9	1.3
35	14.1	1.3
40	20.5	2.6
45	16.6	2.6
50	9.0	1.7
55	12.8	3.0
60	10.2	2.8
65	3.8	1.3
70	0.0	0.0
75	2.6	1.1
80	0.0	0.0
85	0.0	0.0
90	0.0	0.0
95	0.0	0.0
100	0.0	0.0



B

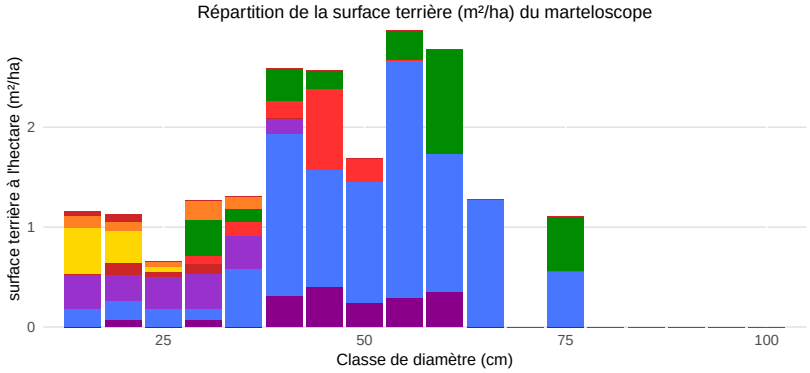
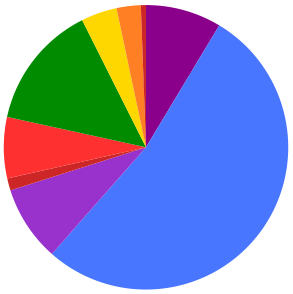


TABLEAU 3 – Détail des proportions entre les essences, en surface terrière

Essence	Pourcentage (m²/ha)
Alisier B	0.6
Alisier T	2.7
Charme	4.1
Chêne	14.2
Érable C	6.9
Érable S	1.4
Frêne	8.6
Hêtre	52.9
Merisier	8.6
Tilleuil	0.0

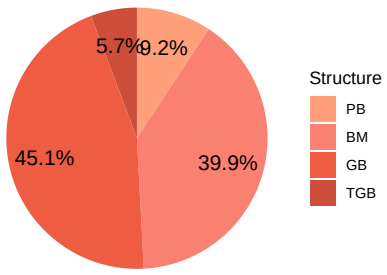
C

Proportion des essences du marteloscope



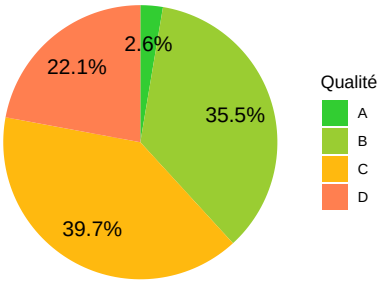
D

Structure en pourcentage de G (m²/ha

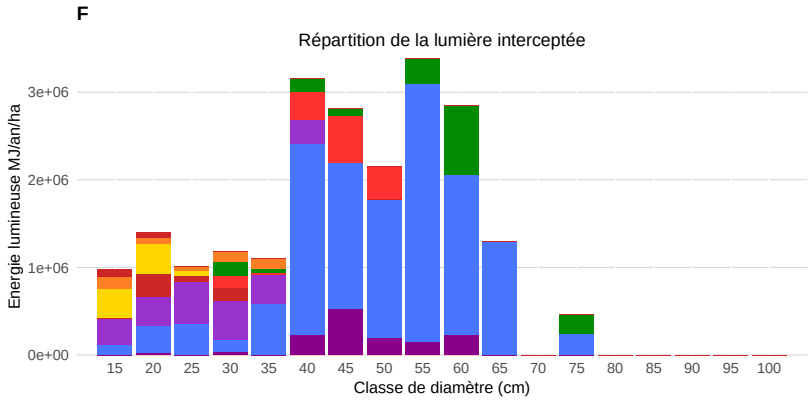


E

Qualité en pourcentage de G (m²/ha)



3



Analyse du martelage fictif

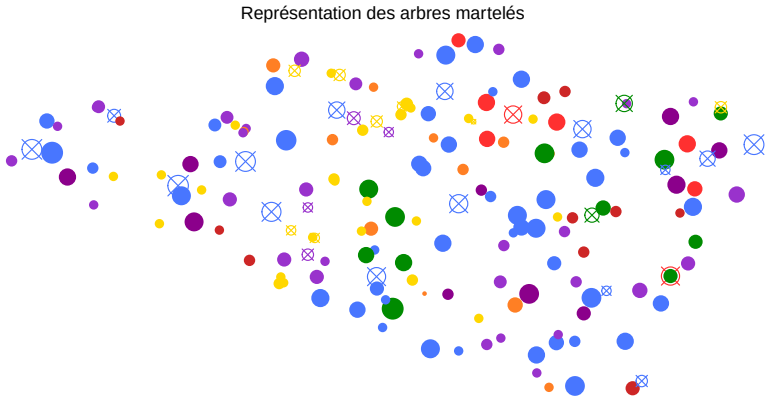


Tableau 4 – Récapitualtif de l'intensité du prélèvement

Prélèvement	Données
G (m²/ha)	4
Structure	
PB % (m²/ha)	16
BM % (m²/ha)	14
GB % (m²/ha)	30
TGB % (m²/ha)	16
Valeur de consommation % (€)	22
Note écologique %	NA

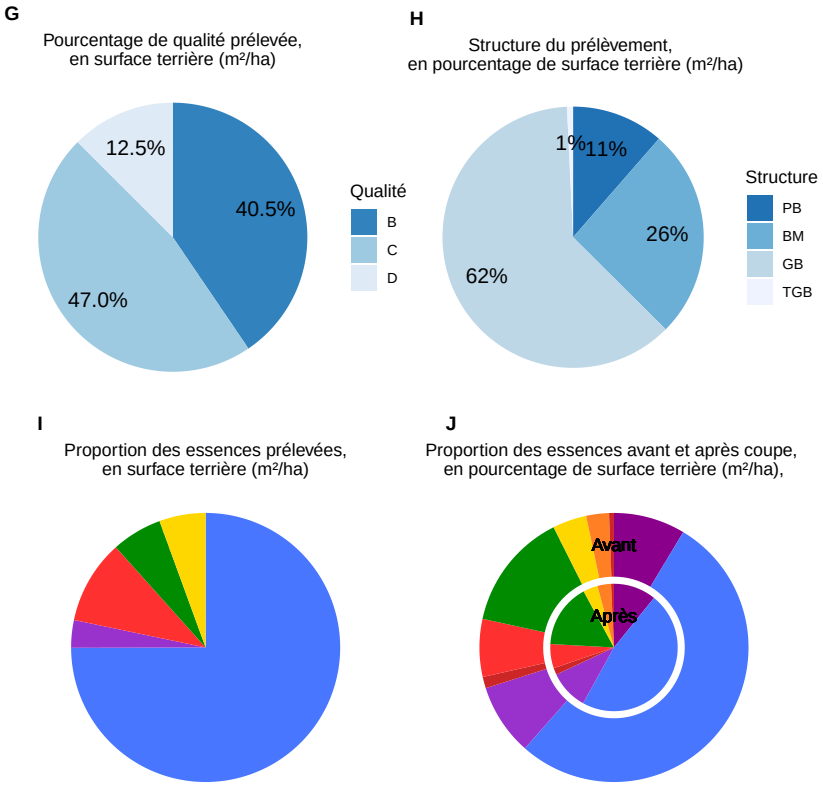
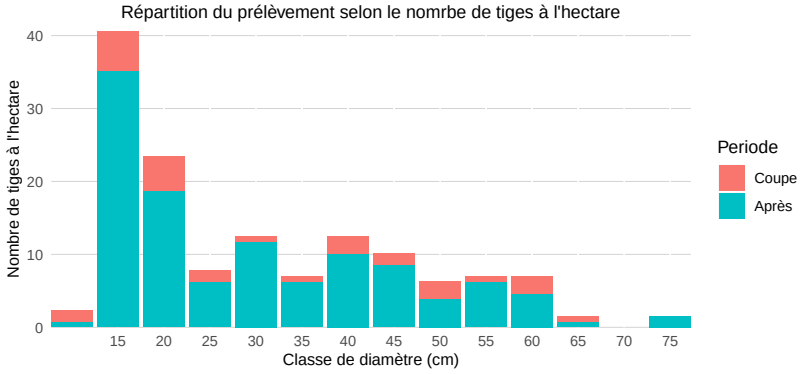


Tableau 5 – Evolution du capital

Thematique	Avant	Coupe	Après
Qualité			
A (m^2/ha)	0.5	NA	0.5
B (m^2/ha)	7.3	1.7	5.6
C (m^2/ha)	8.1	2.0	6.2
D (m^2/ha)	4.5	0.5	4.0
Structure			
PB (m^2/ha)	2.9	0.5	2.4
BM (m^2/ha)	7.7	1.1	6.6
GB % (m^2/ha)	8.7	2.6	6.1
TGB (m^2/ha)	1.2	0.0	1.1
Valeur de consommation (€)	20583.4	3235.3	17348.1
Note écologique	174.0	38.0	136.0

K



L

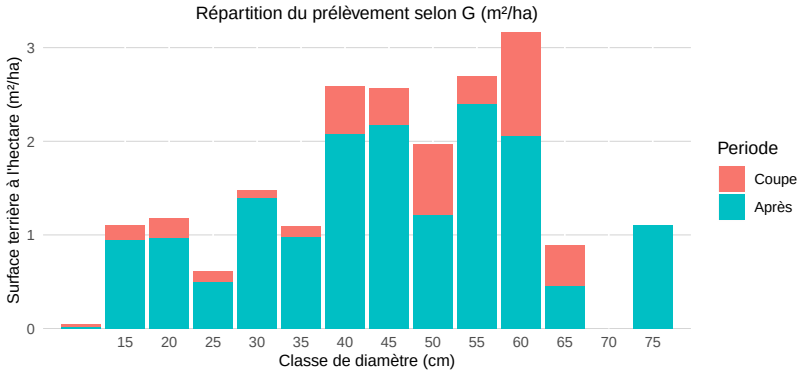
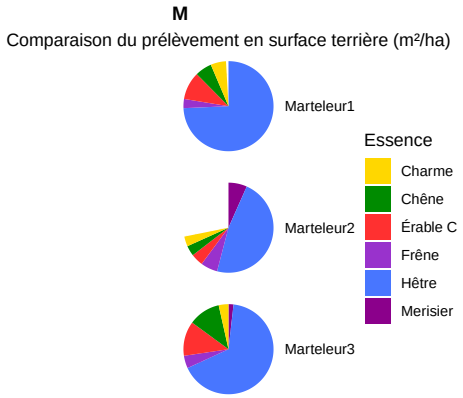


Tableau 6 – Comparaison du nombre de tiges dans le marteloscope

Class_Diam	Avant	Coupe	Après
10	2	2	1
15	41	5	35
20	23	5	19
25	8	2	6
30	13	1	12
35	7	1	6
40	13	2	10
45	10	2	9
50	6	2	4
55	7	1	6
60	7	2	5
65	2	1	1
75	2	NA	2

Tableau 7 – Comparaison du prélèvement entre les différents groupes

Essence	Marteleur1	Marteleur2	Marteleur3
Charme	0.23	0.15	0.15
Chêne	0.25	0.16	0.48
Érable C	0.42	0.19	0.52
Frêne	0.14	0.26	0.19
Hêtre	3.13	2.00	2.80
Merisier	NA	0.28	0.08
Total			
Total (m^2/ha)	4.18	3.03	4.22
Total (%)	20.42	14.80	20.60



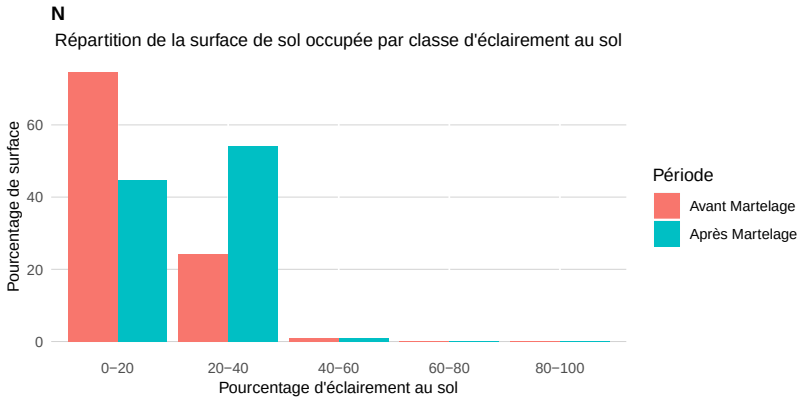


TABLEAU 8 – Raisons pour prélever un arbre

	Marteleur		Tous les groupes	
Raison	Nombre	Pourcentage	Total	Pourcentage moyen
Accueil	NA	NA	5	4.3
Amélioration	17	42.5	61	52.6
Diversité	NA	NA	8	6.9
Exploitation	6	15.0	9	7.8
Récolte	3	7.5	8	6.9
Renouvellement	7	17.5	9	7.8
Sanitaire	7	17.5	16	13.8

Raisons identifiées pour le martelage.
Plus le mot affiché est grand, plus sa fréquence d'apparition l'est aussi

Tableau 9 – Les 5 arbres les plus favorisés parmi tous les groupes

Id	Diametre	Essence	N
1	19	Frêne	2
4	74	Hêtre	2
48	44	Hêtre	2
110	14	Charme	2
147	20	Érable S	2

Tableau 10 – Liste des arbre favorisés par le marteleur

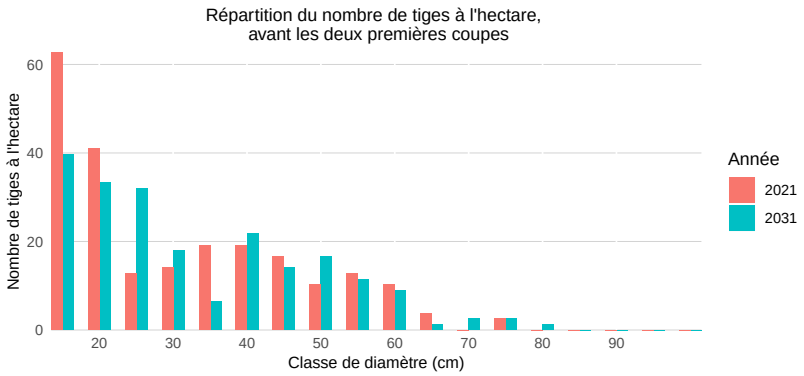
Id	Diametre	Essence
1	19	Frêne
10	38	Merisier
110	14	Charme
137	44	Hêtre
147	20	Érable S
213	18	Frêne
223	53	Hêtre
313	46	Merisier
511	14	Charme

Comparaison du peuplement : avant les deux premières coupes

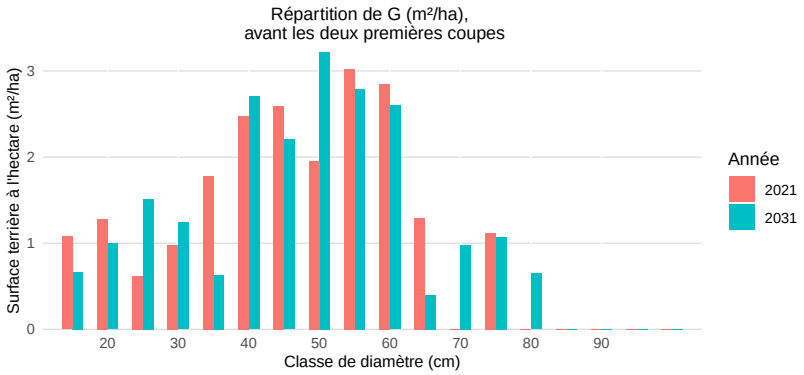
Tableau 11 – Comparaison du peuplement avant les deux premières coupes

Thematique	Avant première coupe	Avant deuxième coupe
N (ha)	225	210
G (m^2/ha)	21	22
Dg (cm)	35	36
Valeur de consommation (€)	21675	28670
Note écologique	223	224
A (m^2/ha)	3	5
B (m^2/ha)	36	29
C (m^2/ha)	40	40
D (m^2/ha)	22	26
T (m^2/ha)	0	0
PB (m^2/ha)	6	13
BM (m^2/ha)	46	43
GB (m^2/ha)	39	32
TGB (m^2/ha)	10	12

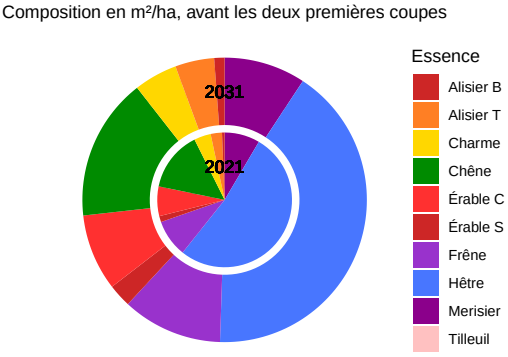
O


Répartition du nombre de tiges à l'hectare,
avant les deux premières coupes
Nombre de tiges à l'hectare
0
20
40
60
20
30
40
50
60
70
80
90
Classe de diamètre (cm)
Année
2021
2031

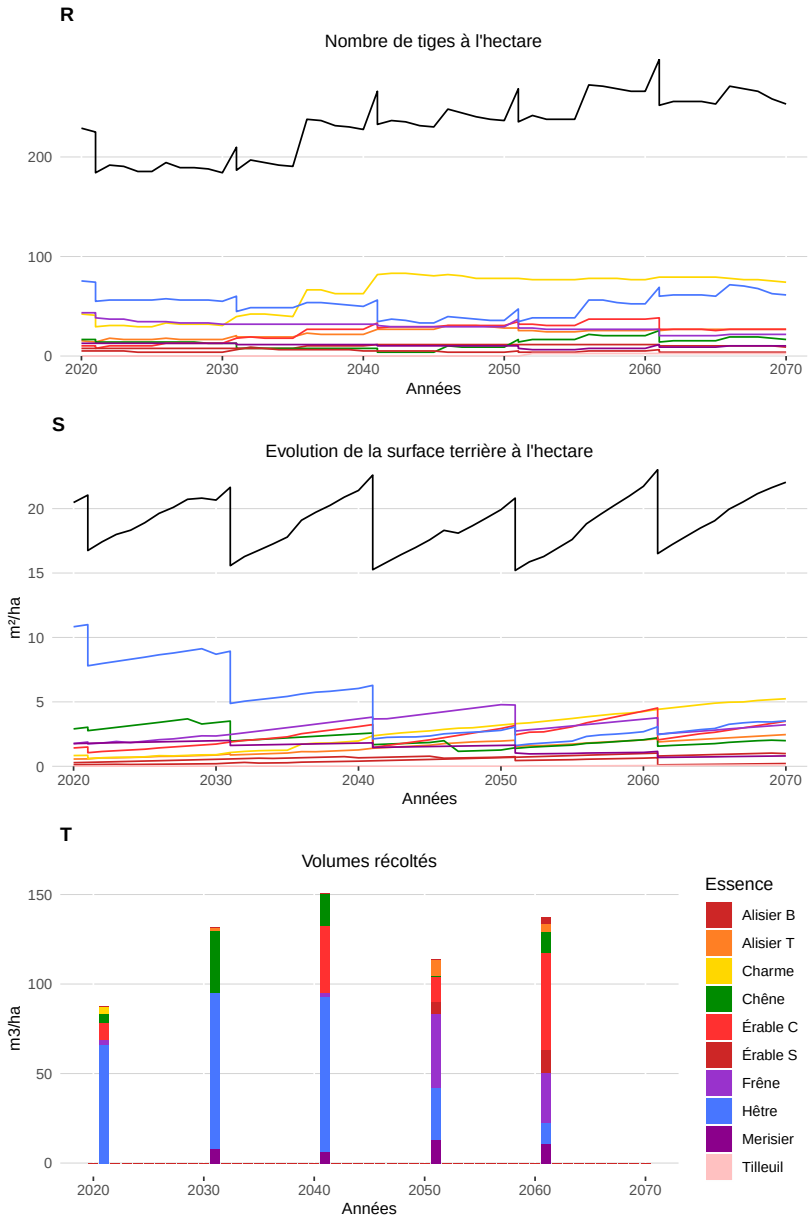
P


Répartition de G (m²/ha),
avant les deux premières coupes
Surface terrière à l'hectare (m²/ha)
0
1
2
3
20
30
40
50
60
70
80
90
Classe de diamètre (cm)
Année
2021
2031

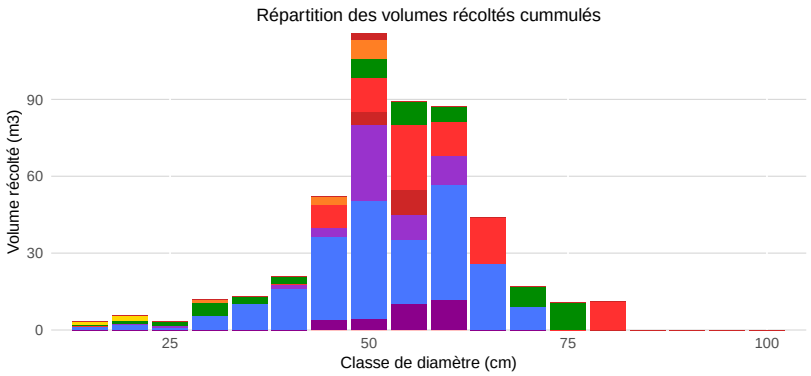
Q


Composition en m²/ha, avant les deux premières coupes
2031
2021
Essence
Alisier B
Alisier T
Charme
Chêne
Érable C
Érable S
Frêne
Hêtre
Merisier
Tilleuil

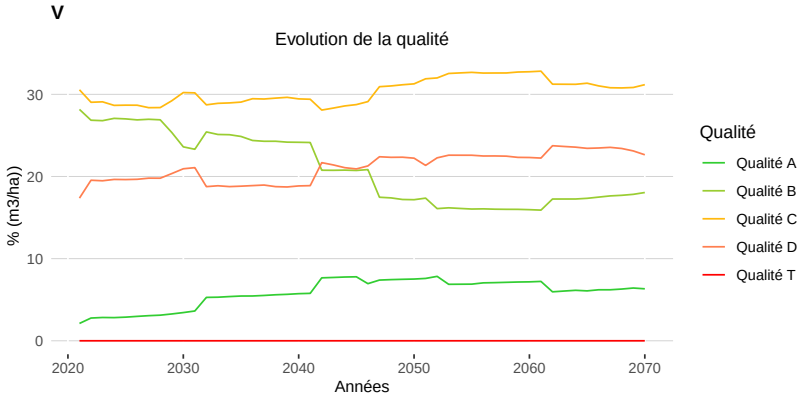
Évolution du peuplement géré pendant 50 ans



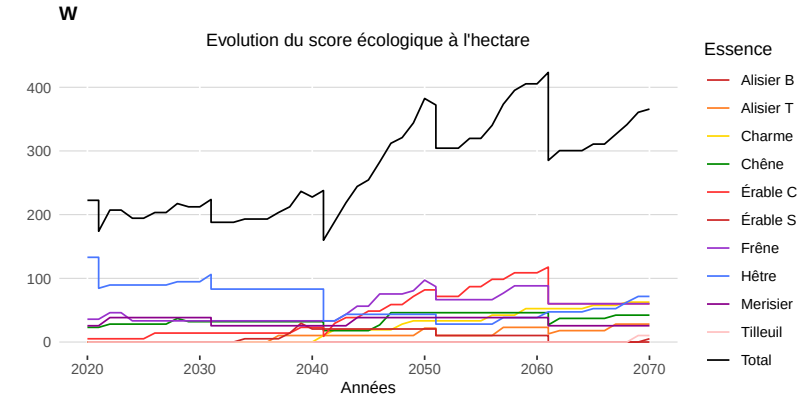
U


Répartition des volumes récoltés cummulés
Volume récolté (m3)
0
30
60
90
25
50
75
100
Classe de diamètre (cm)

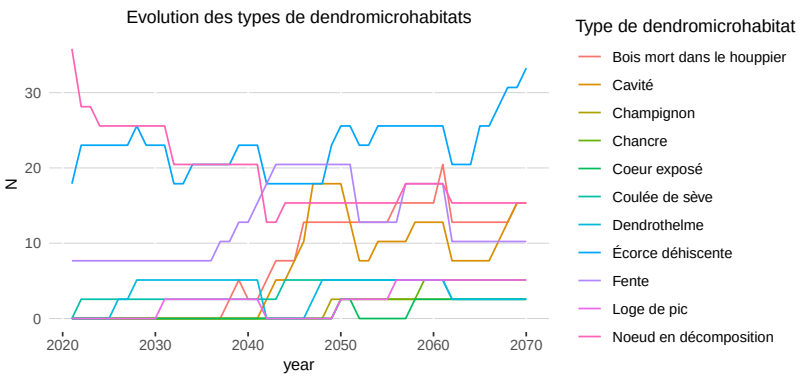
V


Evolution de la qualité
% (m3/ha))
0
10
20
30
2020
2030
2040
2050
2060
2070
Années
Qualité
Qualité A
Qualité B
Qualité C
Qualité D
Qualité T

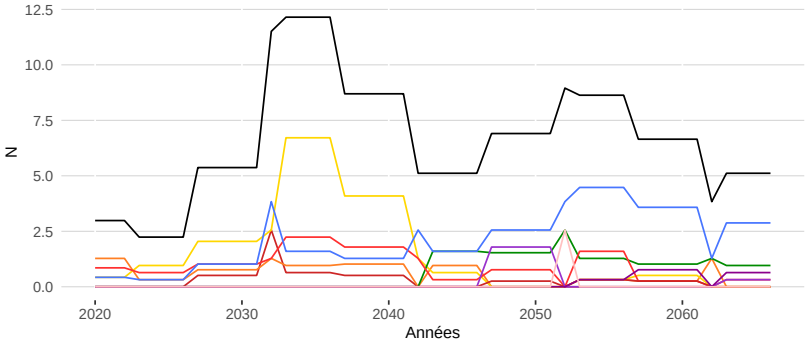
W


Evolution du score écologique à l'hectare
0
100
200
300
400
2020
2030
2040
2050
2060
2070
Années
Essence
Alisier B
Alisier T
Charme
Chêne
Érable C
Érable S
Frêne
Hêtre
Merisier
Tilleuil
Total

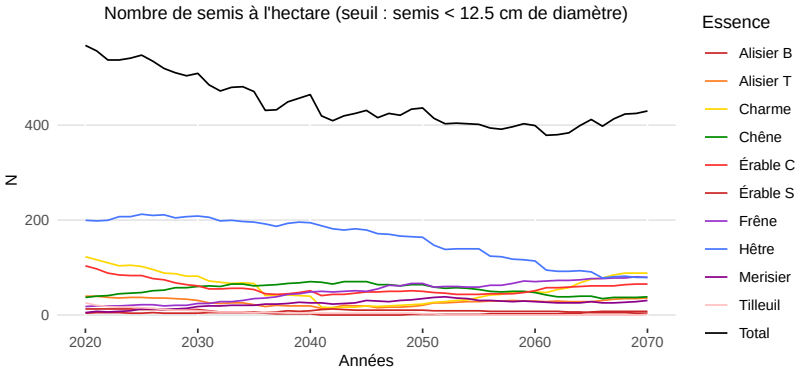
X

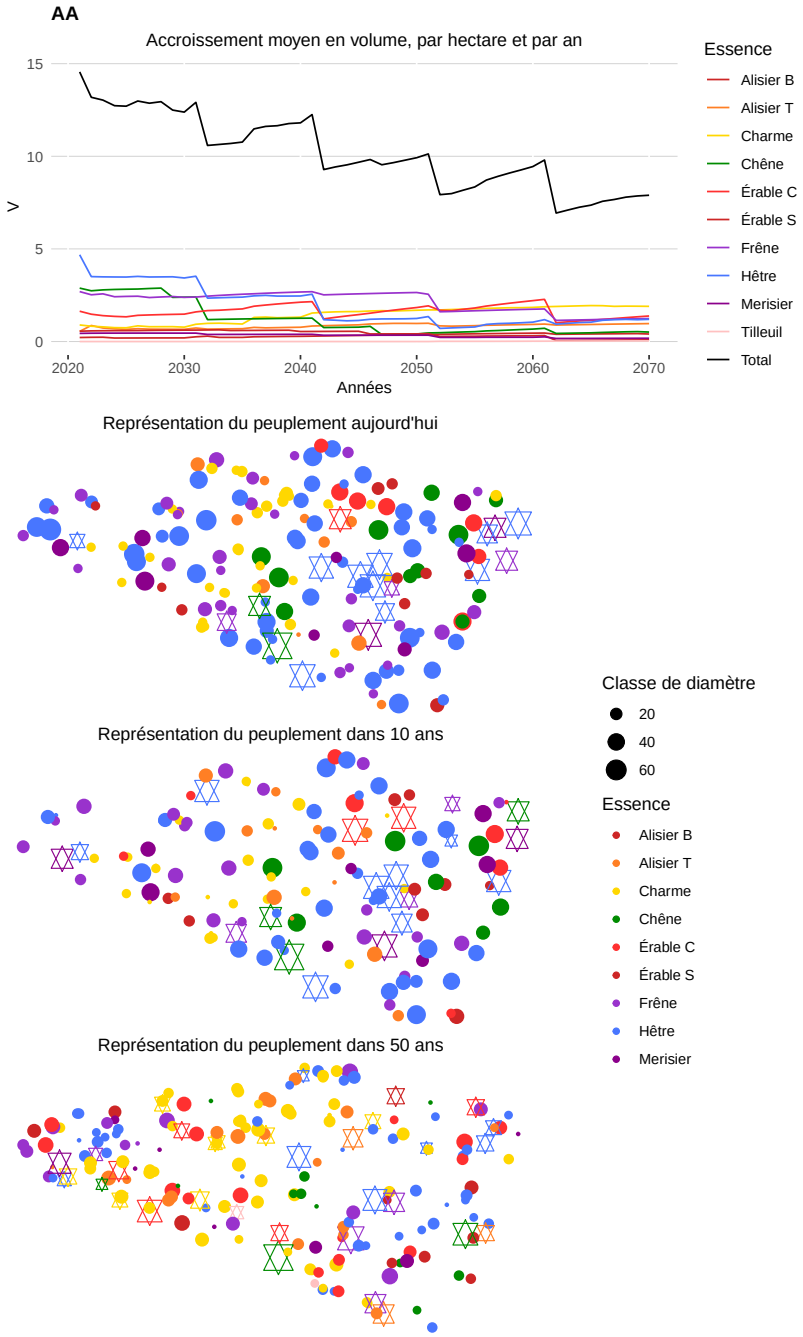

Evolution des types de dendromicrohabitats
Type de dendromicrohabitat
Bois mort dans le houppier
Cavité
Champignon
Chancre
Coeur exposé
Coulée de sève
Dendrothelme
Écorce déhiscente
Fente
Loge de pic
Noeud en décomposition
N
0
10
20
30
2020
2030
2040
2050
2060
2070
year

Y


Nombre de recrus moyen à l'hectare (seuil : arbres > 12.5 cm de diamètre)
N
0.0
2.5
5.0
7.5
10.0
12.5
2020
2030
2040
2050
2060
Années

Z


Nombre de semis à l'hectare (seuil : semis < 12.5 cm de diamètre)
Essence
Alisier B
Alisier T
Charme
Chêne
Érable C
Érable S
Frêne
Hêtre
Merisier
Tilleuil
Total
N
0
200
400
2020
2030
2040
2050
2060
2070
Années


AA
Accroissement moyen en volume, par hectare et par an
15
10
5
0
>
2020
2030
2040
2050
2060
2070
Années
Essence
Alisier B
Alisier T
Charme
Chêne
Érable C
Érable S
Frêne
Hêtre
Merisier
Tilleuil
Total
Représentation du peuplement aujourd'hui
Représentation du peuplement dans 10 ans
Représentation du peuplement dans 50 ans
Classe de diamètre
20
40
60
Essence
Alisier B
Alisier T
Charme
Chêne
Érable C
Érable S
Frêne
Hêtre
Merisier

D Protocole de relevé de la régénération au marteloscope d'Auberive.

Protocole de mesures – Marteloscope de Vivey II – « régénération »

1/ Définitions

- Ligneux arborés : semis de toutes les essences arborées (pouvant conduire à des individus de plus de 7m de haut).
- Ligneux arbustifs : semis de toutes les essences ligneuses non arborées (en général arbustes).
- Semi-ligneux : ronces

2/ Cartographie

Le marteloscope sera parcouru pour délimiter sur plan des zones homogènes vis-à-vis des catégories ci-dessus définies.

Critères de différenciation des zones (un seul critère suffit pour valider le changement) :

- Composition : changement de plus de 20% en recouvrement de la composition en essences arborées
- Hauteur : selon les classes définies au 3/, changement de plus de 20% dans les proportions des classes (en recouvrement de ces classes)
- Densité : changement de plus de 20% de recouvrement global de l'une des trois catégories définies au 1/.

Délimitation de chaque zone : tracer à main levée sur un plan les contours de la zone, en s'aidant des arbres numérotés sur le terrain. Taille minimale : 100 m2 si très spécifique, 200 m2 dans le cas général.

Notation pour chaque zone (valeurs moyennes pour la zone) :
a/ recouvrement global (toutes strates de 10cm à D1.3m < 2.5cm) puis % de chaque essence arborée ; les arbustes constituent une « seule essence ».
b/ recouvrement global de chaque strate de hauteur (cf ci-après), et % de chaque essence arborée. Les ligneux arbustifs ne sont pas pris en compte dans cette notation par strate.
c/ recouvrement global de la ronce.
Les recouvrements sont estimés en classes : 0 (absence), + (quelques individus, recouvrement impossible à estimer, 1 (recouvrement pouvant être estimé entre 5 et 15%, 2 (15-25%), 3 (25-35%), etc.

3/ Comptages des semis inférieurs à 2.5 cm de diamètre à 1m30 de hauteur

Les placettes seront réparties au mieux dans chaque zone par les opérateurs. Il est conseillé de définir une règle pour ne pas choisir le centre de chaque placette.
Le centre de chaque placette sera placé sur le plan par rapport aux arbres numérotés situés à proximité.
Nombre de placettes :

- 2 placettes de comptage pour une petite zone (< 500 m2)
- 4 placettes de comptage pour une zone moyenne (de 501 m2 à 1000 m2)
- 4 placettes de comptage pour 1000 m2 supplémentaires dans de grandes zones

Sur 1m de rayon : comptage par essence des semis ligneux arborés et arbustifs de 10 cm à 50 cm de hauteur.

Sur 2m de rayon : comptage par essence et par catégorie de hauteur des semis ligneux arborés et arbustifs.
Les classes de hauteur/diamètre sont les suivantes :

- de 10 cm à 50 cm ;
- de 50 cm à 1m50 ;
- de 1m50 à 2.5 cm de diamètre (à 1m30).

Indiquer 1 dans la colonne « cepee » si une essence est constituée à plus de 50% de brins de cépée.
Indiquer 1 dans la colonne « abrout » si une essence est abroutie (consommation de la pousse terminale) à plus de 50% dans les catégories atteignables en hauteur.

4/ Mesure et positionnement des ligneux de 2.5 cm à 7.5 cm de diamètre à 1m30 de hauteur

Concerne les ligneux arborés et arbustifs.
Relevé de l'essence, de la circonférence arrondie au cm le plus proche à 1m30 de hauteur, de la hauteur estimée au mètre près.
Positionnement sur le plan, sans mesure, par rapport aux arbres les plus proches.

5/ Mesure et positionnement des ligneux de 7.5 cm à 12.5 cm de diamètre à 1m30 de hauteur

Concerne les ligneux arborés et arbustifs.
Relevé de l'essence, de la circonférence arrondie au cm le plus proche à 1m30 de hauteur, de la hauteur estimée au mètre près.
Positionnement sur le plan, sans mesure, par rapport aux arbres les plus proches.
Numérotation à la peinture au stylo.

6/ Hauteurs et extensions des houppiers des arbres

Mesurer la hauteur totale de 3 arbres par essence pour les catégories de grosseur de bois BM (30-45) et GB/TGB (50 et +), répartis au mieux sur le marteloscope (à préparer avant mesure d'après le plan du marteloscope). Estimation : 6 tiges pour GB/TGB, 15 tiges pour les BM.
Mesure des extensions des houppiers dans 4 directions de chacune de ces tiges selon le protocole AFI.

Mesurer la hauteur totale de 2 arbres par essence pour les catégories de grosseur de bois PB (20-25) et perches (15), répartis au mieux sur le marteloscope (à préparer avant mesure d'après le plan du marteloscope). Estimation : 14 tiges pour les PB, 10 tiges pour les perches.
Mesure des extensions des houppiers dans 4 directions de chacune de ces tiges selon le protocole AFI d'une tige sur deux.

Si une catégorie essence x catégorie de grosseur n'est pas représentée, ne pas reporter les mesures sur une autre.

EL – 18/05/2020

E Guide d'utilisation de l'outil développé.

TOUT SUR LE RAPPORT AUTOMATIQUE : ANALYSE D'UN MARTELAGE AVEC SAMSARA

1. MODE D'EMPLOI

1. Comment le faire fonctionner ?
2. Ce qu'il faut conserver

2. CONSTRUCTION & FONCTIONNEMENT

Document produit par : BASTIANELLI Camille ~ Mémoire de fin d'études 2020

Encadrement : COURBAUD Benoit

1. MODE D'EMPLOI

1. Comment le faire fonctionner ? **Générer le rapport**

- **Ouvrir les fichiers .rnw dans Rstudio** : Rapport (fichier principal), Presentation, Martelage, Evol10ans et Evol50ans (fichiers annexes).
- **Vérifier que le dossier des données contient :**

- Le fichier de saisie des martelages de terrain (Vivey_martelage)
- Les fichiers textes (.txt) de sortie de simulation Samsara (outputDistributions et outputTreeList)
- Les fichiers de correspondance pour les légendes (Corres et CorresRaison)

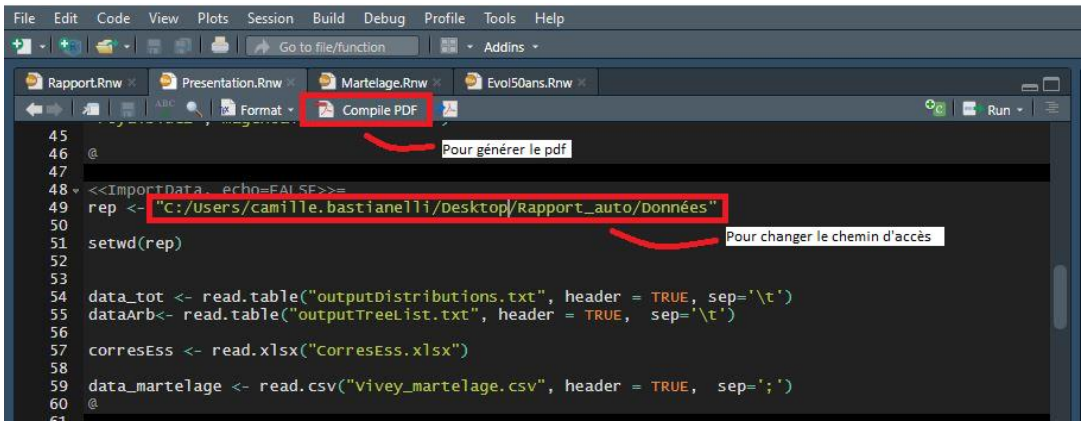
Puis, dans chaque **fichier annexe,** mettre le **chemin d'accès du dossier des données** à la ligne de code :

rep ← «chemin/acces/avec/antislash»

1. MODE D'EMPLOI

1. Comment le faire fonctionner ? **Générer le rapport**

1. **Appuyer sur « Compile PDF » pour chaque <u>sous-fichier</u>.** Un message d'erreur s'affiche, c'est normal. Les fichiers annexes ont été générés, mais pas le rapport, d'où le message d'erreur.
2. **Appuyer sur « Compile PDF » pour le <u>fichier principal</u> :** Rapport. Le pdf est créé ! Impressionnant ;)



3

1. MODE D'EMPLOI

1. Comment le faire fonctionner ? **Générer le rapport**

NB : par la suite, si le pdf du rapport est ouvert, une nouvelle version dudit rapport ne peut pas être produite.

Attention, les fichiers sont écrasés à chaque fois que l'on « compile ».

Attention, les fichiers sont gardés en mémoire. Bien penser à **compiler tous les fichiers annexes** lorsque l'on passe à un nouveau marteleur. Le risque est d'avoir la partie « Martelage » d'un opérateur et la partie « Evol10ans » d'un autre.

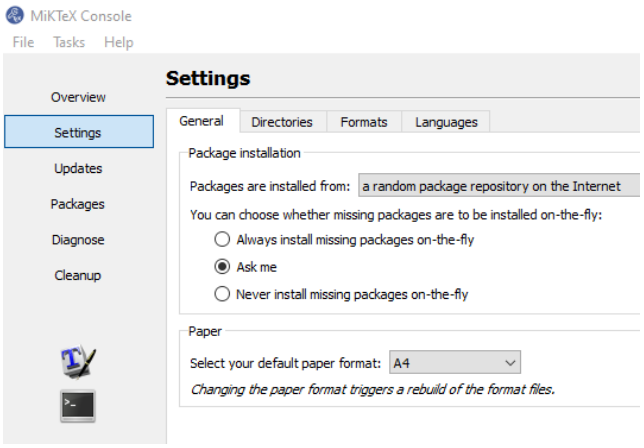
4

1. MODE D'EMPLOI

1. Comment le faire fonctionner ? **Générer le rapport**

NB : Il est nécessaire d'installer MIKTEK (ou équivalent). Installez également les packages dans la console Miktek ou cocher « Always install missing packages on the fly.»

La première option nécessite, lors de la première utilisation sur un ordinateur : environ 2 heures de téléchargement et une connexion internet. La deuxième, d'avoir une connexion internet à chaque utilisation.



1. MODE D'EMPLOI

1. Comment le faire fonctionner ? **Générer les fichiers du modèle**

1. **Vérifier qu'un dossier de données contient :**

- Les fichiers standardisés d'initialisation de Samsara (Price_list, TREMs, Vivey_fichier_principal)
- Le fichier de commande pour lancer Samsara (commandFileVivey)
- Le fichier de saisie des martelages de terrain (Vivey_martelage)

2. **Ouvrir un invite de commande (chercher dos dans l'outil de recherche de votre ordinateur)**
3. **Renseigner le chemin d'accès à votre version de Capsis**

NB : cd permet de renseigner l'étape : ex : « cd Documents » appuyer sur la touche entrer, et vous êtes dans vos documents.

4. **Mettre la ligne de code suivante, avec le chemin d'accès au dossier de données :**

capsis -p script samsara2.pgms.disturbances.ScriptFlexibleSimuFormat2 chemin/acces/donnees/commandFileVivey.txt

5. **Appuyer sur la touche entrer**
6. **Les fichiers de sorties sont créés dans un dossier « output ».**

1. Vérifier qu'un unique dossier contient :

- Les fichiers standardisés d'initialisation de Samsara (Price_list, TREMs, Vivey_fichier_principal)
- Le fichier de commande pour lancer Samsara (commandFileVivey)
- Le fichier de saisie des martelages de terrain (Vivey_martelage)

2. Renseigner le nom des marteleurs

```
# Marteloscope field marking
# eventName      intervener       marteloFileName columnName
Field_Marking_1 MarteloThinner  Vivey_martelage.csv     Marteleur1
Field_Marking_2 MarteloThinner  Vivey_martelage.csv     Marteleur2
Field_Marking_3 MarteloThinner  Vivey_martelage.csv     Marteleur3
```


3. Renseigner la sylviculture

```
# Multicriteria thinning
# eventName      intervener       stage0_nbRetentionTrees stage0_distanceToClosestRetenti
Multicriteria_1 MultiCriteriaThinner    10      0.2     {(0 0.2);(1 0.1 ;(2,0.1); (3,0.
```

A B C D

A : Numéro de la sylviculture renseignée, est conseillé de correspondre au NumGroup pour plus de lisibilité

B : Correspond au premier critère à renseigner, soit au nombre d'arbres de rétention souhaités par le marteleur. Ainsi de suite, voir la fiche de saisie terrain.

C : Numéro de l'espèce. La correspondance se situe au début du fichier Vivey_fichier_principal.

D : Critère d'importance pour l'espèce souhaitée (voir C).

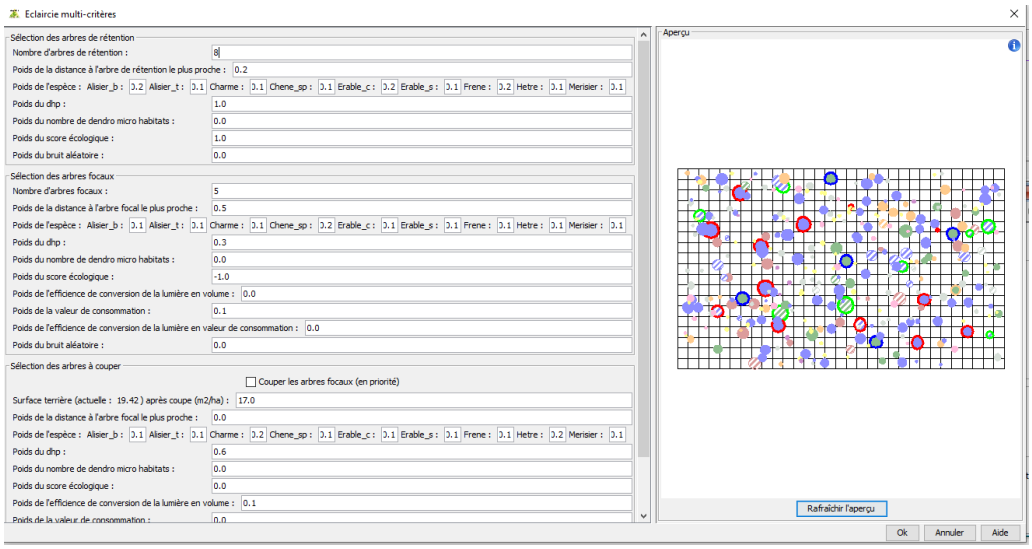
NB : Les poids sont à renseigner entre -1 et 1.

1. MODE D'EMPLOI

1. Comment le faire fonctionner ? Renseigner le fichier de commande Samsara

3. Renseigner la sylviculture

Pour plus de facilités, il est possible de lancer Capsis en interactif et de visualiser les arbres choisis par l'algorithme, voir capture d'écran ci-dessous.



1. MODE D'EMPLOI

1. Comment le faire fonctionner ? Renseigner le fichier de commande Samsara

3. Renseigner la sylviculture

Exemple de la fiche de saisie donnée à un marteleur, en cours, pour les arbres de rétention.

Tableau de saisie de la sylviculture de l'opérateur : éclaircie multi-critères		
Sélection des arbres de rétention		
Critères	Marteleur 1	Marteleur 2
Nombre d'arbres de rétention	10	
Poids de la **distance** à l'arbre de **rétention** le plus proche	0,2	
Poids de l'**espèce** :		
Alisier B	0,2	
Alisier T	0,1	
Charme		
Chene sp		
Erable C		
Erable S		
Frêne		
Hêtre		
Merisier		
Tilleuil		
Poids du **diamètre**		
Poids du score **écologique**		

1. MODE D'EMPLOI

1. Comment le faire fonctionner ? **Renseigner le fichier de commande Samsara**

3. Renseigner le déroulé de la simulation :

```
# Table describing simulation scen
# simulationId  date    eventName
1       2020    Create_Vivey
1       2021    Field_Marking_1
1       2031    Multicriteria_1
1       2041    Multicriteria_1
1       2051    Multicriteria_1
1       2061    Multicriteria_1
1       2070    End
2       2020    Create_Vivey
2       2021    Field_Marking_2
2       2031    Multicriteria_2
2       2041    Multicriteria_2
2       2051    Multicriteria_2
2       2061    Multicriteria_2
2       2070    End
```

1 numéro de simulation pour chaque marteleur
1 année pour chaque intervention

11

1. MODE D'EMPLOI

2. Ce qu'il faut conserver : dans le **fichier de saisie du martelage**

- **Le fichier doit contenir deux colonnes** (actuellement identifiant et diamètre des arbres), **avant de saisir les informations** liées aux martelages. Si vous voulez changer, il faut modifier le code dans le fichier marteloscope : l.79 pour que la colonne du marteleur soit la bonne.
- **La saisie pour un marteleur comporte trois colonnes** : la première concerne les arbres martelés. Ceux qui restent ont « 0 », ceux qui sont martelés ont « 1 ». La deuxième concerne les raisons du martelage. La dernière concerne les arbres favorisés : « 1 » signifie que le marteleur a travaillé au profit de cet arbre, « 0 » que ce n'est pas le cas.
- **La colonne « NumGroup » est le numéro de simulation** correspondant au marteleur dans le fichier de commande pour lancer Samsara automatiquement. Le numéro de simulation doit être inscrit dans la première colonne. Si vous voulez changez, il faut modifier dans tous les fichiers, les lignes de code :

```
NumSimu <- data_martelage %>% select(NumGroup)
NumSimu <- NumSimu[1,1]
```

- **Le format du fichier « .csv » :** Samsara ne peut pas lire un autre format de type tableur.

12

1. MODE D'EMPLOI

2. Ce qu'il faut conserver : dans le **fichier de saisie du martelage**

- Les colonnes concernant les raisons du martelage doivent commencer par **« Raisons ».**
- Les colonnes concernant les arbres favorisés lors du martelage doivent commencer par **« Favoris ».**
- **Il doit y avoir au maximum 3 raisons.** Si vous voulez changer, il faut changer la ligne de code : ***str_split_fixed()***
- **L'ordre des marteleurs doit être celui de leur numéro de simulation.**
- **Il doit y avoir des « 0 » et « 1 » dans les colonnes de saisie du martelage et des favoris.** (Cela permet de réaliser des sommes). Astuce dans le fichier de saisie : utiliser le collage spécial du chiffre 1 (multiplication), pour obtenir des zéros dans les cases vides sélectionnées.

13

1. MODE D'EMPLOI

2. Ce qu'il faut conserver : dans le **fichier des essences**

- **Veuillez conserver le nom des colonnes :** speciesCode (pour l'analyse du martelage)

Ce qu'il faut conserver : dans le **fichier de commande SAMSARA**

- **L'année du premier martelage doit être, au moins un an plus tard que l'année de départ.** Samsara fait uniquement la création de la parcelle la première année.

14

2. CONSTRUCTION & FONCTIONNEMENT

- Le rapport est divisé en plusieurs sous-fichiers de manière à faciliter la recherche d'erreur et rendre plus facile la manipulation lors de l'écriture du code.

  Chaque fichier est conçu pour être autonome : il est possible de commenter, dans le fichier principal, la ligne de code : input(fichier_que_l'on_ne_veut_pas_dans_le_rapport), pour que le contenu de celui-ci n'apparaisse pas dans le rapport final.

  Les transformations générales des données sont situées en début de chaque fichier. Exceptions : graphiques et tableaux particuliers : par exemple sur la lumière ou les raisons de martelage, ce sont des données utilisées à un seul endroit.
  Par conséquent, l'ordre des graphiques et tableaux peut simplement être modifié en bougeant les *chunks* de place.

  Lorsque cela s'est avéré possible, il a été décidé de s'appuyer en priorité sur les sorties calculées par le modèle, à l'échelle du peuplement.

15

Pour plus de renseignements :

Consulter le mémoire : « Simulation de sylviculture irrégulière sur marteloscope avec le modèle Samsara »

Contacts :

benoit.courbaud@inrae.fr

camille.bastianelli@onf.fr

16

F Exemple de fichier de commande (extrait), permettant de lancer Samsara automatiquement.

```
#

# capsis -p script samsara2.pgms.disturbances.ScriptFlexibleSimuFormat2
C:/Users/camille.bastianelli/Desktop/utilitaire_stage3A/Calibration/Lux.AccmtG/
Simu_Lux/Periode1/commandFileLuxPart1.txt

#



treeClassDbhMin = 7.5

treeClassDbhMax = 122.5

saplingClassHeightMin = 0

saplingClassHeightMax = 10

lightSimulationStep = 5

saveProject = true
exportOnlyCoreTrees = true



# Stand creation event

# eventName inventoryFileName demographyFileName


Create_Samsa2trees_3_2183     Samsa2trees_3_2183.txt  NA
Create_Samsa2trees_9_2189     Samsa2trees_9_2189.txt  NA
Create_Samsa2trees_108_3234   Samsa2trees_108_3234.txt      NA
Create_Samsa2trees_109_3330   Samsa2trees_109_3330.txt      NA
Create_Samsa2trees_115_832    Samsa2trees_115_832.txt NA
Create_Samsa2trees_117_1520   Samsa2trees_117_1520.txt      NA
Create_Samsa2trees_117_2441   Samsa2trees_117_2441.txt      NA
Create_Samsa2trees_117_3323   Samsa2trees_117_3323.txt      NA
Create_Samsa2trees_119_2154   Samsa2trees_119_2154.txt      NA
Create_Samsa2trees_122_830    Samsa2trees_122_830.txt NA
Create_Samsa2trees_123_3327   Samsa2trees_123_3327.txt      NA
Create_Samsa2trees_124_2154   Samsa2trees_124_2154.txt      NA
Create_Samsa2trees_127_1437   Samsa2trees_127_1437.txt      NA
Create_Samsa2trees_127_1535   Samsa2trees_127_1535.txt      NA
Create_Samsa2trees_128_1450   Samsa2trees_128_1450.txt      NA
Create_Samsa2trees_128_3323   Samsa2trees_128_3323.txt      NA
Create_Samsa2trees_138_1523   Samsa2trees_138_1523.txt      NA
Create_Samsa2trees_140_1438   Samsa2trees_140_1438.txt      NA
Create_Samsa2trees_141_1523   Samsa2trees_141_1523.txt      NA
```

G Vérifications graphiques de la transformation des placettes réelles en placettes SAMSARA.

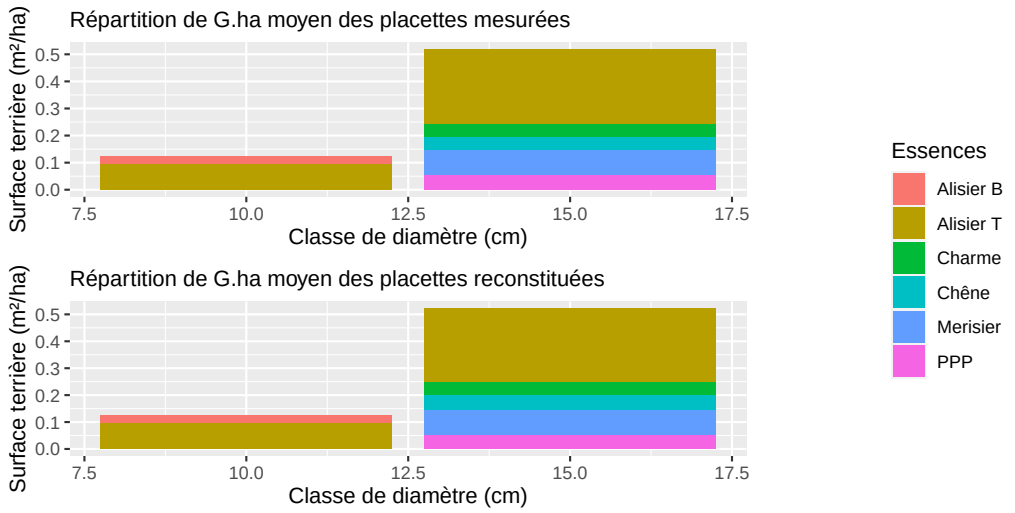


FIGURE 17 : Comparaison des surfaces terrières entre les placettes réelles et fictives, pour les arbres inventoriés à rayon fixe.

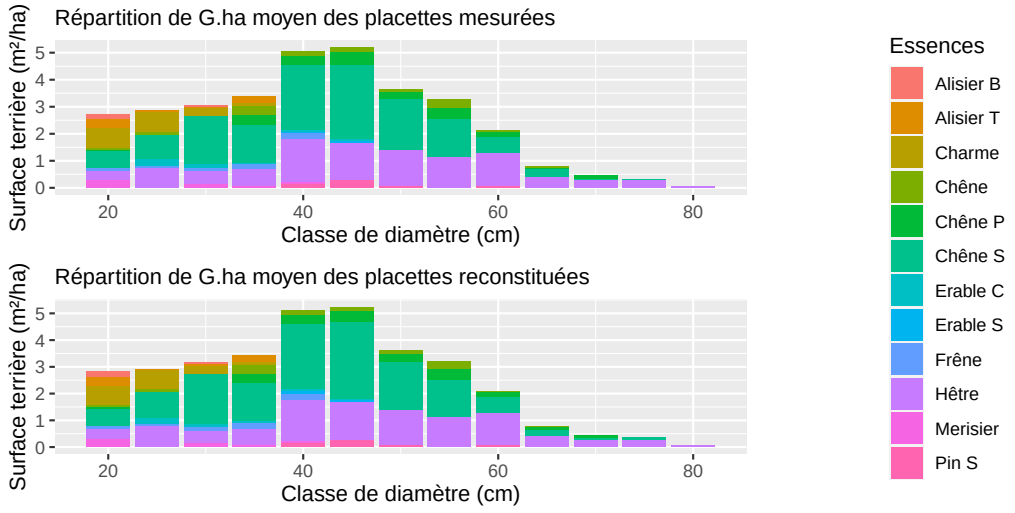


FIGURE 18 : Comparaison des surfaces terrières entre les placettes réelles et fictives, pour les arbres inventoriés à angle constant.