



Berner Fachhochschule  
Haute école spécialisée bernoise  
Bern University of Applied Sciences

# **SiWaWa 2.0 et Placettes Permanentes de Suivi Sylvicole (PPSS)**

**Rapport Final**

**(23.03.2018)**

**Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement OFEV**

# **Impressum**

## **Mandant**

Office fédéral de l'environnement OFEV, Division Forêts, CH-3003 Berne

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

## **Mandataires**

Haute école spécialisée bernoise BFH

Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires BFH-HAFL

## **Équipe BFH et auteurs**

Prof. Dr. Christian Rosset (chef de projet, HAFL)

Dr. Gaspard Dumollard (HAFL)

Janik Endtner (HAFL)

Clotilde Gollut (HAFL)

Dr. Valère Martin (HAFL)

Viola Sala (HAFL)

Dominique Weber (HAFL)

Frédéric Wyss (HAFL)

## **Expert externe et auteur**

Prof. Dr. Jean-Philippe Schütz (Prof. em. sylviculture EPFZ)

## **Partenaire de la pratique**

Entreprise forestière de la Bourgeoisie de Berne (FBB)

## **Groupe d'accompagnement OFEV**

Roberto Bolgè (OFEV)

## **Remarque**

Ce rapport a été rédigé sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement OFEV. Seul le mandataire porte la responsabilité de son contenu.

## Table des matières

1. Introduction au projet « SiWaWa 2.0 et Placettes Permanentes de Suivi Sylvicole (PPSS) » .....	8
1.1. Contexte .....	8
1.2. Objectifs du projet.....	9
1.3. Organisation du projet et structure du présent rapport final.....	9
2. SiWaWa, un modèle d'inventaire et de croissance à l'échelle du peuplement.....	12
2.1. Introduction .....	12
2.2. Les données utilisées pour l'estimation du modèle SiWaWa .....	14
2.3. Les équations du modèle SiWaWa et leur estimation .....	17
2.3.1. Vue d'ensemble des variables d'entrée et de sortie .....	18
2.3.2. SiWaWa et la structure des peuplements.....	21
2.3.2.1. Distribution des diamètres .....	21
2.3.2.2. Estimation du triptyque âge/fertilité/hauteur dominante.....	26
2.3.2.3. Estimation des hauteurs individuelles et du volume .....	30
2.3.3. SiWaWa et la dynamique des peuplements.....	33
2.3.3.1. Croissance en diamètre des arbres.....	33
2.3.3.2. Surface terrière maximale <i>G<sub>max</sub></i> et mortalité naturelle.....	38
2.3.3.3. Croissance en hauteur des arbres.....	43
2.3.4. Les éclaircies.....	44
2.3.4.1. La surface terrière recommandée <i>G<sub>rec</sub></i> .....	44
2.3.4.2. La distribution des diamètres des tiges prélevées lors d'une éclaircie .....	46
3. L'application SiWaWa 2.0 : un processus de développement et une solution IT.....	50
3.1. Processus de transition du prototype Excel à la bibliothèque SiWaWa Core et à l'application SiWaWa 2.0.....	50
3.2. L'application SiWaWa 2.0 : présentation des fonctionnalités et de l'interface utilisateur.....	51
3.2.1. Saisie des paramètres d'entrée.....	51
3.2.2. Visualisation de la structure et de l'évolution du peuplement.....	52
3.2.3. Modélisation des éclaircies .....	60
3.2.4. Sauvegarde et exportation des résultats.....	65
4. Placettes permanentes de suivi sylvicole (PPSS) : méthode de relevé et mise en valeur sur <a href="http://martelage.sylvotheque.ch">martelage.sylvotheque.ch</a> .....	67
4.1. Principaux objectifs des PPSS .....	67
4.2. Méthode de relevé sur le terrain.....	68
4.3. Réseau des PPSS.....	71
4.4. Plateforme internet <a href="http://martelage.sylvotheque.ch">martelage.sylvotheque.ch</a> .....	73

4.4.1.	Carte interactive offrant une vue d'ensemble de la localisation des PPSS .....	74
4.4.2.	Deux modes de visualisation des PPSS .....	75
4.4.3.	Affichage des statistiques spécifiques aux PPSS .....	78
5.	Données PPSS et validation de l'estimation de la distribution des diamètres par SiWaWa .....	81
5.1.	Tests sur la distribution des peuplements entiers .....	81
5.1.1.	Tests graphiques : comparaison des courbes des distributions estimées et de la distribution réelle.....	81
5.1.2.	Tests statistiques : Supremum et Anderson-Darling.....	85
5.2.	Tests sur la distribution des arbres concurrents et des arbres de place.....	89
5.2.1.	Tests graphiques : comparaison des courbes des distributions estimées et de la distribution réelle.....	89
5.2.2.	Tests statistiques : Supremum et Anderson-Darling.....	91
6.	Bilan et perspectives .....	93
7.	Références.....	96
Annexe A.	Liste complète des équations de SiWaWa Core (repris dans l'application SiWaWa 2.0)99	
Annexe B.	Indices de fertilité et unités phytosociologiques.....	110
Annexe C.	Evaluation de la distribution des diamètres estimée par SiWaWa 2.0 sur la base des données PPSS : exemple de fiche peuplement .....	111
Annexe D.	Evaluation de la distribution des diamètres estimée par SiWaWa 2.0 sur la base des données PPSS : exemple de fiche martelage .....	118

## Liste des abréviations

BFH	Haute école spécialisée bernoise
BFH-HAFL	Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires, département de la Haute école spécialisée bernoise
BFH-TI	Département technique et informatique de la Haute école spécialisée bernoise
DETA	Département de l'Environnement, des Transports et de l'Agriculture, République et Canton de Genève
DHP	Diamètre à Hauteur de Poitrine
DRO	Indices dendrométriques
EPFZ	Ecole polytechnique fédérale de Zürich
FBB	Forstbetrieb Bern (Entreprise forestière de la Bourgeoisie de Berne)
FOCUS	Advances in FOrestry Control and aUTomation Systems in Europe. FOCUS était un projet européen financé par le Septième programme-cadre de l'Union Européenne.
GPS	Global Positioning System
IT	Technologies de l'information
IUFRO	International Union of Forest Research Organizations.
MOTI	Mobile Timber cruise. MOTI est une application développée à la BFH.
OFEV	Office fédéral de l'environnement
PPSS	Placette Permanente de Suivi Sylvicole
SiWaWa	Simulation des Waldwachstums (Simulation de la croissance forestière)
WSL	Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage

## Notations et définitions des variables du modèle SiWaWa

<b><i>Age</i></b>	Âge (de la strate principal) du peuplement
<b><math>\tilde{d}</math></b>	Liste des diamètres individuels
<b><math>\tilde{d}_{conc}</math></b>	Liste des diamètres des arbres prélevés
<b><math>d_{dom}</math></b>	Diamètre moyen des arbres dominants
<b><math>d_g</math></b>	Diamètre quadratique moyen
<b><math>d_{g,conc}</math></b>	$d_g$ des arbres prélevés lors de l'éclaircie (les concurrents)
<b><math>d_{g,mort}</math></b>	$d_g$ des arbres morts par concurrence latérale
<b><math>d_{max}</math></b>	Diamètre de l'arbre de plus grand diamètre du peuplement
<b><math>d_{max,conc}</math></b>	$d_{max}$ des arbres prélevés lors de l'éclaircie
<b><math>d_{max,mort}</math></b>	$d_{max}$ des arbres morts
<b><math>d_{min}</math></b>	Diamètre de l'arbre de plus petit diamètre du peuplement
<b><math>d_{min,conc}</math></b>	$d_{min}$ des arbres prélevés lors de l'éclaircie
<b><math>d_{min,mort}</math></b>	$d_{min}$ des arbres morts
<b><math>\tilde{d}_{mort}</math></b>	Liste des diamètres des arbres morts
<b><i>G</i></b>	Surface terrière
<b><math>G_{conc}</math></b>	Surface terrière des arbres prélevés
<b><math>G_{cum}</math></b>	Surface terrière susjacente (individuelle)
<b><math>G_{max}</math></b>	Surface terrière maximum spécifique d'un peuplement
<b><math>G_{max,moyen}</math></b>	Surface terrière maximum moyenne d'un peuplement non-éclaircie
<b><math>G_{mort}</math></b>	Surface terrière des arbres morts
<b><math>G_{rec}</math></b>	Surface terrière recommandée
<b><math>\tilde{h}</math></b>	Liste des hauteurs individuelles
<b><math>h_{dom}</math></b>	Hauteur moyenne des arbres dominants
<b><i>HIL</i></b>	Coefficient de Hiley
<b><math>i_d</math></b>	Croissance radiale annuelle et individuelle
<b><i>IF</i></b>	Indice de fertilité
<b><i>N</i></b>	Nombre de tiges
<b><math>N_{conc}</math></b>	Nombre de tiges prélevées
<b><math>N_{mort}</math></b>	Nombre de tiges mortes
<b><i>NP</i></b>	Niveau de production du peuplement
<b><math>\tilde{v}</math></b>	Liste des volumes individuels
<b><i>V</i></b>	Volume total du peuplement

## Résumé

Ce rapport présente le travail de recherche et les résultats obtenus dans le cadre du projet « SiWaWa 2.0 et Placettes Permanentes de Suivi Sylvicole », mené à bien par l'équipe de sylviculture et de planification forestière de la Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires BFH-HAFL. Il a pour objectif de dresser un bilan de ce projet mais également de servir de document de référence pour les chercheurs qui travailleront aux prochains développements sur les thématiques concernées. Il peut également servir de guide technique aux praticiens forestiers et de document didactique à l'adresse d'étudiants en sciences forestières.

Le premier chapitre de ce rapport présente une documentation de la dernière version en date du modèle SiWaWa. Cette documentation décrit dans le détail la structure et le fonctionnement du modèle SiWaWa, ainsi que les méthodologies et les données ayant permis l'estimation de ses différentes équations.

Le deuxième chapitre décrit le processus de développement des différentes composantes informatiques gravitant autour du modèle SiWaWa, dont l'application pour smartphone SiWaWa 2.0. Ce chapitre présente également en détail le fonctionnement de l'interface de cette application.

Le troisième chapitre présente la méthodologie de mise en place de placettes permanentes de suivi sylvicole (PPSS) développée à la HAFL. Il décrit également le réseau test de PPSS qui a été mis en place dans les forêts de la Bourgeoisie de Berne, ainsi que l'outil informatique utilisé pour documenter et visualiser les relevés et les martelages réalisés sur les PPSS : [martelage.sylvotheque.ch](http://martelage.sylvotheque.ch).

Le quatrième chapitre propose une méthode de validation du modèle SiWaWa basée sur les données issues des PPSS et présente les résultats correspondants.

Enfin, la section 6 dresse un bilan du projet et trace des perspectives de développements futurs.

# 1. Introduction au projet « SiWaWa 2.0 et Placettes Permanentes de Suivi Sylvicole (PPSS) »

## 1.1. Contexte

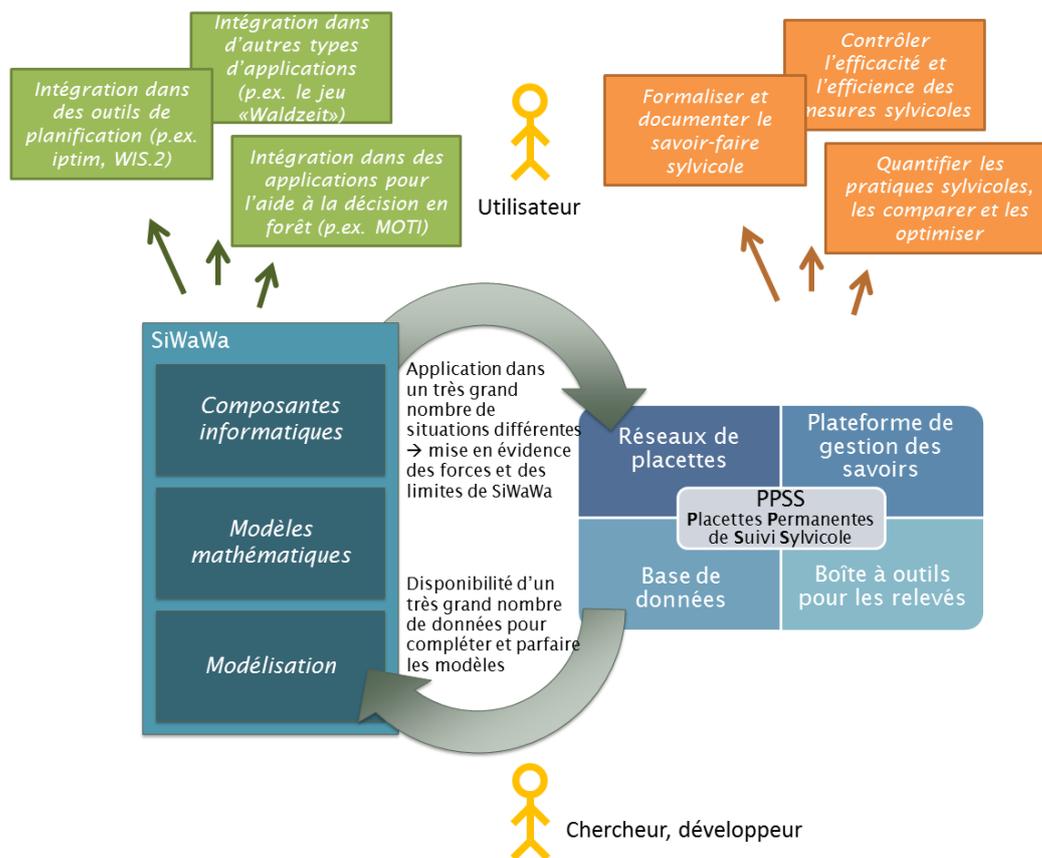
Quantifier ce que l'on voit en forêt et sa dynamique ? Disposer de données fiables et spécifiques pour la prise de décisions en forêt et comme base pour la planification forestière ? C'est possible grâce au modèle de simulation de croissance forestière SiWaWa.

SiWaWa est un modèle de simulation de la croissance forestière simple et performant, destiné aux professionnels de la forêt. SiWaWa présente le grand avantage de ne nécessiter qu'un nombre restreint de paramètres : la surface terrière par ha ( $G$ ), le nombre de tiges par ha ( $N$ ) et l'indice de fertilité ( $IF$ ) ou la hauteur dominante ( $h_{dom}$ ). Ces paramètres peuvent être obtenus facilement en forêt, par exemple avec l'application pour smartphone MOTI (cf. Rosset et al. 2017 et moti.ch). Un autre avantage de SiWaWa est de livrer des informations qui ne reflètent pas des moyennes selon des types de peuplements, mais qui sont spécifiques aux peuplements analysés (cf. Schütz et Zingg, 2007). SiWaWa procure des informations sur l'accroissement, l'évolution du matériel sur pied ou encore la mortalité, ainsi que sur la distribution des tiges par classes de diamètres. Il est possible de simuler des interventions sylvicoles, par exemple en préparation d'un martelage ou dans le cadre de la planification sylvicole. Le Prof. J.-P. Schütz est l'auteur de SiWaWa (cf. Schütz et Zingg, 2007). Une première version de SiWaWa a déjà été développée dans le cadre d'un projet financé par l'OFEV (Rosset et al. 2013).

J.-P. Schütz a poursuivi les développements sur SiWaWa, en particulier en développant des modèles de croissance pour le douglas, le pin sylvestre et le chêne. Il en a profité pour faire évoluer et parfaire la modélisation, par exemple en tendant vers une harmonisation des fonctions des modèles des différentes essences en vue de faciliter l'intégration de nouvelles essences, voire éventuellement de traiter des mélanges. Une autre nouveauté est de rendre l'utilisation des modèles plus flexible en proposant deux niveaux d'entrée des données, l'une conservant les paramètres  $G$ ,  $N$  et  $h_{dom}$  ou l'indice de fertilité  $IF$ , l'autre en y ajoutant le diamètre minimum ( $d_{min}$ ) et le diamètre maximum ( $d_{max}$ ) afin d'obtenir une plus grande précision des résultats de simulation. Cette nouvelle version représente la version 2.0 de SiWaWa.

L'enjeu est de rendre cette nouvelle version facilement accessible aux professionnels de la forêt et d'assurer la pérennité de SiWaWa en formalisant autant que possible l'expertise considérable de J.-P. Schütz. Pour ce faire, l'approche choisie dans ce projet ne se limite pas à la documentation du modèle SiWaWa et au développement d'une application informatique de cette nouvelle version du modèle de croissance, mais inclus la mise en place d'un réseau de placettes permanentes de suivi sylvicole (PPSS) au niveau d'une entreprise forestière afin de tester concrètement SiWaWa dans un grand nombre de situations tout en élargissant la base de données à disposition pour la modélisation. Les PPSS ont aussi pour vocation d'illustrer l'utilisation de SiWaWa en lien avec les pratiques sylvicoles à l'aide d'exemples concrets et instructifs.

La Fig. 1 donne une vue d'ensemble du système formé par SiWaWa et les PPSS ainsi que des avantages susceptibles d'en résulter pour les praticiens et les chercheurs.



**Fig. 1 : Vue d'ensemble du système formé par SiWaWa et les PPSS (Placettes Permanentes de Suivi Sylvicole)**

## 1.2. Objectifs du projet

Les objectifs principaux de ce projet sont triples et complémentaires :

- assurer la pérennité de SiWaWa en disposant de bases solides pour comprendre en détail les modèles et leur modélisation et être en mesure de les faire évoluer,
- renforcer l'outil pratique qu'est SiWaWa en mettant à disposition des utilisateurs une documentation détaillée et différenciée sur les points forts et les limites des modèles en les testant dans un très grand nombre de situations.
- mettre à disposition des gestionnaires forestiers une méthode simple et efficace pour quantifier et documenter leurs pratiques sylvicoles et assurer un suivi de leurs effets tout en servant en même temps de source de données en quantité suffisante et de qualité satisfaisante pour faire évoluer SiWaWa.

## 1.3. Organisation du projet et structure du présent rapport final

Le projet est organisé selon les trois orientations suivantes qui correspondent aussi à l'articulation du présent rapport.

### *Pérennisation du modèle SiWaWa et développement d'une application pour smartphones*

Ce travail a pour objectif de documenter et formaliser autant que possible l'expertise de J.-P. Schütz quant au modèle SiWaWa, afin de le pérenniser et de permettre le développement d'une application pour smartphone. Cette tâche s'appuie sur le travail déjà effectué dans le cadre du projet européen FOCUS ([www.focusnet.eu](http://www.focusnet.eu)), qui a notamment abouti au développement d'un premier prototype d'application.

Plusieurs tâches principales ont été accomplies au sein de cette thématique :

- Une documentation détaillée du modèle SiWaWa dans sa version 2.0 a été rédigée. Il s'agit du chapitre 2 de ce rapport. Ce chapitre forme un document qui peut être lu de manière indépendante. Elle est destinée non seulement à un public de scientifiques mais aussi aux professionnels de la forêt ou à des étudiants qui souhaitent obtenir plus de détails sur le fonctionnement de SiWaWa. Par ailleurs, à travers les tests de validation menés sur SiWaWa, le chapitre 5 présentent les points forts et les limites du modèle, ce qui peut intéresser les mêmes lecteurs.
- Sur la base du modèle SiWaWa, différentes composantes logicielles ont été développées, elles sont présentées dans le chapitre 3. L'élément central de ces composantes, SiWaWa Core programmée en java, permet l'intégration du modèle dans différents outils informatiques. Jusqu'à présent, SiWaWa Core a servi principalement au développement de l'application SiWaWa 2.0 pour smartphones fonctionnant sur Android, ainsi qu'au développement d'un package R (langage et environnement de programmation Open source pour travaux statistiques). Le processus de développement de SiWaWa Core est présenté en détail dans la section 3.1, l'interface et les différentes fonctionnalités de l'application pour smartphone SiWaWa sont décrites dans la section 3.2.
- Un bilan de l'état actuel du modèle SiWaWa a également été dressé et des perspectives de développement ou d'améliorations futures ont été identifiées, ils sont présentés dans le chapitre 6.

Par ailleurs, ces différentes tâches ont permis à plusieurs collaborateurs de la HAFL de se familiariser avec la structure et les équations de SiWaWa, ce qui permet une pérennisation intangible mais cruciale du modèle à travers un capital humain.

### *Placettes permanentes de suivi sylvicole (PPSS) : développement d'une méthode de relevé et mise en place d'un réseau test*

Ce travail a pour objectif de disposer d'une méthode de relevés pratique, simple et efficace, destinée à des placettes permanentes de suivi sylvicole et permettant de documenter et de quantifier les pratiques sylvicoles et leurs conséquences à court, moyen et long-terme. La deuxième étape consiste au développement d'un réseau test de PPSS sur la base de cette méthode.

Au sein de cette thématique, les tâches suivantes ont été effectuées :

- une méthode de relevés des PPSS susceptible d'être utilisée dans une entreprise forestière a été développée. Elle est présentée en section 4.2 ;
- à ce jour, 28 PPSS ont été mises en place dans les forêts de l'entreprise forestière de la Bourgeoisie de Berne (FBB) afin de tester le dispositif. Le dispositif est d'ores et déjà utilisé par la FBB pour assurer un suivi de ses pratiques sylvicoles et par la HAFL à

des fins de recherche et de développement, et à des fins de formation, voir section 4.4 ;

- une application internet, [martelage.sylvotheque.ch](http://martelage.sylvotheque.ch), a été adaptée et complétée, de sorte à centraliser l'information sur les PPSS et à la rendre facilement accessible à tout utilisateur potentiel. La plateforme permet également à l'utilisateur de réaliser facilement un martelage en ligne ou d'importer les résultats d'un martelage réalisé sur le terrain. Cette plateforme est présentée en section 4.4.

#### *Validation de SiWaWa au moyen de données externes*

Dans le cadre de ce projet, plusieurs séries de tests ont été menés afin d'évaluer la fiabilité de l'estimation de la distribution des diamètres réalisée par SiWaWa. Pour ce faire, les données des PPSS ont été utilisées, c'est-à-dire des données n'ayant pas été utilisées dans l'estimation du modèle.

Plus précisément :

- les données de 24 PPSS ont été utilisées pour tester la fiabilité de l'estimation par SiWaWa des distributions de diamètres avant intervention. Les méthodes de test utilisées et un résumé des résultats sont présentés en section 5.1 ;
- les données de 11 martelages réalisés sur 8 PPSS, ont été utilisées pour tester la fiabilité de l'estimation par SiWaWa des distributions de diamètres pour les arbres de places et les arbres concurrents. Les méthodes de test utilisées et un résumé des résultats sont présentés en section 0 ;

Ce projet a été mené à bien du 15 janvier 2016 au 31 décembre 2017 au sein de l'équipe de sylviculture et de planification forestière de la Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires (HAFL), département de la Haute école spécialisée bernoise BFH, en collaboration avec l'entreprise forestière de la Bourgeoisie de Berne (FBB) pour la mise en place du réseau de PPSS et l'équipe d'Ulrich Fiedler du département Technique et Informatique de la BFH (BFH-TI) pour le développement d'une nouvelle version de l'application internet [martelage.sylvotheque.ch](http://martelage.sylvotheque.ch) pour la gestion des données PPSS et la documentation en ligne de martelages.

## 2. SiWaWa, un modèle d'inventaire et de croissance à l'échelle du peuplement

Jean-Philippe Schütz, Gaspard Dumollard, Christian Rosset

### 2.1. Introduction

La famille des modèles sylvicoles SiWaWa a été conçue pour obtenir la meilleure performance prédictive de l'état constitutif et de l'évolution de peuplements pris individuellement, en fonction des données de départ les plus simples et faciles à obtenir. Ces données correspondent essentiellement à la surface terrière  $G$  et au nombre de tiges  $N$  par hectare, ainsi qu'à l'indice de fertilité  $IF$ . SiWaWa est l'acronyme du terme allemand "*Simulation des Waldwachstums*", ou simulation de la croissance des forêts. Il s'applique à des peuplements purs et équiennes.

Une des principales réussites dans la conception de SiWaWa est d'avoir développé une solution performante d'estimation des distributions des diamètres sur la base de la fonction de Weibull (Bailey et Dell, 1973), en partant quasi uniquement de  $G$  et  $N$  du peuplement principal considéré. Cette estimation constitue le cœur des modèles SiWaWa, car une fois la distribution des diamètres connue, tous les éléments de structure peuvent être aisément déterminés, pour autant de connaître correctement la troisième dimension, à savoir la hauteur pour chaque arbre. Un autre point fort de SiWaWa est de réaliser des estimations spécifiques à une essence donnée (parmi les chênes, épicéas, hêtres, douglas, pins sylvestres et frênes) et à un peuplement donné, ce dernier étant identifié par certaines de ses caractéristiques dendrométriques ( $d_g$ ,  $G$ ,  $N$ ,  $d_{min}$ ,  $d_{max}$ ,  $d_{dom}$ , ...). Ce type d'estimations spécifiques permet une modélisation proche de la réalité. Enfin, SiWaWa n'utilise pas l'âge comme variable d'entrée, celui-ci est à la place calculé par le modèle. L'âge du peuplement étant le plus souvent inconnu par l'utilisateur, cette caractéristique permet un usage plus général de SiWaWa.

Utiliser la surface terrière comme entrée principale du modèle s'avère d'autant plus intéressant que celle-ci contient en soi aussi bien le potentiel de croissance (*carrying capacity*) que le principal indicateur de densité structurelle (Schütz, 2008) et se prête ainsi à une bonne estimation du volume sur pied. Les problèmes liés à la compétition au sein du peuplement peuvent se résoudre autrement que par la connaissance des distances, notamment par la position sociale au sein du peuplement exprimée par la surface terrière susjacente,  $G_{cum}$ , c'est-à-dire la somme des surfaces terrières des arbres plus gros que l'arbre considéré.  $G_{cum}$  s'avère être un bon prédicteur des variations de l'accroissement en diamètre. Cet indicateur s'avère valable aussi bien dans le cas des peuplements irréguliers (Schütz, 1975) que dans celui des peuplements équiennes (Schütz, 2006).

L'objectif des modèles SiWaWa est de rendre l'état structurel et la croissance d'un peuplement concrets pour leur utilisateur. Ces modèles ambitionnent donc d'être facilement accessibles pour tout type d'utilisateur à travers une interface ergonomique, et d'être fonctionnellement interactifs, c'est-à-dire que l'utilisateur peut intervenir sur certaines variables de simulation (cf. Schütz et Rosset, 2016). Ils se prêtent ainsi à l'analyse diagnostique, notamment à travers la réalisation d'inventaires, et à l'aide à la décision sylvicole, notamment quant à l'urgence et la force des interventions à prévoir, en comparant par exemple la situation momentanée du peuplement observé à différentes positions indicatrices de densité.

Les modèles SiWaWa permettent de visualiser la position d'un peuplement donné par rapport aux deux références que sont la densité maximale et la courbe de densité correspondant à un régime d'interventions proposé (dans ce cas la pratique de l'éclaircie sélective suisse selon Schädelin, 1934). L'utilisateur peut donc apprécier l'état de densité du peuplement en

question, et ainsi définir l'urgence d'une prochaine intervention et son intensité, qu'il peut ensuite simuler dans le module "éclaircies" de SiWaWa pour validation.

L'évolution des techniques de l'information et notamment le développement des smartphones, aujourd'hui véritables ordinateurs de poche ambulants, rend par ailleurs possible l'application de tels modèles directement au niveau du terrain, là où la décision sylvicole se prend. Cela permet de réussir la gageure d'amener l'ordinateur là où il est le plus utile : en forêt même. Un bon modèle permet de simuler et comparer l'effet de différentes trajectoires de traitement et devient ainsi un intéressant outil dans la recherche des solutions les plus appropriées.

La version du modèle SiWaWa 2.0 et l'application pour smartphones (Android) correspondante, développée au sein de l'équipe de sylviculture et de planification forestière de la HAFL de Zollikofen, ont été conçues dans l'optique de permettre ce travail de terrain. Un soin tout particulier a été porté à l'ergonomie de l'application qui vise un public de professionnels de la forêt, au premier rang desquels les gestionnaires.

De surcroît, certains capteurs des smartphones peuvent être utilisés comme instruments de mesure en forêt, tels que l'optique embarquée pour la mesure d'angles et la mise à disposition d'un rendu visuel performant sur écran (résolution, luminosité, contraste) avec la possibilité d'effectuer des agrandissements d'image. L'équipe de sylviculture et de planification forestière de la HAFL a ainsi développé une application pour smartphones permettant la mesure de la surface terrière à l'hectare  $G$  (selon la méthode de Bitterlich, 1984) ainsi que la mesure du nombre de tiges à l'hectare  $N$  et de la hauteur  $h$  (voir Rosset et al. (2017) et [moti.ch](http://moti.ch)). Le smartphone intègre ainsi tout ce dont l'utilisateur de SiWaWa a besoin. Le véritable paradigme est ainsi de mettre à disposition du praticien-décideur des simulateurs complexes et performants, aisément compréhensibles, faciles d'accès et d'utilisation.

L'ensemble de ce chapitre a pour double objectif de servir de guide technique pour les utilisateurs du modèle SiWaWa et de support didactique pour l'enseignement de la sylviculture. Le chapitre est organisé comme suit :

- la section 0 présente les données utilisées pour l'estimation des équations du modèle SiWaWa,
- la section 2.3.1 présente les différentes variables utilisées dans SiWaWa,
- la section 2.3.2 porte sur les équations du modèle impliquées dans la détermination de la structure des peuplements
- la section 2.3.3 porte sur les équations impliquées dans la détermination de la croissance des peuplements
- enfin, la section 2.3.4 présente les équations liées à la simulation des éclaircies.

La méthode utilisée pour l'estimation de chaque équation du modèle est systématiquement décrite dans les sections correspondantes. Par ailleurs, l'Annexe A présente l'ensemble des équations de SiWaWa telles qu'elles sont introduites dans l'application pour smartphone, y compris les valeurs numériques des coefficients estimés par régression.

Le modèle SiWaWa et ses applications concrètes sont par ailleurs présentés dans deux publications : Schütz et Rosset (2016), et Schütz et al. (2016).

## 2.2. Les données utilisées pour l'estimation du modèle SiWaWa

SiWaWa étant un modèle empirique, ses équations ont été estimées ou calibrées sur la base de données sylvicoles. En l'occurrence, afin d'obtenir un maximum de données pour toutes les essences et pour toutes les phases de développement d'un peuplement, les données provenant de plusieurs sources, assez diverses, ont été compilées.

La majorité des données provient de la base de données sur la croissance et la production forestière de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, le WSL, en Suisse (Schütz et Zingg, 2007, 2010)<sup>1</sup>. La base de données du WSL s'appuie sur un vaste réseau de placettes d'essai réparties sur tout le territoire suisse. Plus précisément, 390 placettes font à l'heure actuelle l'objet d'un suivi et la base dispose d'informations sur 1332 parcelles d'environ 0.25 hectares en moyenne dont certaines sont suivies depuis l'origine du dispositif, c'est-à-dire depuis 1886. Pour chaque parcelle suivie, un relevé complet des diamètres de tous les arbres est réalisé et ce, régulièrement au fil du temps, c'est-à-dire tous les 4 à 7 ans. Cette connaissance de la distribution des diamètres et de son évolution au cours du temps permet d'estimer à la fois les paramètres impliqués dans le modèle de structure (voir section 2.3.2) et les paramètres impliqués dans le modèle de croissance (voir section 2.3.3). La base du WSL porte principalement sur des forêts exploitées mais comprend également des données sur des forêts non-exploitées, à titre de comparaison. Par ailleurs, pour chaque placette du WSL, les hauteurs individuelles de 5 à 10% des tiges sont connues.

Les données du WSL sont complétées par plusieurs sources complémentaires, en particulier les données de la chaire de sylviculture de l'Ecole polytechnique fédérale de Zürich EPFZ. Les données de l'EPFZ sont de plusieurs types (Schütz et Zingg, 2010), il y a tout d'abord les essais d'éclaircies de Breitenacker (cf. Vanomsen, 2006) et quelques placettes de suivi permanent localisées dans la réserve forestière naturelle de Saint-Ursanne (canton du Jura). Ces deux types de placettes ont fait l'objet de mesures répétées au fil du temps, tout comme les placettes d'essai du WSL. Toutefois, les données de l'EPFZ contiennent aussi un certain nombre de placettes ayant été inventoriées une seule fois, le plus souvent dans le cadre de l'enseignement, dans l'ancienne forêt d'enseignement de l'EPFZ.

Ensuite, de nombreuses données issues d'autres essais d'éclairci viennent renforcer notre base. A savoir, les essais de Göggingen (Bad-Wurtemberg, Allemagne) sur l'épicéa (cf. Huss, 1998), les essais de Gludsted et de Ravenholt (Danemark) également sur l'épicéa (cf. Bryndum, 1969, 1974), les essais de Neuendorf (canton de Soleure, Suisse) sur le douglas (cf. Schütz et al. 2015) et les essais de l'Oregon (Etats-Unis) également sur le douglas (cf. Bailey et Tappeiner, 1998).

Certaines données supplémentaires sur les forêts non-éclaircies (utiles notamment pour déterminer les références de densité maximale, cf. section 2.3.3.2) ont également été utilisées pour compléter notre base. Les données issues des travaux de thèse d'Ammann (2004) portant sur la dynamique des jeunes peuplements non-éclaircis constituent l'essentiel de ces données (zones centrales et orientales du plateau suisse). Les données d'Ammann ont été complétées, en particulier pour les vieux peuplements, par des données venant de la forêt vierge de Kosodrevina en Slovaquie (cf. Schütz and Zingg, 2010) et des variantes nulles d'essais d'éclaircie menés sur le pin sylvestre en République Tchèque (cf. Chroust, 2001) et des essais de Gludsted et de Ravenholt (voir ci-dessus).

Enfin, les indices dendrochronologiques définis par Bräker (1989) sont utilisés pour corriger les données sur la croissance radiale par rapport aux variations annuelles et à la tendance de

---

<sup>1</sup> Voir <http://www.wsl.ch/fr/a-propos-du-wsl/installations-experimentales-et-laboratoires/sites-experimentaux-en-foret/croissance-et-productivite.html> pour une liste complète de publications.

long terme (cf. section 2.3.3.1). Ces indices sont déterminés grâce aux relevés SANASILVA du WSL (Dobbertin et al., 2001). L'indice dendrochronologique pour l'épicéa a par ailleurs été ajusté grâce à des données complémentaires provenant du laboratoire de dendrochronologie de Neuchâtel.

Les données ainsi compilées se veulent les plus représentatives possibles de tous les stades de développement d'un peuplement et ce, pour les six essences présentes dans SiWaWa 2.0 : chêne, épicéa, hêtre, douglas, pin sylvestre et frêne.

Les données doivent également permettre d'estimer les équations pour chaque problématique particulière abordée dans SiWaWa. Plus précisément, les données nécessaires à l'estimation ne sont pas forcément les mêmes d'une équation à l'autre. Autrement dit, l'estimation de chaque équation se fait sur une partie seulement des données :

- Distribution des diamètres (section 2.3.2.1) : il faut des placettes pour lesquelles des inventaires complets des diamètres individuels ont été réalisés. A noter toutefois que le seuil d'inventaire correspond généralement à un diamètre limite de 7.5 cm. En outre, les distributions manifestement tronquées, pour quelque raison que ce soit (méthodologie d'inventaire, éclaircie récente, dommages naturels), ont été écartées.
- Âge (section 2.3.2.2) : il faut que celui-ci soit connu, ce qui est presque toujours le cas pour les placettes qui font l'objet d'un suivi permanent mais aussi pour les relevés uniques lorsque des souches d'arbres abattus récemment ont permis sa détermination par le comptage des cernes. Par convention, l'âge zéro correspond à la date de germination de la semence. Lors du comptage des cernes, il faut donc ajouter le nombre d'années jusqu'à la hauteur de la souche.
- Hauteur dominante et indice de fertilité (section 2.3.2.2) : il faut des placettes pour lesquelles la hauteur dominante et l'indice de fertilité sont tous les deux connus.
- Hauteurs individuelles (section 2.3.2.3) : pour estimer la relation entre hauteurs et diamètres individuels, il faut pour une placette donnée connaître la hauteur individuelle d'un nombre suffisant de tiges (au moins 15 tiges).
- Croissance radiale (section 2.3.3.1), il faut au moins deux mesures d'un peuplement à deux dates différentes ; tous les relevés uniques sont inutilisables.
- Densités maximales (section 2.3.3.2) : pour estimer la densité maximale moyenne, il faut des données sur des peuplements non-éclaircis.
- Densité recommandée (section 2.3.4.1) : la surface terrière recommandée est estimée sur la base des peuplements traités selon la pratique de l'éclaircie sélective par le haut selon Schädelin (1934) sous ses différentes formes. Dans ce cas, les données relevées avant les années 40 (pour la Suisse) ne sont pas prises en compte.

Cette sélection des données, propre à chaque équation estimée, fait que le nombre d'observations varie d'une régression à l'autre, comme le montre le tableau suivant :

**Tab. 1 : Nombre d'observations respectives pour chacune des principales régressions de SiWaWa**

Grandeur dendrométrique considérée	Variable endogène (y) de l'équation de régression	Nombre d'observations
Distribution des diamètres (section 2.3.2.1)	$d_{min}, d_{max}$ respectivement	Nombre de peuplements pour $d_{min}/d_{max}$ (resp.) : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chêne : 218, 218</li> <li>• Epicéa : 539, 539</li> <li>• Hêtre : 665, 666</li> <li>• Douglas : 224, 224</li> <li>• Pin sylvestre : 508, 508</li> <li>• Frêne : 80, 80</li> </ul>
	Paramètres de la fonction de Weibull : $\alpha + \beta$	Nombre de peuplements <sup>2</sup> : 425
Âge (section 2.3.2.2)	<i>Age</i>	Nombre de peuplements : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chêne : 218</li> <li>• Epicéa : 819</li> <li>• Hêtre : 661</li> <li>• Douglas : 230</li> <li>• Pin sylvestre : 505</li> <li>• Frêne : 157</li> </ul>
Hauteur dominante et indice de fertilité (section 2.3.2.2)	Paramètres de la fonction de Näslund : $a_{ess,IF}, b_{ess,IF}, c_{ess}$ respectivement	Nombre de peuplements : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chêne : 163</li> <li>• Epicéa : 226</li> <li>• Hêtre : 366</li> <li>• Douglas : 95</li> <li>• Pin sylvestre : 72</li> <li>• Frêne : 14</li> </ul>
Hauteurs individuelles (section 2.3.2.3)	Paramètre de l'équation des hauteurs individuelles : $c_{ess,1}$	Nombre d'arbres : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chêne : 163</li> <li>• Epicéa : 226</li> <li>• Hêtre : 366</li> <li>• Douglas : 110</li> <li>• Pin sylvestre : 177</li> <li>• Frêne : 36</li> </ul>

<sup>2</sup> Lorsque le nombre de peuplements n'est pas distingué par essence, cela signifie que la régression est réalisée sur l'ensemble des essences.

Croissance radiale (section 2.3.3.1)	Paramètres de la fonction de croissance $\alpha, G_{cum,ext}, \gamma$ respectivement	Nombre de périodes de croissance <sup>3</sup> observées : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chêne : 174, 167, 163</li> <li>• Epicéa : 315, 313, 314</li> <li>• Hêtre : 495, 504, 345</li> <li>• Douglas : 1009, 128, 192</li> <li>• Pin sylvestre : 177, 177, 177</li> <li>• Frêne : 24, 24, 24</li> </ul>
Densités maximales (section 2.3.3.2)	$G_{max-moyen}$	Nombre de peuplements : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chêne : 50</li> <li>• Epicéa : 148</li> <li>• Hêtre : 158</li> <li>• Douglas : 37</li> <li>• Pin sylvestre : 54</li> <li>• Frêne : 23</li> </ul>
	Niveau de production ( $NP$ )	Nombre de peuplements : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chêne : 160</li> <li>• Epicéa : 75</li> <li>• Hêtre : 336</li> <li>• Douglas : 170</li> <li>• Pin sylvestre : 163</li> <li>• Frêne : 63</li> </ul>
Densité recommandée et éclaircies (sections 2.3.4.1 et 2.3.4.2)	$G_{rec}$	Nombre de peuplements : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chêne : 0</li> <li>• Epicéa : 78</li> <li>• Hêtre : 85</li> <li>• Douglas : 49</li> <li>• Pin sylvestre : 57</li> <li>• Frêne : 20</li> </ul>
	$HIL$	Nombre de peuplements : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chêne : 0</li> <li>• Epicéa : 78</li> <li>• Hêtre : 85</li> <li>• Douglas : 49</li> <li>• Pin sylvestre : 57</li> <li>• Frêne : 20</li> </ul>

Enfin, ce rapport présente également différents tests du modèle SiWaWa 2.0 basés sur des données n'ayant pas servi à l'estimation du modèle.

### 2.3. Les équations du modèle SiWaWa et leur estimation

Cette section a pour objectif de présenter les variables et les équations qui composent le modèle SiWaWa mais aussi et surtout de présenter et d'expliquer les différentes méthodologies qui ont permis d'établir ces équations.

<sup>3</sup> Une période de croissance correspond à la mesure de la croissance d'un peuplement donné (sur tous les arbres) pour une période de temps donné.

### 2.3.1. Vue d'ensemble des variables d'entrée et de sortie

Cette section présente une liste exhaustive des variables du modèle SiWaWa 2.0 et de leurs relations d'interdépendance.

Le Tab. 2 ci-dessous présente les différentes variables d'entrée de SiWaWa 2.0, obligatoires comme optionnelles :

**Tab. 2 : Variables d'entrée du modèle SiWaWa 2.0**

Abréviation variable	Nom complet	Variable optionnelle	Unité
$G$	Surface terrière	Non	m <sup>2</sup> /ha
$N$	Nombre de tiges	Non	#/ha
$h_{dom}$	Hauteur moyenne des arbres dominants <sup>4</sup>	1 ou 2 à entrer parmi les 3 (4 cas de figure)	m
$IF$	Indice de fertilité (= $h_{dom}$ à 50 ans)		m
$Age$	Âge (de la strate principale) du peuplement		année
$d_{min}$	Diamètre minimum du peuplement		Oui
$d_{max}$	Diamètre maximum du peuplement	Oui	cm
$\%écl$	% de la surface terrière prélevée lors de l'éclaircie	Oui	%

De manière générale, les variables mentionnées dans ce rapport respectent les conventions IUFRO<sup>5</sup>. Ainsi, les grandeurs dendrométriques désignées par des majuscules, en particulier,  $G$  et  $N$  et  $V$  (voir Tab. 3) désignent des valeurs à l'hectare.

Par ailleurs, les variables présentées portent toujours sur la strate principale du peuplement, c'est-à-dire sur une seule génération d'arbre. Et dans ce rapport, le terme peuplement fait toujours référence à la strate principale et seulement aux arbres vivants.

Le Tab. 3 ci-dessous présente une liste exhaustive des variables de sortie et des variables intermédiaires de calcul du modèle SiWaWa 2.0. Les variables composées de plusieurs variables simples mais qui ont un sens sylvicole ont été indiquées en l'état. Par exemple  $\frac{G}{d_g}$ , qui constitue un indicateur simplifié de la densité du peuplement.

**Tab. 3 : Variables de sortie (et intermédiaires) du modèle SiWaWa 2.0**

Abréviation variable	Nom complet	Variables permettant le calcul	Unité
<b>Liste des diamètres</b>			
$d_g$	Diamètre <sup>6</sup> quadratique moyen	Init : $G, N$ puis $\tilde{d}$	cm
$d_{min}$	Diamètre de l'arbre de plus petit diamètre du peuplement	Init : $d_g, \frac{G}{d_g}$ puis $\tilde{d}$	cm
$d_{max}$	Diamètre de l'arbre de plus grand diamètre du peuplement	Init : $d_g, \frac{G}{d_g}$ puis $\tilde{d}$	cm
$\tilde{d}$	Liste des diamètres individuels	$N, d_g, d_{min}, d_{max}$	NA
$d_{dom}$	Diamètre moyen des 100 arbres de plus gros diamètres	$\tilde{d}$	cm
<b>Triptyque <math>Age/h_{dom}/IF</math></b>			
$Age$	Âge du peuplement	$d_g, (d_{max} - d_g), \frac{G}{d_g}, \frac{G}{G_{max-moyen}}, \frac{G}{G_{max}}, IF$ (dépend de l'essence)	année
$h_{dom}$	Hauteur moyenne des arbres dominants	$Age, IF$	m
$IF$	Indice de fertilité	$Age, h_{dom}$	m
<b>Hauteurs et volumes individuels</b>			

<sup>4</sup> Les 100 arbres de plus gros diamètres à l'hectare.

<sup>5</sup> [https://www.wsl.ch/forest/waldman/vorlesung/ww\\_tk131.ehtml](https://www.wsl.ch/forest/waldman/vorlesung/ww_tk131.ehtml)

<sup>6</sup> Tous les diamètres sont donnés à hauteur de poitrine, c'est-à-dire 1m30 de hauteur.

$\tilde{h}$	Liste des hauteurs individuelles	$\tilde{d}, h_{dom}, d_{dom}$	m
$\tilde{v}$	Liste des volumes individuels	$\tilde{d}, \tilde{h}$	
$V$	Volume total du peuplement	$\tilde{v}$	m <sup>3</sup> /ha
<b>Croissance radiale</b>			
$G_{cum}$	Surface terrière susjacente (individuelle)	$\tilde{d}$	m <sup>2</sup> /ha
$i_d$	Croissance radiale annuelle et individuelle	$G_{cum}, d_g, d_{dom} - d_g, d_{max} - d_g,$ $\frac{d_{dom} - d_g}{d_g}, \frac{d_{max} - d_g}{d_g},$ $G, \frac{G}{d_g}, G_{max}, \frac{G}{G_{max}}, IF, Age$ (dépend de l'essence)	mm/an
<b>Densité maximale et mortalité naturelle</b>			
$G_{max,moyen}$	Surface terrière maximum moyenne d'un peuplement non-éclaircie	$d_g$	m <sup>2</sup> /ha
$G_{max}$	Surface terrière maximum spécifique d'un peuplement	$d_g, d_{dom} - d_g, \frac{d_{dom} - d_g}{d_g}, G, G_{max-moyen}, \frac{G}{G_{max-moyen}}$ (dépend de l'essence)	m <sup>2</sup> /ha
$NP$	Niveau de production du peuplement	$G_{max,moyen}, G_{max}$	NA
$G_{mort}$	Surface terrière des arbres morts	$G, G_{max}$	m <sup>2</sup> /ha
$d_{g,mort}$	$d_g$ des arbres morts par concurrence latérale	$d_g, d_{min}$	cm
$d_{min,mort}$	$d_{min}$ des arbres morts	$d_{min}$	cm
$d_{max,mort}$	$d_{max}$ des arbres morts	$d_g$	cm
$N_{mort}$	Nombre de tiges mortes	$G_{mort}, d_{g,mort}$	#/ha
$\tilde{d}_{mort}$	Liste des diamètres des arbres morts	$N_{mort}, d_{g,mort}, d_{min,mort}, d_{max,mort}$	NA
<b>Éclaircies</b>			
$HIL$	Coefficient de Hiley	$d_g$	NA
$G_{conc}$	Surface terrière des arbres prélevés	$G, \%écl$	
$d_{g,conc}$	$d_g$ des arbres prélevés lors de l'éclaircie (les concurrents)	$HIL, d_g$	cm
$d_{min,conc}$	$d_{min}$ des arbres prélevés lors de l'éclaircie	$d_{min}$	cm
$d_{max,conc}$	$d_{max}$ des arbres prélevés lors de l'éclaircie	$d_{max}$	cm
$N_{conc}$	Nombre de tiges prélevées	$d_{g,conc}, G_{conc}$	
$\tilde{d}_{conc}$	Liste des diamètres des arbres prélevés	$N_{conc}, d_{g,conc}, d_{min,conc}, d_{max,conc}$	NA
$G_{rec}$	Surface terrière recommandée	$d_g$	m <sup>2</sup> /ha

La Fig. 2 ci-dessous présente une cartographie simplifiée de l'interdépendance entre les variables qui sont impliquées dans le volet inventaire de SiWaWa 2.0, organisées par grandes catégories : surfaces terrières, diamètres et hauteurs. Le rôle central du diamètre quadratique moyen  $d_g$  est clairement mis en évidence.

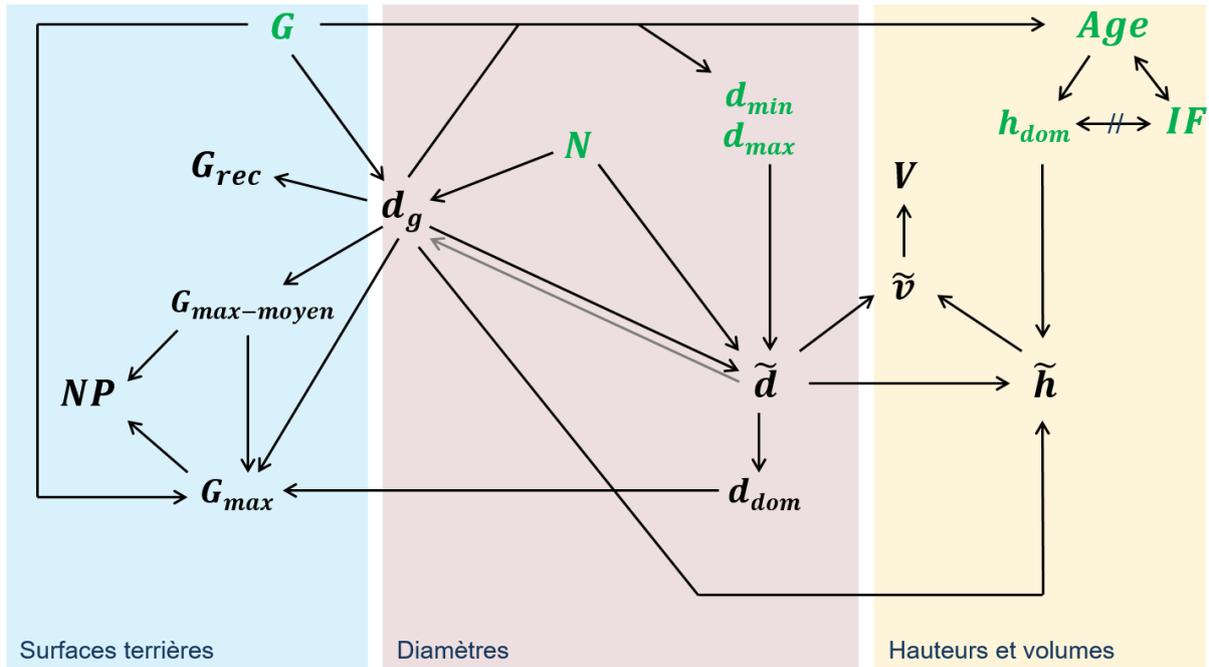


Fig. 2 : Cartographie simplifiée de l'interdépendance entre les variables impliquées dans le volet inventaire de SiWaWa 2.0 (en vert : les variables entrées par l'utilisateur)

La Fig. 3 ci-dessous présente une cartographie simplifiée de l'interdépendance entre les variables impliquées dans le volet dynamique des peuplements de SiWaWa 2.0, organisées selon les trois grands déterminants de l'évolution des peuplements dans SiWaWa : mortalité naturelle, éclaircie et croissance.

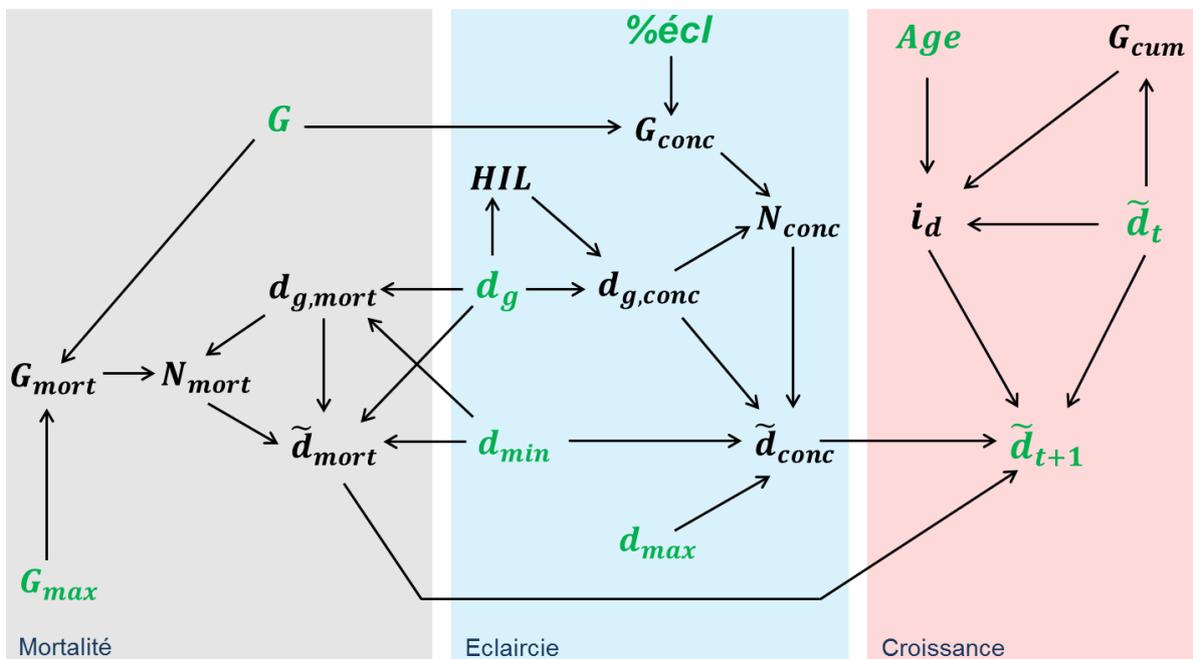


Fig. 3 : Cartographie simplifiée de l'interdépendance entre les variables impliquées dans le volet dynamique des peuplements de SiWaWa 2.0 (en vert : les variables entrées par l'utilisateur ou calculées par le modèle d'inventaire)

En plus des variables présentées ci-dessus, les équations de SiWaWa sont définies grâce à de nombreux paramètres pour lesquels des conventions d'écriture ont été adoptées dans la suite de ce document. Les paramètres correspondant à des formes fonctionnelles bien particulières telles que la fonction de Weibull (cf. section 2.3.2.1), la fonction hyperbolique de Näslund (cf. section 2.3.2.2) ou encore l'équation décrivant la croissance radiale (cf. section 2.3.3.1) sont écrits en caractères grecs ( $\alpha, \beta, \gamma$ ).

Les paramètres de régression correspondant à des équations linéaires classiques sont notés  $C_i$ . Ces coefficients sont indicés séparément pour chaque équation à partir de  $C_0$ . Par ailleurs un indice *ess* indique qu'un coefficient prend une valeur spécifique pour chaque essence. L'indice *ch* indique que le coefficient en question est donné à titre d'exemple pour le chêne. Dans certaines équations, des coefficients correspondant à des exposants sont notés  $e_i$ .

Les termes techniques, dont les noms de méthodes, sont indiqués en italique.

## 2.3.2. SiWaWa et la structure des peuplements

La première grande fonctionnalité de SiWaWa consiste à estimer la structure d'un peuplement dans ses dimensions principales et en détail. Cette estimation est réalisée en trois étapes principales successives. Tout d'abord, une liste de diamètres individuels,  $\tilde{d}$ , caractéristique du peuplement est générée à partir d'une information succincte sur ce peuplement. Puis, l'estimation des valeurs manquantes du triptyque *Age/h<sub>dom</sub>/IF* est complétée sur la base de  $\tilde{d}$ . Enfin, les hauteurs et les volumes individuels sont déterminés à partir de  $\tilde{d}$  et de  $h_{dom}$ .

### 2.3.2.1. Distribution des diamètres

L'estimation de la distribution des diamètres par SiWaWa est réalisée sur la base d'une distribution de Weibull (Bailey et Dell, 1973) et repose sur une méthode d'estimation originale alliant approches analytiques et empiriques. La partie empirique de la méthode SiWaWa est une *approche par la prédiction des paramètres* (cf. Newton, 2004).

Cette méthode constitue le cœur des modèles SiWaWa et offre une précision permettant son usage dans la pratique de la gestion sylvicole (voir section 5).

#### *La fonction de Weibull et ses paramètres*

Les fonctions de Weibull (Weibull, 1951) constituent une famille de lois de distribution dont l'usage est particulièrement répandu, et ce dans un grand nombre de disciplines. Ces fonctions, en particulier la forme à trois paramètres, sont en effet très flexibles et sont capables de s'ajuster sur des distributions empiriques d'aspects très divers, y compris sur des distributions asymétriques.

La densité de probabilité de la forme à trois paramètres est donnée par l'équation ci-dessous :

$$f(x) = \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{x - \alpha}{\beta} \right)^{\gamma-1} \cdot \exp\left( - \left( \frac{x - \alpha}{\beta} \right)^\gamma \right), \quad (\beta, \gamma) > \mathbf{0}, x \geq \alpha \quad (1)$$

La fonction de répartition correspondante est donnée par l'équation suivante :

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x - \alpha}{\beta}\right)^\gamma\right) \quad (2)$$

$\alpha$  est le paramètre de seuil, il définit la limite « à gauche » de la distribution et permet ainsi de la positionner sur l'axe des abscisses.  $\beta$  est le paramètre d'échelle, il détermine à la fois la position de la distribution par rapport au seuil et son aplatissement.  $\gamma$  est le paramètre de forme, il détermine entre autres l'asymétrie de la distribution.  $\alpha + \beta$  correspond analytiquement au 63.2<sup>e</sup> percentile des données (Bailey et Dell, 1973).

Cette fonction de Weibull à trois paramètres est utilisée dans SiWaWa pour déterminer la distribution des diamètres par le nombre de tiges.

#### *Ajustement de la fonction de Weibull sur la distribution du peuplement*

Lorsque la distribution empirique est connue dans son intégralité, une estimation par le *maximum de vraisemblance* est en général utilisée pour ajuster la fonction de Weibull. Toutefois, dans notre cas, la distribution est inconnue et l'objectif est justement de l'estimer grâce à une fonction de Weibull et sur la base de variables dendrométriques qui n'apportent qu'une information partielle sur la distribution (Schütz, 2006, Schütz et al., 2016 ; Schütz et Mandallaz, en cours de publication). En l'occurrence, les variables connues sont  $N$  et  $G$ , qui vont permettre de déterminer trois diamètres caractéristiques : le diamètre quadratique moyen  $d_g$ , le plus petit diamètre du peuplement  $d_{min}$  et le plus gros diamètre  $d_{max}$ . Ces trois diamètres caractéristiques et  $N$  vont ensuite permettre de déterminer la distribution des diamètres.

- Détermination de  $d_g$ ,  $d_{min}$  et  $d_{max}$

Dans un premier temps,  $d_g$  peut-être facilement calculé à partir de la surface terrière à l'hectare  $G$  et le nombre de tiges à l'hectare  $N$  (qui sont des variables d'entrée systématiques dans le modèle) grâce à l'identité suivante :

$$d_g = 200 \sqrt{\frac{G}{\pi N}} \quad (3)$$

$d_{max}$  et  $d_{min}$  sont des variables d'entrée facultatives du modèle. Lorsqu'elles sont inconnues, elles peuvent être déterminées à partir de  $d_g$  et  $G$  sur la base de relations empiriques dont les formes, communes à toutes les essences sont présentées dans les équations ci-dessous :

$$d_{min} = C_{ess,0} + C_{ess,1} \cdot d_g^{e_{ess,1}} + C_{ess,2} \cdot \frac{G^{e_{ess,2}}}{d_g} \quad (4)$$

$$d_{max} = C'_{ess,0} + C'_{ess,1} \cdot d_g^{e'_{ess,1}} + C'_{ess,2} \cdot \frac{G^{e'_{ess,2}}}{d_g} \quad (5)$$

Les régressions sont réalisées séparément pour chaque essence d'arbre (voir Annexe A). A noter que  $\frac{G}{d_g}$  constitue un indicateur sommaire de la densité du peuplement, ce qui permet d'obtenir une estimation plus précise de  $d_{min}$  et  $d_{max}$ . La Fig. 4 ci-dessous illustre la sensibilité de  $d_{min}$  et  $d_{max}$  par rapport à  $d_g$  et  $G$  pour le chêne.

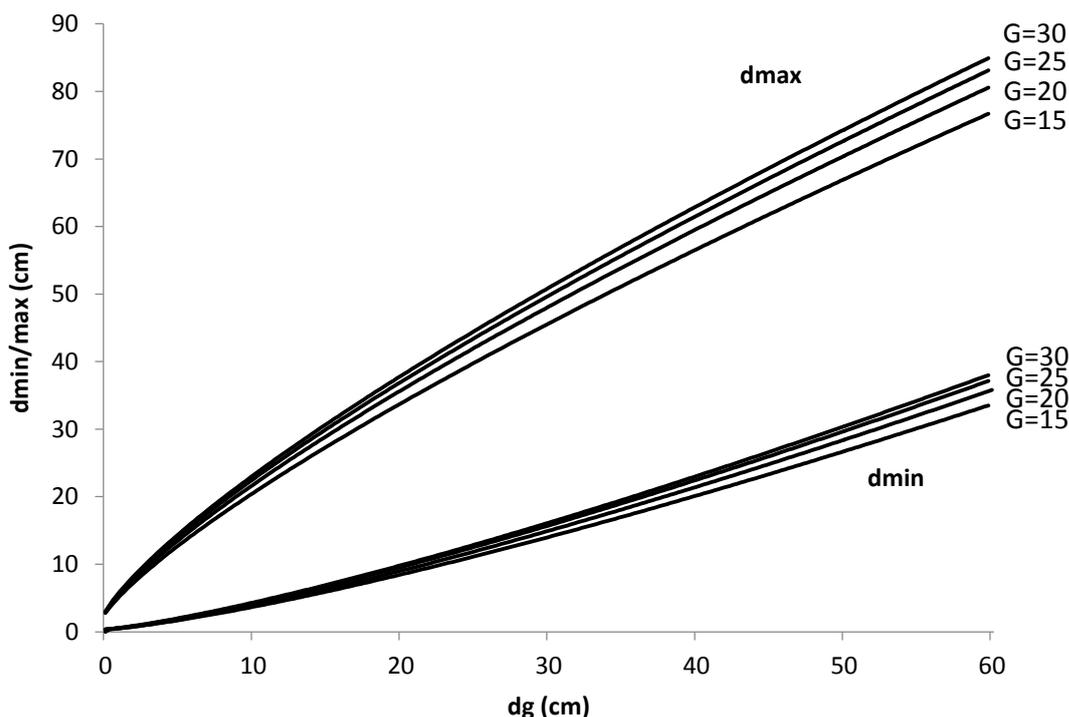


Fig. 4 : Analyse de sensibilité de  $d_{min}/d_{max}$  à  $d_g$  et  $G$  pour le chêne

Précisons que dans le cadre d'un modèle empirique et en présence de multicollinéarité (ce qui est le cas ici comme dans la plupart des modèles de régressions multiples), l'interprétation de la valeur de chaque coefficient indépendamment et dans l'absolu doit être réalisée avec prudence. Cette mise en garde ne concerne qu'une partie des équations de SiWaWa, les équations dites en forme réduite telles que les équations de  $d_{min}$  et  $d_{max}$  ci-dessus ou les équations de l'âge (voir section 2.3.2.2), et ne remet pas en cause leur puissance prédictive.

- Détermination des paramètres de la fonction de Weibull ( $\alpha, \beta, \gamma$ )

Il est possible d'établir un lien entre  $d_g, d_{min}, d_{max}$  d'une part et les paramètres  $\alpha, \beta$  et  $\gamma$  de la fonction de Weibull d'autre part à travers en deux étapes successives.

étape (i) : Tout d'abord, il est possible de déterminer certaines relations empiriques. Ainsi, il existe une relation entre  $\alpha + \beta$  et  $d_g$ , déterminée par régression linéaire, et donnée par l'équation suivante :

$$\alpha + \beta = a + b \cdot d_g \quad (6)$$

Cette relation est identique pour toutes les essences et elle est indépendante du paramètre  $\gamma$  (voir Annexe A pour les valeurs numériques de a et b).

Cette relation forte s'explique très bien par le fait qu'analytiquement,  $\alpha + \beta$  correspond ici au 63.2<sup>e</sup> percentile de la distribution des diamètres, d'où la très forte corrélation au diamètre quadratique moyen  $d_g$ . Cette corrélation étroite permet une estimation très fiable de  $\alpha + \beta$  à partir de  $d_g$ .

Les analyses empiriques montrent également que  $\gamma$  est indépendant de  $d_g$  (et également de  $\alpha$  et  $\beta$ ) et qu'il est possible (par balayage) de déterminer une valeur moyenne de  $\gamma$  pour une

essence donnée. Toutefois, au sein d'une même essence, la variabilité de  $\gamma$  est trop importante pour que cette seule valeur moyenne soit utilisée au niveau du peuplement. Cette valeur moyenne par essence  $\gamma_{ess}$  constitue néanmoins une première approximation utile dans la détermination de la bonne valeur de  $\gamma$  (voir les étapes de calcul ci-dessous).

*étape (ii)* : Ensuite, les autres relations sont déterminées par une approche analytique et sur la base de la fonction de répartition présentée en équation 2, qui est évaluée à  $d_{min}$  et  $d_{max}$ . L'incrément de base de la distribution réelle (et donc discrète) correspond à  $\frac{1}{N}$ , l'inverse du nombre total de tiges à l'hectare. Ainsi, pour l'identification avec la distribution continue décrite par la fonction de Weibull, le plus petit diamètre  $d_{min}$  peut être associé au centre du premier incrément, soit  $\frac{1}{2N}$ , et le plus grand diamètre  $d_{max}$  au centre du dernier incrément, soit  $(1 - \frac{1}{2N})$ . Ainsi, les évaluations de la fonction de distribution à  $d_{min}$  et  $d_{max}$  sont données respectivement par les équations 7 et 8 :

$$\frac{1}{2N} = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{d_{min} - \alpha}{\beta} \right)^\gamma \right] \quad (7)$$

$$1 - \frac{1}{2N} = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{d_{max} - \alpha}{\beta} \right)^\gamma \right] \quad (8)$$

Après reformulation,  $d_{min}$  et  $d_{max}$  sont exprimés comme suit :

$$d_{min} = \alpha + \beta \cdot \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{2N} \right) \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (9)$$

$$d_{max} = \alpha + \beta \cdot \left[ -\ln \left( \frac{1}{2N} \right) \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (10)$$

Sur la base des équations 6, 9 et 10, les paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  sont définis itérativement suivant les différentes étapes de calcul suivantes :

1. Des valeurs initiales sont choisies pour  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  :

$$\alpha_{init} = d_{min} \quad (11)$$

$$\beta_{init} = a + b \cdot d_g - \alpha_{init} \quad (12)$$

$$\gamma_{init} = \gamma_{ess} \quad (13)$$

2. On calcule  $\alpha$  sur la base de l'équation ci-dessous :

$$\alpha = d_{min} - \beta_{init} \cdot \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{2N} \right) \right]^{\frac{1}{\gamma_{init}}} \quad (14)$$

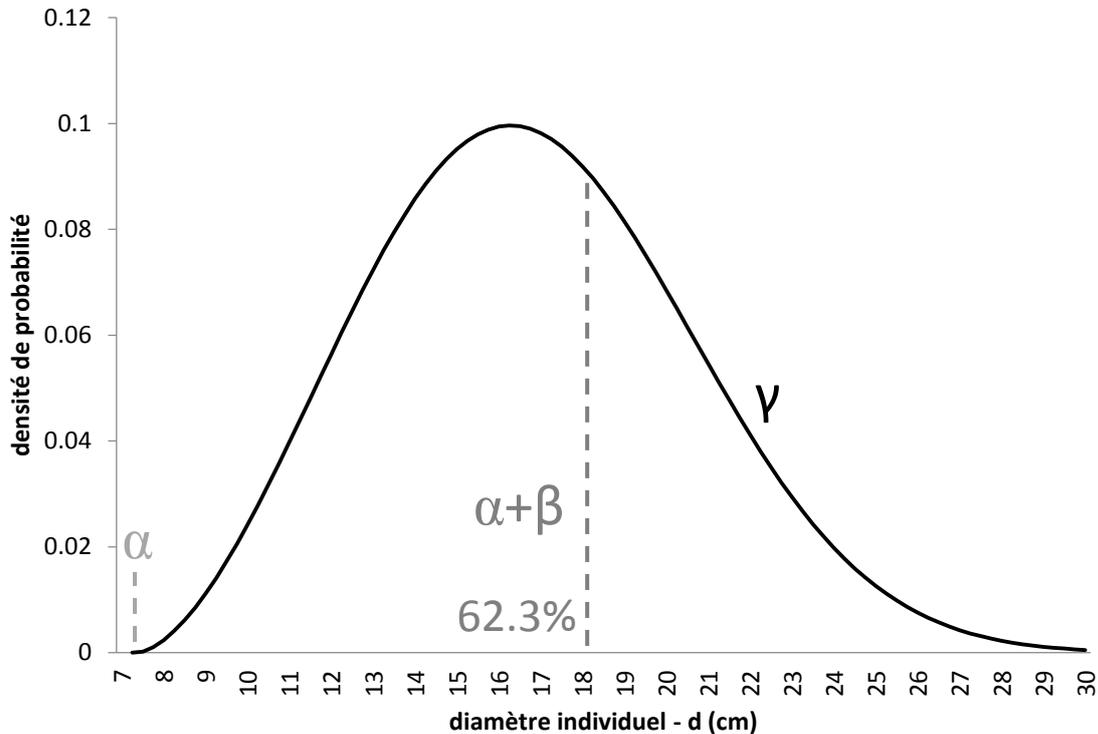
3. On calcule  $\beta$  sur la base de l'équation suivante :

$$\beta = a + b \cdot d_g - \alpha \quad (15)$$

4. On calcule  $\gamma$  sur la base de l'équation 16 ci-dessous (déterminée à partir de l'équation 10) :

$$\gamma = \frac{\ln \left[ -\ln \left( \frac{1}{2N} \right) \right]}{\ln \left( \frac{d_{max} - \alpha}{\beta} \right)} \quad (16)$$

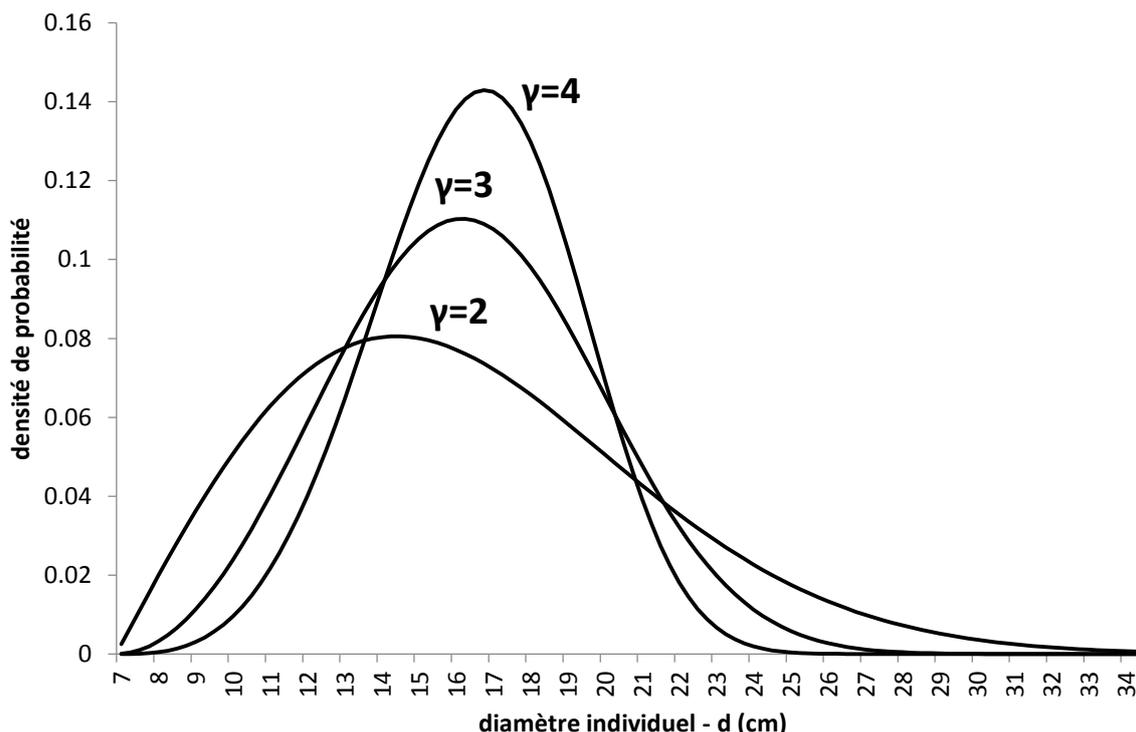
Les trois paramètres de la fonction de Weibull et donc la distribution continue des diamètres sont maintenant connus. La densité de probabilité correspondant à un peuplement de chênes (PPSS<sup>7</sup> 8) est donnée par la figure suivante :



**Fig. 5 : Densité de probabilité pour la distribution des diamètres dans un peuplement de chênes (PPSS 08 :  $N = 833$ ,  $G = 19.8$ ,  $d_{min}=8$ ,  $d_{max}=30$ ,  $\alpha = 7.36$ ,  $\beta = 10.65$ ,  $\gamma = 2.66$ )**

L'équation 16 montre que le paramètre  $\gamma$  est lié au rapport  $\frac{d_{max}-\alpha}{\beta}$ , qui mesure la largeur de la distribution par rapport à sa densité au 63.2<sup>e</sup> décile, soit une mesure de sa dispersion relative. La Fig. 6 ci-dessous illustre bien le lien entre le paramètre  $\gamma$ , la dispersion de la distribution mais aussi son asymétrie :

<sup>7</sup> PPSS : Placettes Permanentes de Suivi Sylvicole de la Haute Ecole Spécialisée Bernoise.



**Fig. 6 : Sensibilité de la distribution des diamètres au paramètre  $\gamma$  (pour  $\alpha = 7.36$  et  $\beta = 10.65$ , correspondant à la PPSS 08)**

A partir de la distribution continue ainsi obtenue, et plus précisément à partir de la reformulation de la fonction de répartition, un peuplement peut être généré comme une série d'arbres dont la liste des diamètres est définie comme suit :

$$d_k = \alpha + \beta \cdot [-\ln(1 - k)]^{\frac{1}{\gamma}}, k \in \left\{ \frac{1}{2N}, \frac{3}{2N}, \frac{5}{2N}, \dots, \frac{2N-1}{2N} \right\} \quad (17)$$

Cette liste de diamètres est une estimation de la structure d'un peuplement à l'échelle individuelle obtenue à partir de variables dendrométriques  $d_g$ ,  $d_{min}$ ,  $d_{max}$ , et  $N$  mesurées et/ou estimées au niveau du peuplement. Cette estimation constitue le cœur du modèle SiWaWa.

Une fois cette liste établie, elle est utilisée pour recalculer les grandeurs dendrométriques utilisées dans le reste des équations de SiWaWa, c'est-à-dire  $G$ ,  $d_g$ ,  $d_{dom}$ ,  $d_{min}$  et  $d_{max}$ , ce qui donne une plus grande cohérence au modèle.

### 2.3.2.2. Estimation du triptyque âge/fertilité/hauteur dominante

Dans le cadre de la sylviculture en futaie régulière, l'âge d'un peuplement, sa hauteur dominante et la fertilité de la station sur laquelle pousse ce peuplement constituent un triptyque de variables qui se définissent mutuellement.

En effet, on considère en général que dans une futaie régulière et pour une essence donnée, la hauteur dominante d'un peuplement n'est fonction que de son âge et de la fertilité de la station (voir par exemple Assmann, 1955). Ce résultat empirique est fondamental et très largement utilisé en sciences forestières, par exemple dans l'établissement de tables de production (cf. Badoux, 1983). Il est également repris dans SiWaWa.

Jusqu'à présent et en ce qui concerne le triptyque âge, hauteur dominante et indice de fertilité, le modèle SiWaWa est initialisé sur la base de l'indice de fertilité.

L'indice de fertilité  $IF$  est défini dans SiWaWa selon le standard suisse comme la hauteur dominante du peuplement à 50 ans. En partant de l'indice de fertilité et de certaines caractéristiques dendrométriques du peuplement, SiWaWa est capable d'estimer l'âge puis  $h_{dom}$  avec fiabilité. Utiliser  $h_{dom}$  comme point de départ n'est pas possible pour le moment car aucune relation empirique suffisamment fiable permettant l'estimation de l'âge et de  $IF$  n'a pu être caractérisée jusqu'à présent. Il n'est pas non plus possible d'initialiser SiWaWa avec plusieurs variables d'entrée, par exemple  $IF$  et  $h_{dom}$ . Toutefois, lorsque  $h_{dom}$  est connue, l'utilisateur peut ajuster itérativement la valeur de  $h_{dom}$  calculée par le modèle pour qu'elle corresponde à la valeur réelle en jouant sur  $IF$  (voir section 3.2.1).

La question de l'initialisation du triptyque âge, hauteur dominante et indice de fertilité pourra faire l'objet de développements futurs du modèle SiWaWa.

### Estimation de l'âge

La détermination de l'âge se fait sur la base de l'indice de fertilité  $IF$  et de certaines variables dendrométriques caractéristiques du peuplement.

Les équations de calcul de l'âge diffèrent sensiblement d'une essence à une autre mais la logique derrière le choix des variables explicatives reste la même.

Ainsi, le diamètre quadratique  $d_g$  est systématiquement présent dans ces relations car il est dans tous les cas un bon prédicteur de l'âge d'un peuplement.

Par ailleurs, la relation entre l'âge et le diamètre moyen d'un peuplement est également influencée par la compétition au sein de ce peuplement. Pour prendre en compte les effets de cette compétition, des indicateurs simplifiés de la densité du peuplement sont parfois introduits dans les modèles de régression, à savoir  $\frac{G}{d_g}$ ,  $\frac{G}{G_{max}}$ ,  $\frac{G}{G_{max-moyen}}$  ou encore  $(d_{max} - d_g)$  (voir section 2.3.3.2).

L'équation d'estimation de l'âge des peuplements de chêne est donnée ci-dessous :

$$Age = C_{ch,0} + C_{ch,1} \cdot IF + C_{ch,2} \cdot d_g + C_{ch,3} \cdot \frac{G}{d_g} + C_{ch,4} \cdot \frac{G}{G_{max-moyen}} \quad (18)$$

Pour un peuplement de chêne donné (PPSS 08 :  $d_g = 17.4$ ,  $G = 19.8$ ,  $IF = 25$ ,  $G_{max-moyen} = 31.7$ ), cela donne par exemple :

$$Age = 113.76 - 5.84 \cdot 25 + 1.64 \cdot 17.4 - 20.17 \cdot \frac{19.8}{17.4} + 91.24 \cdot \frac{19.8}{31.68} = 30.4 \text{ ans} \quad (19)$$

### Estimation de la hauteur dominante $h_{dom}$

La hauteur dominante est déterminée sur la base de l'indice de fertilité (entré par l'utilisateur) et de l'âge (estimé).

La forme fonctionnelle utilisée dans SiWaWa pour lier  $h_{dom}$  à l'âge est une fonction hyperbolique dite de Näslund (cf. Näslund, 1936 ; Schütz et Rosset, 2016), elle est donnée ci-dessous :

$$h_{dom} = \left( \frac{Age}{a_{ess,IF} + b_{ess,IF} \cdot Age} \right)^{c_{ess}} \quad (20)$$

Les paramètres  $a_{ess,IF}$  et  $b_{ess,IF}$  dépendent de l'essence et de l'indice de fertilité alors que le paramètre  $c_{ess}$  ne dépend que de l'essence.

Dans une première étape, les coefficients  $c_{ess}$  (qui déterminent surtout l'aplatissement de la courbe  $h_{dom} = f(Age)$ ) ont été déterminés par balayage (approche itérative par tâtonnement). Les valeurs estimées sont présentées en Annexe A.

Ensuite, l'équation 20 est transformée pour obtenir l'équation 21 :

$$\frac{1}{h_{dom}^{c_{ess}}} = a_{ess,IF} \cdot \frac{1}{Age} + b_{ess,IF} \quad (21)$$

Cette dernière permet l'estimation des coefficients  $a_{ess,IF}$  et  $b_{ess,IF}$  par régression linéaire.

Toutefois, les coefficients  $b_{ess,IF}$  ont ensuite été réajustés de sorte à ce que  $h_{dom}$  à 50 ans soit égal à l'indice de fertilité, respectant ainsi sa définition. C'est-à-dire que l'égalité 22 doit être respectée :

$$IF = \left( \frac{50}{a_{ess,IF} + b_{ess,IF} \cdot 50} \right)^{c_{ess}} \quad (22)$$

Enfin, les relations respectives entre  $a_{ess,IF}$  et  $b_{ess,IF}$  d'une part et  $IF$  d'autre part ont été déterminées par régression linéaire, ce qui a donné les équations suivantes<sup>8</sup> :

$$a_{ess,IF} = C_{ess,0}^a + C_{ess,1}^a \cdot IF + C_{ess,2}^a \cdot IF^2 \quad (23)$$

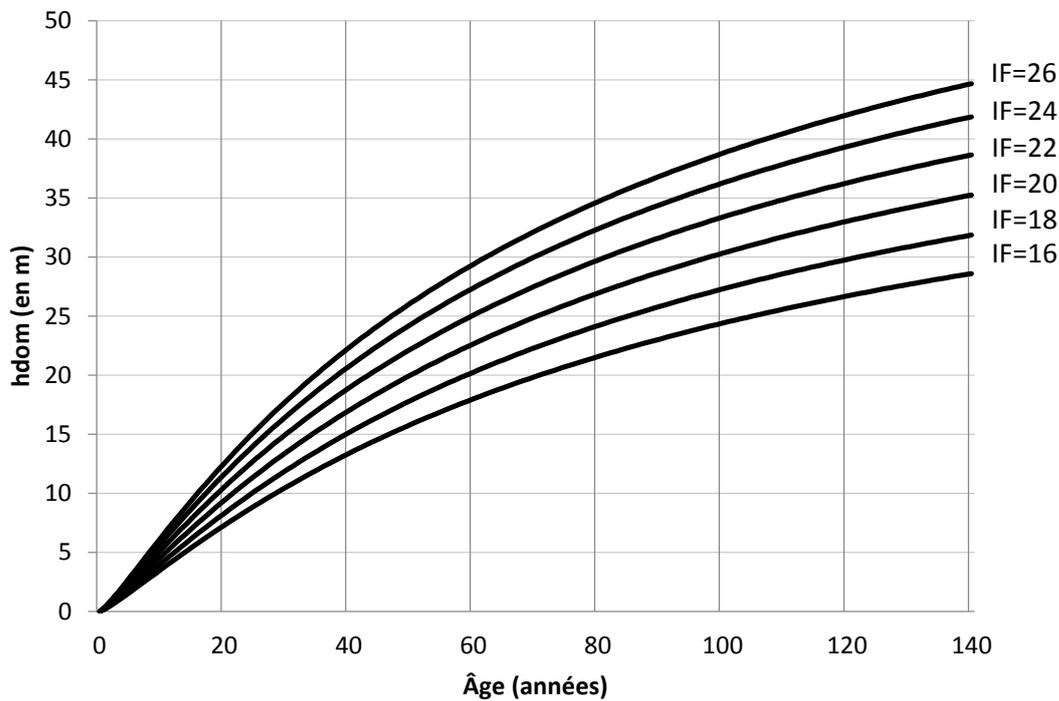
$$b_{ess,IF} = C_{ess,0}^b + C_{ess,1}^b \cdot IF + C_{ess,2}^b \cdot IF^2 \quad (24)$$

Les résultats de ces régressions, sont présentés en annexe A.

Les coefficients  $c_{ess}$ ,  $C_{ess,0}^k$ ,  $C_{ess,1}^k$  et  $C_{ess,2}^k$  étant connus et reportés dans SiWaWa, le modèle est capable de déterminer  $h_{dom}$  à partir de l'âge et de l'indice de fertilité pour une essence donnée.

<sup>8</sup> On rajoute un terme  $C_3 \cdot IF^3$  dans le cas du pin sylvestre.

La Fig. 7 ci-dessous représente, à titre illustratif, les différents faisceaux de fertilité obtenus à partir de la méthode précédente pour le chêne :



**Fig. 7 : Faisceaux de fertilité pour le chêne**

#### *Estimation de l'indice de fertilité IF*

L'indice de fertilité, lorsqu'il est inconnu, pourrait être estimé à partir de  $h_{dom}$  et de l'âge. En combinant les équations 21, 23 et 24, il est en effet possible d'écrire une équation du second degré en  $IF$  :

$$-\frac{1}{h_{dom} \frac{1}{c_{ess}}} + \left( \frac{C_{ess,0}^a}{Age} + C_{ess,0}^b \right) + IF \cdot \left( \frac{C_{ess,1}^a}{Age} + C_{ess,1}^b \right) + IF^2 \cdot \left( \frac{C_{ess,2}^a}{Age} + C_{ess,2}^b \right) = 0 \quad (25)$$

Les coefficients étant tous connus, une résolution analytique standard, par le calcul du discriminant  $\Delta$ , permet de déterminer la racine de ce polynôme qui correspond à l'indice de fertilité.

La formule du discriminant est donnée ci-dessous :

$$\Delta = \left( \frac{C_{ess,1}^a}{Age} + C_{ess,1}^b \right)^2 - 4 \left( \frac{C_{ess,2}^a}{Age} + C_{ess,2}^b \right) \left[ -\frac{1}{h_{dom} \frac{1}{c_{ess}}} + \left( \frac{C_{ess,0}^a}{Age} + C_{ess,0}^b \right) \right] \quad (26)$$

Sur la base de ce discriminant, il est possible de trouver de manière générale deux racines réelles au polynôme 25. La racine qui correspond à  $IF$  est calculée grâce à la formule suivante :

$$IF = \frac{-\left(\frac{C_{ess,1}^a}{Age} + C_{ess,1}^b\right) - \sqrt{\Delta}}{2 \cdot \left(\frac{C_{ess,2}^a}{Age} + C_{ess,2}^b\right)} \quad (27)$$

Dans ce cas, l'indice de fertilité ne serait calculé qu'une seule fois par SiWaWa, lors de son initialisation, il serait ensuite supposé constant au cours du temps.

Le problème est que l'âge d'un peuplement est rarement connu avec une précision suffisante pour l'initialisation de SiWaWa. Pour remédier à ce problème, l'âge pourrait être estimé grâce à une relation empirique le liant à  $h_{dom}$  qui elle, peut être mesurée sans trop de difficulté. L'Annexe A présente une estimation de cette relation empirique.

Toutefois, le calcul de l'âge à partir de  $IF$  donne des résultats plus fiables, c'est donc cette approche qui sert pour le moment à initialiser SiWaWa. La détermination d'une relation empirique plus robuste entre l'âge et  $h_{dom}$  fait partie des développements futurs envisagés pour le modèle SiWaWa.

### 2.3.2.3. Estimation des hauteurs individuelles et du volume

La hauteur dominante est par définition la hauteur moyenne des 100 arbres de plus gros diamètre par hectare. Ainsi,  $h_{dom}$  ne rend compte ni de la variabilité des hauteurs individuelles. Afin d'estimer correctement le volume du peuplement, il faut connaître la liste des hauteurs individuelles  $\tilde{h}$  des arbres du peuplement.

#### *Estimation des hauteurs individuelles*

La hauteur individuelle d'un arbre est donnée par la relation empirique suivante :

$$h = C_{ess,0} + C_{ess,1} \cdot \ln(d) \quad (28)$$

$h$  correspond à la hauteur individuelle d'un arbre de diamètre  $d$  (à hauteur de poitrine).

Le coefficient  $C_{ess,0}$  est exprimé en fonction de  $C_{1,ess}$  et de sorte à ce que la relation passe par le point  $(h_{dom}, d_{dom})$ , soit :

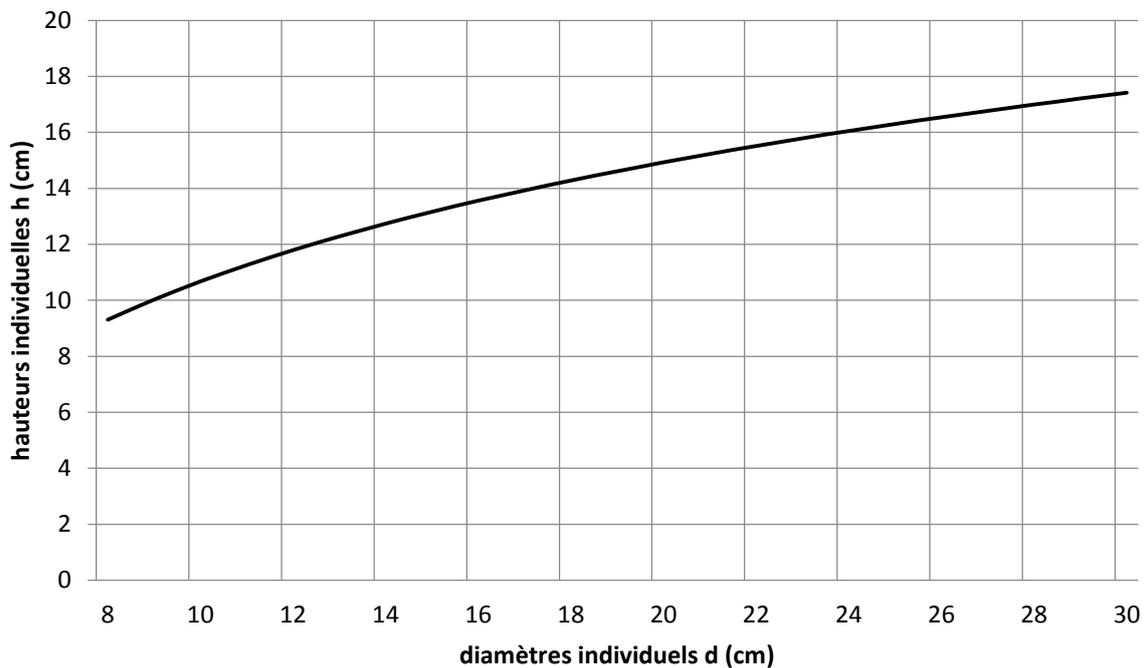
$$C_{ess,0} = h_{dom} - C_{ess,1} \cdot \ln(d_{dom}) \quad (29)$$

$C_{1,ess}$  est quant lui estimé par régression linéaire sur  $d_g$ , ce qui donne la relation suivante :

$$C_{ess,1} = k_{ess,0} + k_{ess,1} \cdot \ln(d_g) \quad (30)$$

Cette régression, basée sur  $d_g$ , qui est une valeur moyenne mesurée à l'échelle du peuplement, permet d'éviter de faire une régression directement sur les valeurs individuelles  $(h_i, d_i)$  dont la corrélation s'avère très variable. Les résultats de cette régression pour les différentes essences sont présentés en Annexe A.

La Fig. 8 ci-dessous présente un exemple de distribution des hauteurs individuelles pour un peuplement de chêne :



**Fig. 8 : Exemple de distribution des hauteurs individuelles dans un peuplement de chêne (PPSS 08 :  $h_{dom}=16.1$ ,  $d_g=17.40$ ,  $d_{dom}=24.2$ ,  $d_{min}=8$ ,  $d_{max}=30$ )**

### Estimation du volume

Le diamètre et la hauteur individuels d'un arbre étant connus, il est possible d'estimer son volume individuel. A noter que SiWaWa estime séparément le volume des tiges et le volume des branches.

Les relations empiriques existant entre ces deux types de volume d'une part et la hauteur et le diamètre individuels d'autre part sont estimées par régression après transformation logarithmique. Les équations diffèrent légèrement d'une essence à l'autre et selon le type de volume en question. Les relations obtenues pour le chêne (après reformulation) sont données respectivement par les équations 31 (volume tige) et 32 (volume branche)<sup>9</sup> :

$$v_t = A_t \cdot \exp[C_{t,ch,1} \cdot \ln(d) + C_{t,ch,2} \cdot \ln(d)^2 + C_{t,ch,3} \cdot \ln(h) + C_{t,ch,4} \cdot \ln(h)^2] \quad (31)$$

$$v_b = A_b \cdot \exp[C_{b,ch,1} \cdot \ln(d) + C_{b,ch,2} \cdot \ln(d)^2 + C_{b,ch,3} \cdot \ln(h)] \quad (32)$$

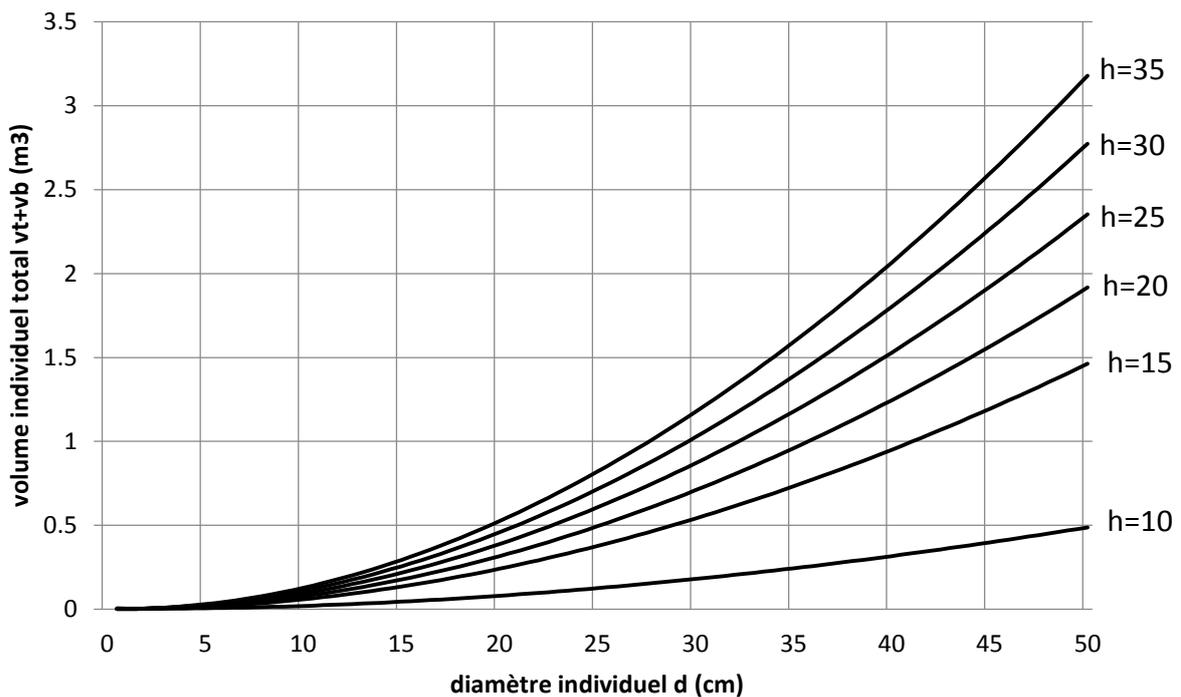
$v_t$  et  $v_b$  correspondent respectivement au volume de la tige et au volume de bois de branche total (sans les aiguilles et les feuilles) pour un arbre individuel donné.  $A_t$  et  $A_b$  sont des paramètres estimés empiriquement.

<sup>9</sup> L'estimation du volume du bois fort des branches n'est à l'heure actuelle pas encore implémentée dans la version SiWaWa 2.0 pour smartphone.

Ces formes exponentielles sont communes à chaque essence hormis quelques termes qui ont été supprimés car ils n'étaient significatifs (voir en Annexe A pour une liste complète de ces formes fonctionnelles et des résultats de régression correspondants).

A noter que le volume des tiges est estimé sur la base des données du WSL déjà présentées dans la section 0 alors que le volume des branches est estimé à partir des données compilées par Burger (1953).

La Fig. 9 ci-dessous présente une analyse de sensibilité du volume individuel d'un chêne par rapport à son diamètre et à sa hauteur individuels :



**Fig. 9 : Sensibilité du volume individuel d'un chêne à ses diamètre et hauteur individuels**

Une fois les relations 31 et 32 estimées, sachant que la distribution des diamètres est connue (section 2.3.2.1) et que les hauteurs individuelles peuvent être déduites du diamètre (équation 28), le volume à l'échelle du peuplement peut-être facilement calculé.

#### *Estimation des assortiments<sup>10</sup>*

Le volume d'un arbre ne donne qu'une information partielle sur sa valeur économique. Le prix du bois au volume dépend en effet de sa qualité. Pour ce qui est du bois d'œuvre en particulier, les dimensions de la tige, c'est-à-dire sa hauteur mais aussi son diamètre relatif à différentes hauteurs vont avoir une influence très importante sur sa valeur car ce sont ces dimensions qui vont déterminer les assortiments de bois qu'il va être possible de produire à partir de cette tige.

<sup>10</sup> L'estimation des assortiments n'est à l'heure actuelle pas encore implémenté dans la version SiWaWa 2.0 pour smartphone.

Afin de déterminer ces assortiments, une relation empirique entre un diamètre  $d_{rel}$  et sa hauteur relative correspondante  $h_{rel}$  a été estimée. L'équation de régression intègre également le diamètre à hauteur de poitrine  $d$  (cf. Dagnélie et al. 1999). A titre d'exemple, la relation obtenue pour le chêne est présentée ci-dessous :

$$d_{rel} = C_{ch,0} + C_{ch,1} \cdot h_{rel} + C_{ch,2} \cdot h_{rel}^2 + C_{ch,3} \cdot h_{rel}^3 + C_{ch,4} \cdot d + C_{ch,5} \cdot d^2 \quad (33)$$

Les formes fonctionnelles et les résultats de régression pour toutes les essences sont présentés en Annexe A.

A noter que des relations empiriques donnant  $h_{rel}$  en fonction de  $d_{rel}$ ,  $d$  et  $h$  ont également été estimées, ainsi qu'une équation estimant l'épaisseur de l'écorce en fonction du diamètre  $d$  permettant d'affiner encore davantage l'estimation des assortiments. Les équations et les résultats de régression sont également présentés en Annexe A.

### 2.3.3. SiWaWa et la dynamique des peuplements

La deuxième grande fonctionnalité de SiWaWa consiste à prédire la croissance des peuplements forestiers.

La détermination de la dynamique des peuplements dans SiWaWa est itérative et suit une logique et un ordre précis. Plus particulièrement, l'évolution du peuplement entre les années  $(t)$  et  $(t + 1)$  est déterminée en trois étapes successives :

- i) Tout d'abord, la croissance radiale au niveau individuel est déterminée pour un incrément d'un an, ce qui permet d'actualiser une première fois la liste des diamètres  $\tilde{d}$  (voir section 2.3.3.1),
- ii) une fois cette actualisation réalisée, la mortalité naturelle est déterminée (voir section 2.3.3.2) et la liste des diamètres  $\tilde{d}$  est une seconde fois actualisée afin d'en tenir compte,
- iii) la troisième et dernière actualisation de  $\tilde{d}$  intervient à la suite d'une éventuelle éclaircie décidée par l'utilisateur (voir section 2.3.4).

A chacune de ces actualisations, les grandeurs dendrométriques définies à l'échelle du peuplement sont recalculées :  $G$ ,  $d_g$ ,  $d_{min}$ ,  $d_{max}$ ,  $d_{dom}$ ,  $G_{max}$ , etc. Ces recalculs itératifs permettent de garantir à chaque actualisation une cohérence d'ensemble entre les différentes équations du modèle.

Enfin, à la suite de ce processus d'actualisation de la liste des diamètres, les hauteurs et les volumes individuels peuvent être recalculés (voir section 2.3.3.3). L'état du peuplement pour l'année  $(t + 1)$  est ainsi complètement déterminé.

#### 2.3.3.1. Croissance en diamètre des arbres

Le modèle de croissance de SiWaWa est basé sur la connaissance précise de la structure du peuplement (au niveau individuel) issue du modèle de structure présenté en section 2.3.2. Il prédit donc la croissance radiale individuelle, en fonction de la position relative d'un arbre donné dans la liste des diamètres. Par ailleurs, le rythme de croissance est spécifique à chaque essence et à un peuplement donné.

La croissance radiale d'un arbre a pour principal déterminant son statut social, qui est représenté dans le modèle par la surface terrière sus-jacente  $G_{cum}$  (Schütz, 2015 ; Schütz and Zingg, 2007 ; Schütz et al. 2015), définie comme la surface terrière cumulée de tous les arbres de diamètres supérieurs. Ainsi, pour un arbre  $k$  de diamètre  $d_k$ , on a :

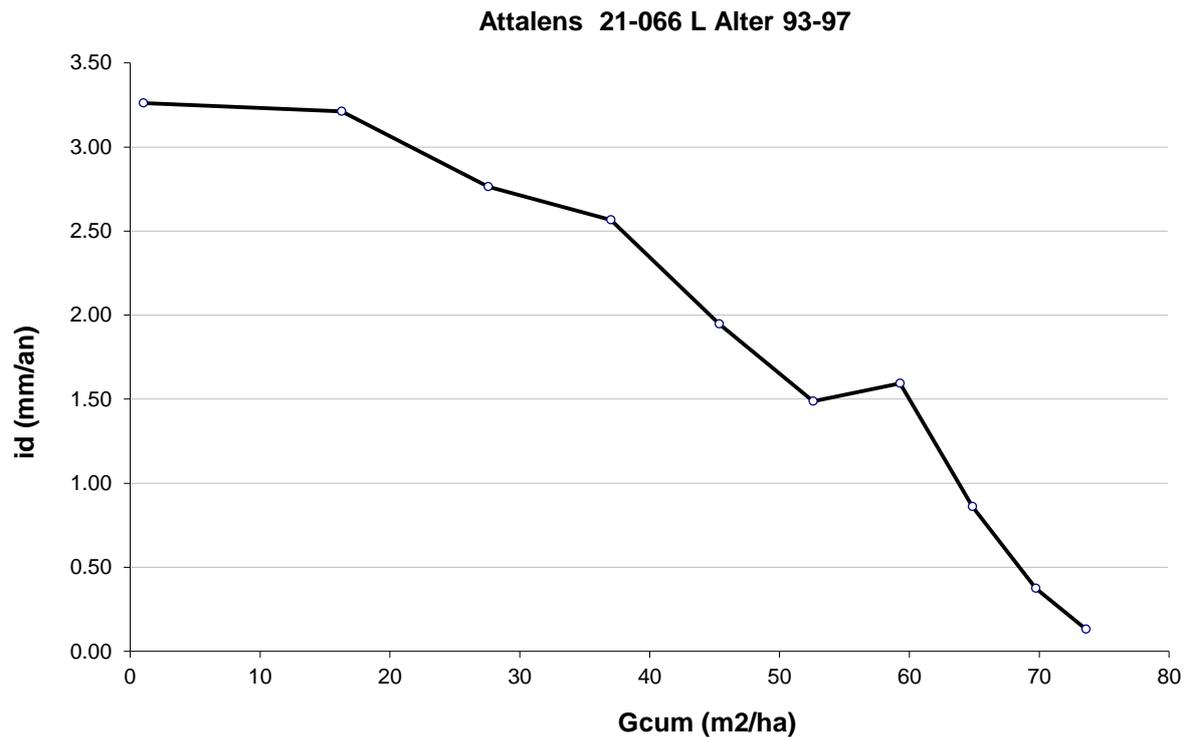
$$G_{cum,d_k} = \sum_{d_i > d_k} \pi \cdot \left(\frac{d_i}{2}\right)^2 \quad (34)$$

SiWaWa fait le lien entre  $G_{cum}$  et l'incrément radial annuel  $i_d$  grâce à une relation empirique définie sur la base de la forme fonctionnelle suivante :

$$i_d = \alpha_{peup} + \beta_{peup} \cdot G_{cum,d}^{\gamma_{peup}} \quad (35)$$

Les paramètres  $\alpha_{peup}$ ,  $\beta_{peup}$ , et  $\gamma_{peup}$  sont spécifiques à un peuplement donné. Par ailleurs, chacun de ces paramètres revêt une signification biologique bien précise.  $\alpha$  donne l'accroissement radial des tiges dominantes, et graphiquement il correspond à l'ordonnée à l'origine (voir un exemple concret dans la Fig. 12 ci-après).  $\beta$  est lié au point d'extinction de la croissance, c'est-à-dire la surface sus-jacente limite,  $G_{cum,ext}$ , au-dessus de laquelle un arbre ne croît plus en diamètre car son statut social est trop faible. Graphiquement,  $G_{cum,ext}$  correspond au point d'intersection entre la courbe décrite par la relation 35 et l'axe des abscisses.  $\gamma$  correspond à la courbure de cette même courbe, c'est-à-dire l'intensité avec laquelle la compétition latérale s'accroît lorsque le statut social diminue.

L'estimation des paramètres de cette relation est permise par les données du WSL qui comprennent des séries temporelles de suivi de la croissance radiale pour chaque arbre (cf. section 0). Les intervalles de temps entre deux mesures de diamètre sont compris entre 4 et 7 ans. Pour chaque peuplement suivi, les arbres sont regroupés par classe de diamètre, de sorte à ce qu'il y ait au moins 10 valeurs par classe, et un accroissement radial moyen  $i_d$  est calculé pour chaque classe de diamètre. Ce regroupement permet de limiter l'effet de la variabilité interindividuelle et de se concentrer sur l'étude de la dynamique de croissance moyenne à l'échelle du peuplement. La Fig. 10 ci-dessous illustre la relation empirique entre la croissance radiale  $i_d$  et la surface terrière sus-jacente  $G_{cum}$ , calculée pour différentes classes de diamètres constituées de 10 arbres, pour un peuplement d'épicéa.



**Fig. 10 : Relation empirique entre la croissance radiale  $i_d$  et la surface terrière susjacent  $G_{cum}$  pour une placette d'épicéas (regroupement par classes de diamètres de 10 arbres)**

Pour chaque placette suivie, les paramètres  $\alpha_{peup}$ ,  $\beta_{peup}$ , et  $\gamma_{peup}$  ont ensuite été estimés sur la base de la relation 35.

Le paramètre  $\gamma_{peup}$  est tout d'abord estimé par balayage. Puis  $\alpha_{peup}$  et  $G_{cum,ext}$  (également spécifique à un peuplement donné) sont estimés graphiquement sur la base de leur signification biologique respective : à savoir la croissance radiale des tiges dominantes pour  $\alpha_{peup}$  (équation 36) et le point d'extinction de la croissance pour  $G_{cum,ext}$ .

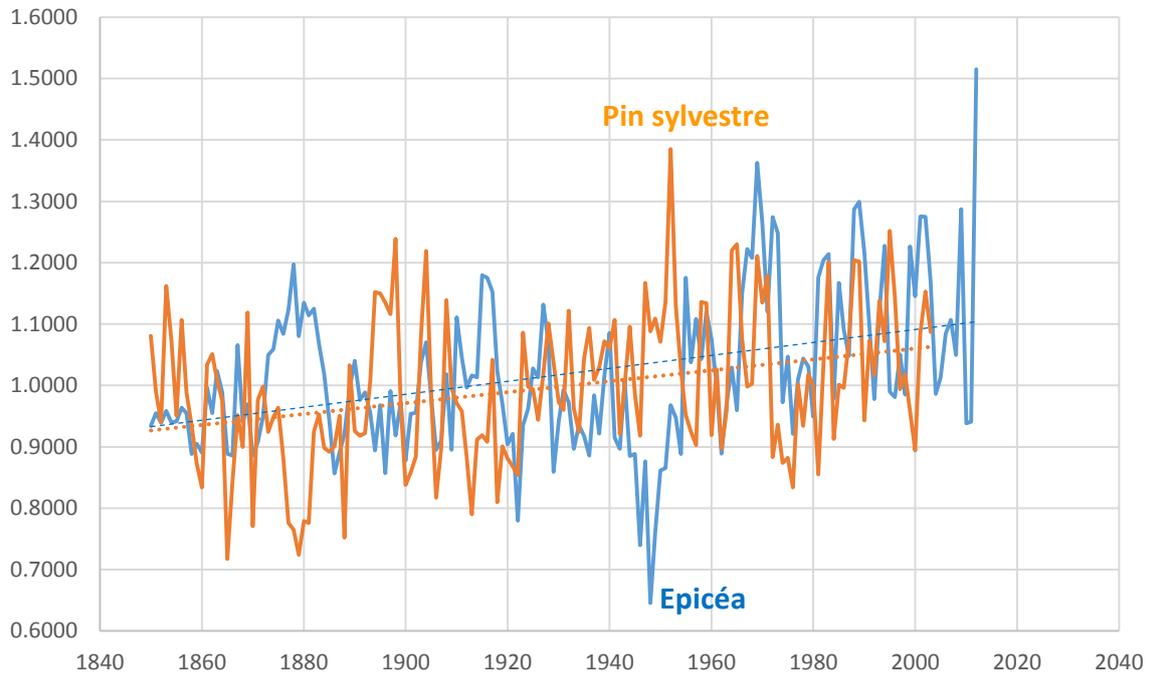
$$\alpha_{peup} = i_{d_{dom}} \quad (36)$$

Cependant, cette première estimation de  $\alpha_{peup}$  nécessite d'être affinée. Prévoir la croissance en diamètre des arbres est en effet un exercice délicat sur le court comme sur le long-terme. Les variations annuelles des conditions de croissance, en particulier les conditions météorologiques ont un impact considérable sur la croissance radiale,  $\pm 40\%$  de variations annuelles (cf. Schütz et Zingg, 2007). Sur le long-terme, les changements climatiques entraînent une augmentation tendancielle des rythmes de croissance (cf. Zingg, 1996 ; Pretzsch et al., 2014).

Les incréments radiaux des tiges dominantes,  $\alpha_{peup}$ , sont libérés à la fois de leur variabilité interannuelle et de leur tendance de long-terme sur la base des indices dendrochronologiques (DRO) définis par le WSL et décrivant les grandes variations moyennes de la croissance radiale au cours du temps (Bräker, 1989). Ces indices sont spécifiques à chaque essence et basés sur des mesures de tiges dominantes, d'où la correction des paramètres  $\alpha_{peup}$ .

Les indices DRO permettent de quantifier à la fois l'anomalie annuelle de croissance radiale et sa tendance à l'augmentation sur le long-terme. Par ailleurs, les indices DRO sont libérés de l'effet de l'âge des peuplements utilisés pour leur détermination grâce à des fonctions de

Hugershoff (1940). La Fig. 11 présente à titre d'exemple les indices dendrométriques pour l'épicéa et le pin sylvestre :



**Fig. 11 : Indices dendrométriques (DRO) pour l'épicéa et le pin sylvestre**

La correction de la variabilité annuelle à court terme (CT) à apporter aux  $\alpha_{peup}$  en pourcentage,  $(\% \Delta \alpha_{peup})_{CT}$ , est déterminée comme la différence entre DRO et sa courbe de tendance linéaire  $DRO_{trend}$ , c'est-à-dire :

$$(\% \Delta \alpha_{peup})_{CT,t} = 100 \cdot (DRO_t - DRO_{trend,t}) \quad (37)$$

La correction de la tendance à long-terme (LT) à apporter à  $\alpha_{peup}$  en pourcentage,  $(\% \Delta \alpha_{peup})_{LT}$ , est déterminée comme la différence entre la courbe de tendance linéaire  $DRO_{trend}$  et la valeur de cette même courbe à une date de référence donnée (en l'occurrence 2020), c'est-à-dire :

$$(\% \Delta \alpha_{peup})_{LT,t} = 100 \cdot (DRO_{trend,t} - DRO_{trend,2020}) \quad (38)$$

Dans les équations 37 et 38, l'indice  $t$  désigne les différents intervalles de temps sur lesquels les incréments radiaux ont été mesurés par le WSL, les indices DRO correspondants étant au besoin exprimés par une moyenne sur chacune de ces périodes.

Une fois ces corrections effectuées, les paramètres  $\beta_{peup}$  sont calculés sur la base de l'équation 39 ci-dessous :

$$\beta_{peup} = \frac{-\alpha_{peup}}{G_{cum,ext} \gamma_{peup}} \quad (39)$$

L'objectif étant de connaître les valeurs de  $\alpha_{peup}$ ,  $\beta_{peup}$ , et  $\gamma_{peup}$  pour un peuplement quelconque entré par un utilisateur de SiWaWa et pas seulement pour les placettes d'essai du WSL, ces paramètres sont ensuite régressés sur certaines variables dendrométriques

représentatives du peuplement et qui sont connues dans SiWaWa (voir équations 40, 42 et 43).

Les régressions sont menées à bien séparément pour les différentes essences et les variables explicatives. Les formes fonctionnelles diffèrent très sensiblement d'une essence à une autre.

Toutefois, l'âge, ainsi que différents indicateurs de densité, sont présents dans toutes les équations exprimant  $\alpha_{peup}$  (la croissance radiale des tiges dominantes). A titre d'exemple, la forme de la relation empirique obtenue pour le chêne est présentée ci-dessous :

$$\alpha_{peup} = C_{ch,0} + C_{ch,1} \cdot \frac{G}{G_{max}} + C_{ch,2} \cdot \ln\left(\frac{G}{d_g}\right) + C_{ch,3} \cdot \frac{d_{max} - d_g}{d_g} + C_{ch,4} \cdot Age \quad (40)$$

Pour un peuplement de chêne donné (PPSS 08 : N = 833, G = 19.8, h<sub>dom</sub> = 16.1, d<sub>min</sub> = 8, d<sub>max</sub> = 30), cela donne par exemple :

$$\begin{aligned} \alpha_{peup} &= 5.76 + 5.47 \cdot \frac{19.8}{32} - 3.59 \cdot \ln\left(\frac{19.8}{17.4}\right) - 1.34 \cdot \frac{30 - 17.4}{17.4} - 0.045 \cdot 30 \\ &= +6.36 \text{ mm/an} \quad (41) \end{aligned}$$

$\beta_{peup}$  n'est pas estimé directement mais par l'intermédiaire de  $G_{cum,ext}$  qui, de son côté est exprimée en fonction d'indicateurs de densité, observée (G) et maximale ( $G_{max}$ , voir section 2.3.3.2). La relation correspondante pour le chêne est présentée dans l'équation suivante :

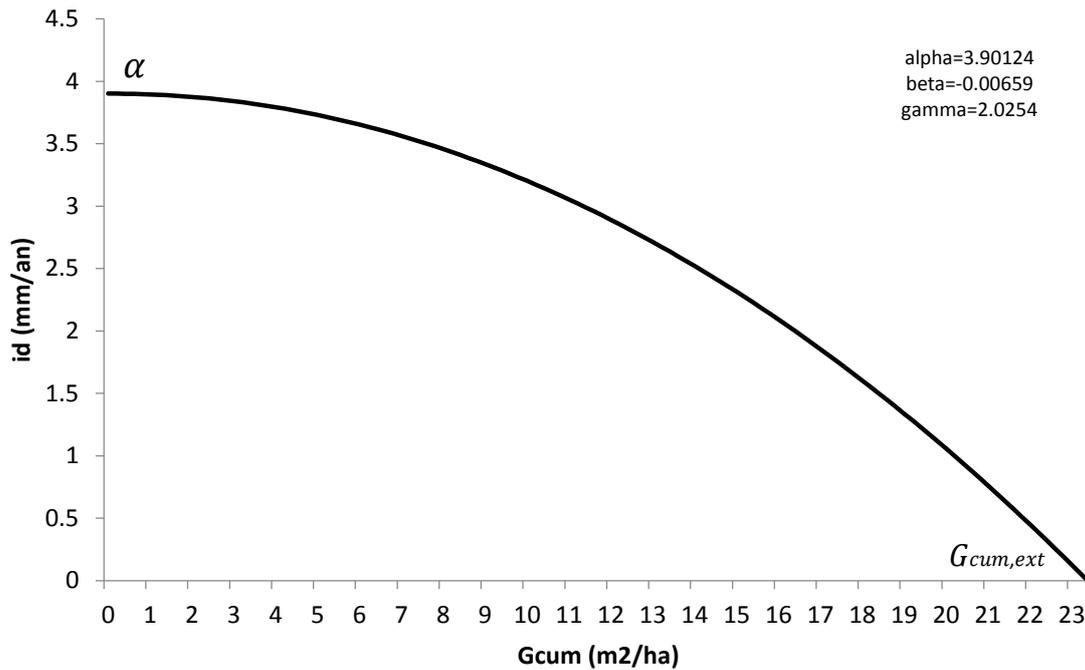
$$G_{cum,ext} = C_{ch,0} + C_{ch,1} \cdot (d_{max} - d_g) + C_{ch,2} \cdot G_{max} \quad (42)$$

Enfin,  $\gamma_{peup}$  est également bien expliqué par des indicateurs de densité, la relation obtenue pour le chêne est donnée ci-dessous :

$$\gamma_{peup} = C_{ch,0} + C_{ch,1} \cdot \frac{G}{d_g} \quad (43)$$

Les résultats de régression pour toutes les essences sont présentés en Annexe A.

Les relations ainsi estimées permettent *in fine* de déterminer la croissance radiale au niveau de l'arbre et pour un peuplement quelconque donné. A titre d'exemple, la Fig. 12 propose une courbe correspondant à la relation 35 pour un peuplement de chêne :



**Fig. 12 : Exemple de  $i_d = f(G_{cum})$  pour un peuplement de chêne (PPSS 08 :  $N = 833$ ,  $G = 19.8$ ,  $h_{dom} = 16.1$ ,  $d_{min} = 8$ ,  $d_{max} = 30$ )**

### 2.3.3.2. Surface terrière maximale $G_{max}$ et mortalité naturelle

La surface terrière maximale  $G_{max}$  qu'un peuplement donné peut atteindre constitue le seuil d'apparition d'une mortalité naturelle due à la compétition latérale au sein du peuplement. A ce titre, c'est une indication pratique importante pour l'utilisateur.

#### *Indice de Reineke et peuplements non-éclaircis*

Reineke (1933) a suggéré sur la base d'observations empiriques que dans les peuplements en futaie régulière et non-éclaircis depuis l'origine, une relation indépendante de la fertilité existe entre le nombre de tiges et le diamètre moyen du peuplement  $\bar{d}$ , telle que :

$$N = k\bar{d}^{-1.0605} \quad (44)$$

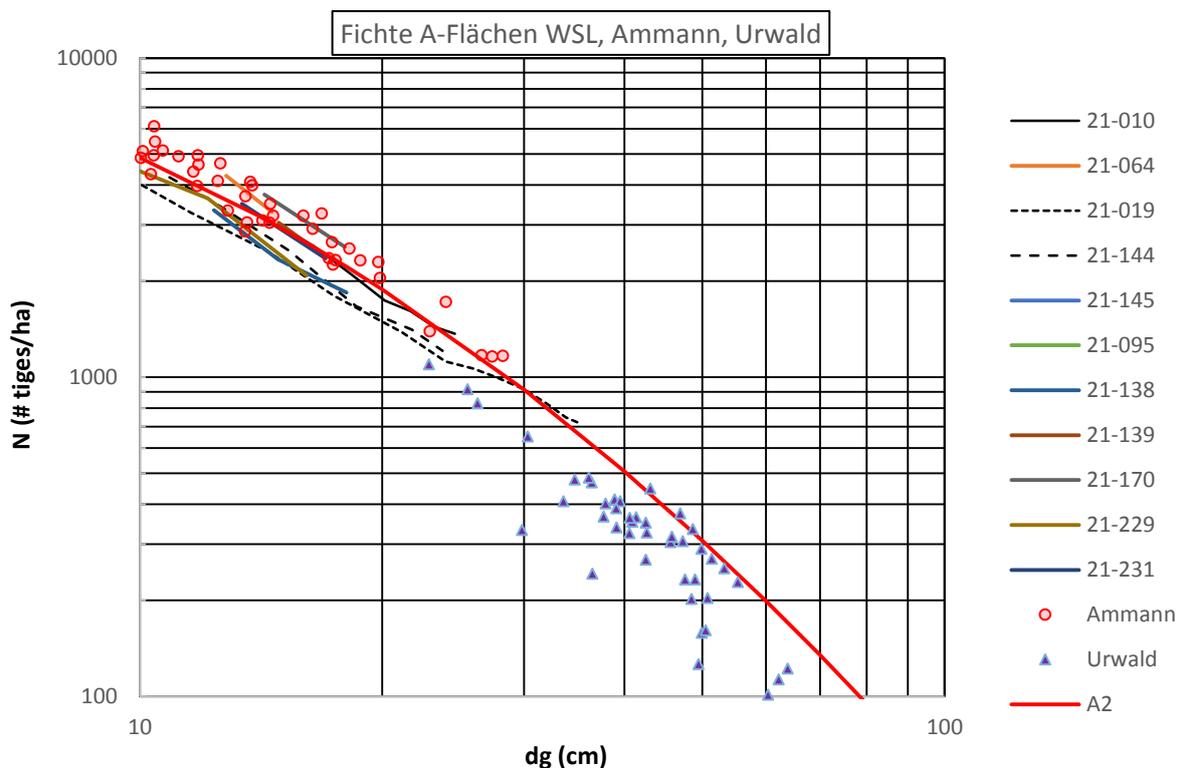
L'intuition de départ de Reineke est pertinente, notamment le fait de se concentrer sur les peuplements non-éclaircis et sur la relation entre le nombre de tiges maximum  $N_{max}$  et leur diamètre moyen mais il est possible d'affiner ses résultats (cf. Schütz and Zingg, 2009).

Tout d'abord, le diamètre quadratique moyen  $d_g$  s'avère plus pertinent et plus sûr à mesurer (à partir de  $G$  et  $N$ ) que le diamètre moyen  $\bar{d}$ . Ensuite, il s'avère que la relation entre  $N_{max}$  et  $d_g$  n'est pas indépendante de l'essence, il est donc pertinent de l'estimer pour chaque essence séparément. Par ailleurs, la forme fonctionnelle proposée par Reineke peut également être améliorée. L'équation utilisée dans SiWaWa est donnée ci-dessous (cf. Schütz et Zingg, 2010) :

$$N_{max} = A_{ess} \cdot \exp [C_{ess,1} \cdot \ln(d_g) + C_{ess,2} \cdot \ln(d_g)^2] \quad (45)$$

Après transformation logarithmique, ces équations sont estimées par régression linéaire sur la base des données disponibles portant sur des peuplements non-éclaircis. Ces données étant relativement rares, les données du WSL ont été complétées à cet égard par d'autres sources de données : les travaux de thèse d'Ammann (2004) portant sur la dynamique des jeunes peuplements en l'absence d'éclaircie, les données d'essais d'éclaircies dans les forêts de Chroust (République Tchèque) et de Bryndum (Danemark) et des données issues de peuplements vierges de la forêt de Kasivarova en (Slovaquie) ; voir la section 0 pour plus de détails.

A titre d'exemple, la Fig. 13 illustre la manière dont les données issues de peuplements non-éclaircis s'articulent avec la relation définie par l'équation 45 pour l'épicéa.



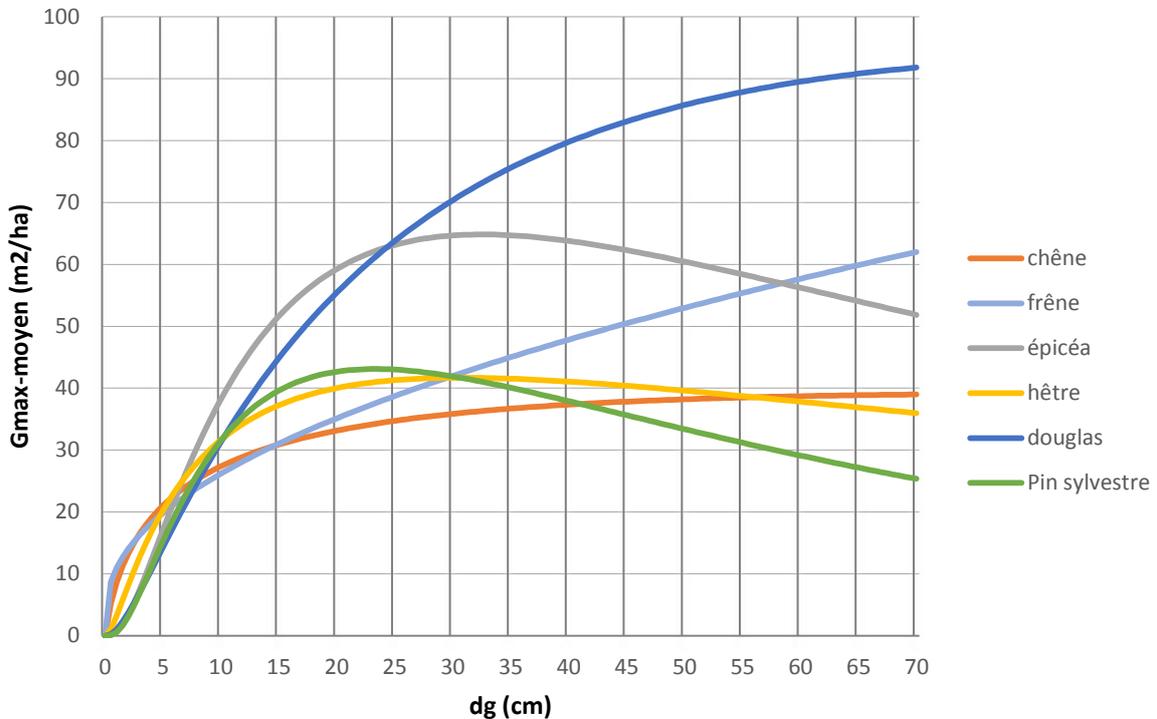
**Fig. 13 : Nombre de tiges observées sur des parcelles d'épicéa non traitées, en fonction du  $d_g$  (échelle logarithmique)**

En termes sylvicoles,  $N_{max}$  correspond au nombre maximal de tiges par ha qu'un peuplement peut atteindre sans éclaircie et en moyenne pour un  $d_g$  donné. Au-delà, la compétition est trop forte et entraîne une mortalité naturelle qui ramène le peuplement vers  $N_{max}$ .

En combinant l'expression de  $N_{max}$  (équation 45) et la définition de  $d_g$  (équation 3), il est possible d'exprimer pour un  $d_g$  donné, la surface terrière maximale moyenne  $G_{max-moyen}$  d'un peuplement non-éclairci :

$$G_{max-moyen} = \pi \cdot \left( \frac{d_g}{200} \right)^2 \left( A_{ess} \cdot \exp \left[ C_{ess,1} \cdot \ln(d_g) + C_{ess,2} \cdot \ln(d_g)^2 \right] \right) \quad (46)$$

Cette relation entre  $G_{max-moyen}$  et  $d_g$  est illustrée pour les différentes essences par la Fig. 14 ci-dessous :



**Fig. 14 : Relation entre  $G_{max-moyen}$  et  $d_g$  pour les différentes essences**

Les formes fonctionnelles et les résultats de régression obtenus pour les différentes essences sont donnés en Annexe A.

#### Surface terrière maximale $G_{max}$ et peuplements éclaircis

Le problème est que  $G_{max-moyen}$  est comme son nom l'indique une valeur moyenne dont la généralité est discutable. Schütz (2008) met ainsi en évidence des variations de la surface terrière maximale réelle  $G_{max}$  de  $\pm 15-20\%$  autour de  $G_{max-moyen}$ . Par ailleurs,  $G_{max}$  peut s'avérer assez variable même au sein d'une même région, par exemple lorsque la topographie est contrastée. Ainsi, il est pertinent d'estimer  $G_{max}$  à l'échelle du peuplement.

Le fait que la densité et la productivité d'un peuplement puisse varier de manière importante et indépendamment de l'essence, du  $d_g$  et de l'indice de fertilité a été mentionné pour la première fois par Assmann (1957) sous le terme de « niveau de production ». Il a par la suite été montré que le niveau de production détermine la densité maximale (Assmann, 1974 ; Franz, 1965, 1967).

La surface terrière observée d'un peuplement contient intrinsèquement l'information sur le niveau de production (Schütz et Zingg, 2010) mais cette surface terrière dépend également de l'historique d'éclaircie du peuplement qui est généralement inconnue, ou partiellement inconnue.

Une méthode originale a été développée afin d'estimer le niveau de production  $NP$  des peuplements éclaircis (Schütz, 2008, 2010 ; Schütz and Zingg, 2010), défini dans SiWaWa comme le rapport entre la surface terrière maximale effective du peuplement et sa surface terrière maximale moyenne :

$$NP = \frac{G_{max}}{G_{max-moyen}} \quad (47)$$

Il s'agit dans un premier temps de déterminer la part de la surface terrière  $\Delta G$  qui reflète l'ampleur des éclaircies passées sur la situation actuelle.  $\Delta G$  se définit simplement comme la différence entre la surface terrière maximale réelle  $G_{max}$  (inconnue) et la surface terrière observée  $G$  :

$$\Delta G = G_{max} - G \quad (48)$$

$\Delta G$  a été estimée pour des surfaces de recherche qui, dans le cadre d'essais, ont subi des variantes d'éclaircie dont une variante zéro (non-éclaircie). Pour chaque variante d'éclaircie,  $\Delta G$  a été calculée comme la différence entre la surface terrière du peuplement et la surface terrière du peuplement non-traité, c'est-à-dire :

$$\Delta G_{variante\ i} = G_{variante\ i} - G_{variante\ 0} \quad (49)$$

Ces  $\Delta G$  ont ensuite été régressées sur des variables dendrométriques décrivant les peuplements correspondants. En particulier,  $\frac{G}{G_{max-moyen}}$  et  $\frac{d_{dom}-d_g}{d_g}$  se sont avérés de bons prédicteurs de  $\Delta G$ . Ce qui, au passage, justifie le fait que  $G_{max-moyen}$  soit estimée par SiWaWa au préalable. A titre d'exemple, la relation empirique obtenue pour le chêne est présentée dans l'équation ci-dessous :

$$\Delta G = C_{ch,0} + C_{ch,1} \cdot \frac{G}{G_{max-moyen}} + C_{ch,2} \cdot \frac{d_{dom} - d_g}{d_g} \quad (50)$$

$\frac{G}{G_{max-moyen}}$  est un indice de plénitude, c'est-à-dire qu'il représente la surface terrière d'un peuplement donné par rapport à un niveau de référence.  $\frac{d_{dom}-d_g}{d_g}$  est une mesure de l'amplitude de la distribution des classes de diamètre, il est sensible aux éclaircies réalisées dans le peuplement. Ces deux variables sont capables d'expliquer la part de la surface terrière due aux éclaircies. Les résultats de régression pour toutes les essences sont présentés en Annexe A.

La Fig. 15 et la Fig. 16 illustrent les relations empiriques qui existent respectivement entre  $\Delta G$  et  $\frac{G}{G_{max-moyen}}$ , et  $\Delta G$  et  $\frac{d_{dom}-d_g}{d_g}$ . Ces deux figures représentent au moyen de nuages de points, une partie des données ayant servi à estimer les coefficients de l'équation 50.

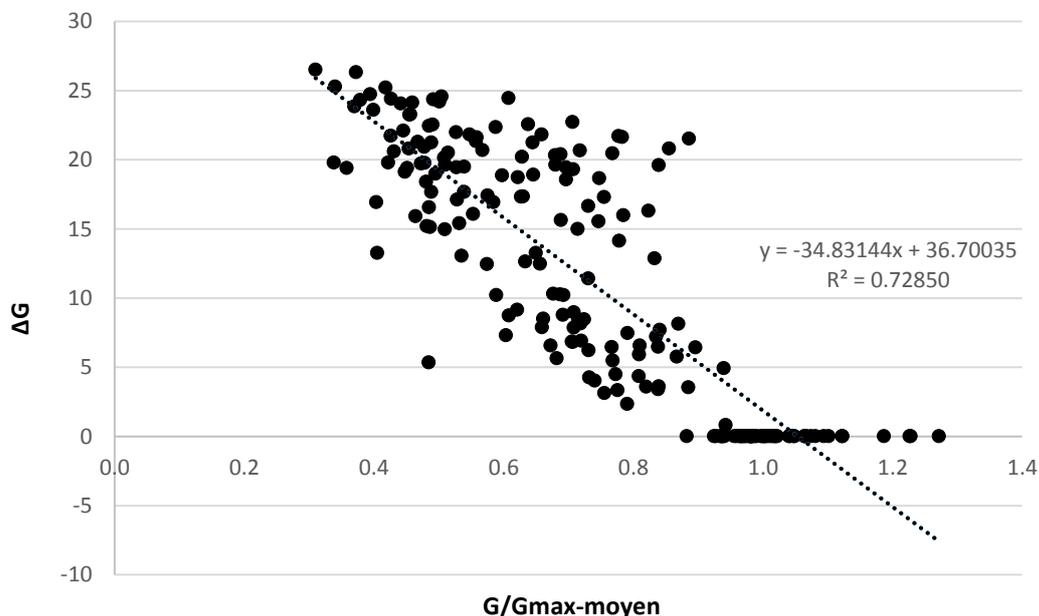


Fig. 15 : Illustration de la relation empirique existant entre  $\Delta G$  et  $\frac{G}{G_{max-moyen}}$  (nuage de points basé sur les essais d'éclaircie menés sur des peuplements de pins sylvestres dans le Bade-Wurtemberg)

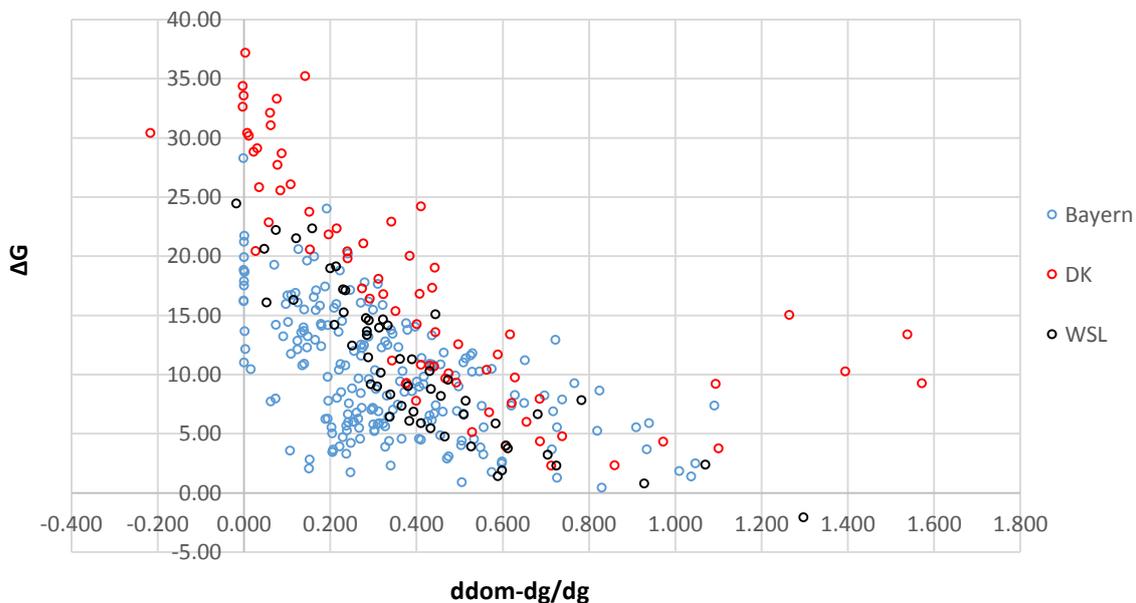


Fig. 16 : Illustration de la relation empirique existant entre  $\Delta G$  et  $\frac{d_{dom}-d_g}{d_g}$  (nuage de points basé sur des essais d'éclaircie menés sur des peuplements de hêtres)

Connaissant  $\Delta G$  et  $G$  au niveau du peuplement, le niveau de production  $NP$  peut être facilement calculé sur la base de l'équation 48, ce qui donne pour le chêne :

$$NP = \frac{1}{G_{max-moyen}} \cdot \left( G + C_{ch,0} + C_{ch,1} \cdot \frac{G}{G_{max-moyen}} + C_{ch,2} \cdot \frac{d_{dom} - d_g}{d_g} \right) \quad (51)$$

Selon Schütz et Zingg (2010), le niveau de production est généralement compris dans un intervalle allant de 0.8 à 1.2.

Une fois le niveau de production déterminé,  $G_{max}$  peut être facilement calculé comme suit :

$$G_{max} = NP \cdot G_{max-moyen} \quad (52)$$

#### *Mortalité naturelle due à la compétition latérale*

SiWaWa considère que la mortalité naturelle due à la compétition entre les arbres apparaît dès lors que  $G > G_{max}$  et dans ce cas, la surface terrière des arbres morts (ou plutôt des arbres qui mourront dans l'intervalle de temps suivant) est déterminée simplement par la différence entre  $G_{max}$  et  $G$  :

$$G_{mort} = G_{max} - G \quad (53)$$

Les données du WSL montrent que la distribution des arbres morts (entre  $t$  et  $t + 1$ ) relativement à la distribution des arbres (à l'instant  $t$ ) est très constante. De ce fait, certaines variables dendrométriques correspondantes aux tiges mortes peuvent être exprimées en fonction des variables dendrométriques du peuplement vif. Ainsi, par approximation, on obtient :

$$d_{g,mort} = \frac{d_g + d_{min}}{2} \quad (54)$$

$$d_{min,mort} = d_{min} \quad (55)$$

$$d_{max,mort} = d_g \quad (56)$$

Puis, par définition de la surface terrière, le nombre de tiges mortes peut s'écrire comme suit :

$$N_{mort} = \frac{4G_{mort}}{\pi \cdot \left( \frac{d_{g,mort}}{100} \right)^2} \quad (57)$$

Sur la base des équations 53 à 57, il est possible en utilisant l'approche décrite dans la section 2.3.2.1 et basée sur une fonction de Weibull d'estimer la distribution des diamètres chez les arbres morts.

#### **2.3.3.3. Croissance en hauteur des arbres**

Sur la base de l'âge incrémenté d'une année, la hauteur dominante  $h_{dom}$  est déterminée directement à partir de la fonction hyperbolique de Näslund (équation 20, section 2.3.2.2).

Puis, sur la base de la nouvelle liste des diamètres individuels et de la nouvelle hauteur dominante, une nouvelle liste des hauteurs individuelles  $\tilde{h}$  est déterminée à partir de la relation 28 (section 2.3.2.3).

Enfin, ces diamètres et hauteurs individuels permettent de recalculer une nouvelle liste des volumes individuels  $\tilde{v}$  et par conséquent de recalculer le volume total  $V$  du peuplement. L'état du peuplement à  $t + 1$  est ainsi complètement caractérisé.

#### 2.3.4. Les éclaircies

Dans SiWaWa, les éclaircies sont décidées par l'utilisateur qui les programme manuellement en choisissant une année d'intervention et une intensité d'éclaircie  $\%éc$  exprimée en pourcentage de la surface terrière du peuplement à la date de l'intervention.

Toutefois, SiWaWa intervient de deux manières dans le processus d'éclaircies, en amont en fournissant une information susceptible de guider l'utilisateur, et en aval en déterminant la distribution des diamètres des arbres prélevés.

##### 2.3.4.1. La surface terrière recommandée $G_{rec}$

SiWaWa génère deux informations utiles à l'utilisateur pour raisonner sur la surface terrière : i) la surface terrière maximale spécifique du peuplement,  $G_{max}$ , et ii) une surface terrière recommandée,  $G_{rec}$ .

La définition de  $G_{max}$  et son estimation sont présentés en détail en section 2.3.3.2. Rappelons seulement que  $G_{max}$  définit un jalon supérieur qu'il est préférable de ne pas atteindre sous peine de saturation du peuplement et d'apparition d'une mortalité naturelle du fait de la concurrence latérale.

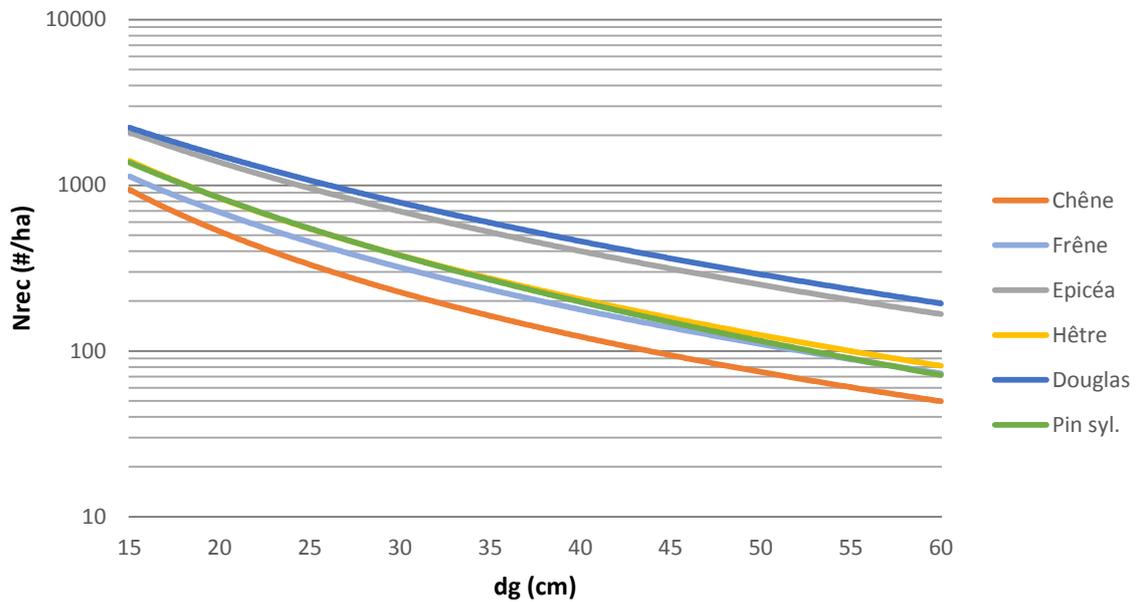
La surface terrière recommandée,  $G_{rec}$ , est quant à elle la surface terrière qu'aurait le peuplement s'il était conduit en suivant le principe de l'éclaircie sélective définie par Schädelin (1934), voir Schütz (2015) pour une rétrospective sur l'évolution de la sylviculture en Suisse.

Pour ce faire,  $G_{rec}$  a été estimé sur la base de peuplements dont la conduite est connue et considérée comme une référence. Ces peuplements proviennent principalement de la base de données du WSL et de données complémentaires de l'EPFZ.

Plus précisément, le nombre de tiges inventoriées sur ces peuplements,  $N_{rec}$ , a été exprimé en fonction du  $d_g$  au moyen d'une relation empirique, spécifique à chaque essence et dont la forme fonctionnelle commune est présentée ci-dessous (forme déjà utilisée pour  $N_{max}$ , voir section 2.3.3.2) :

$$N_{rec} = A_{ess} \cdot \exp \left[ C_{ess,1} \cdot \ln(d_g) + C_{ess,2} \cdot \ln(d_g)^2 \right] \quad (58)$$

La Fig. 17 ci-dessous illustre graphiquement la relation entre  $N_{rec}$  et  $d_g$  pour les différentes essences (sur une échelle logarithmique) :



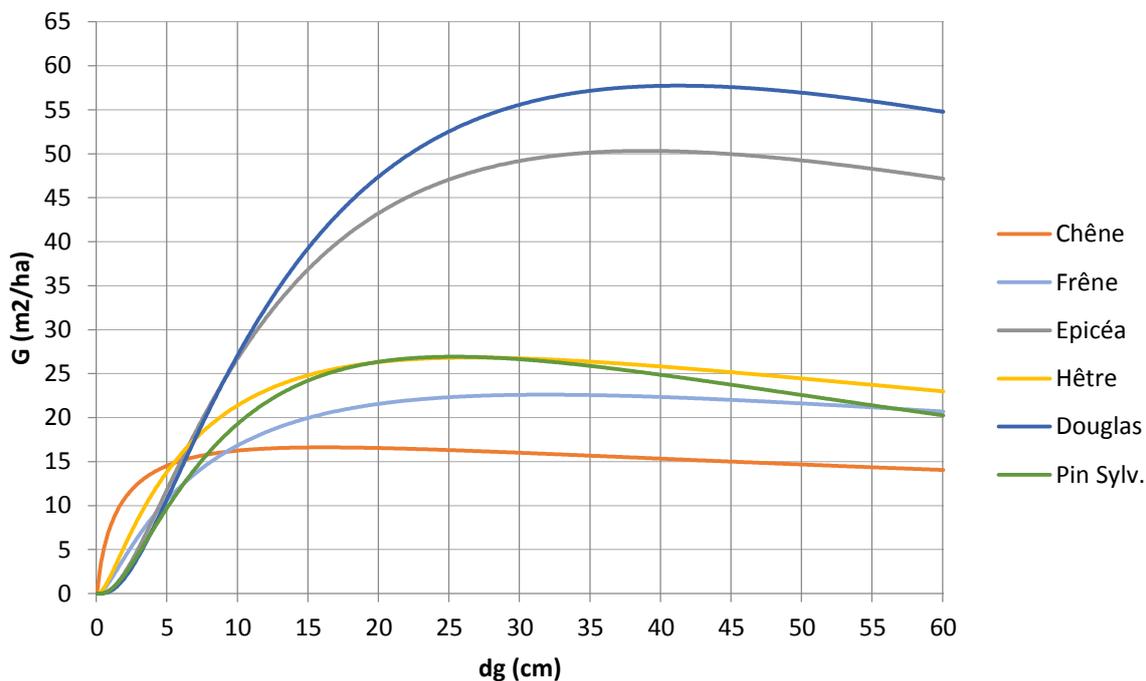
**Fig. 17 :  $N_{rec}$  en fonction de  $d_g$  pour les différentes essences (échelle logarithmique sur l'axe des ordonnées)**

Une fois cette relation estimée et sur la base de la définition de  $d_g$  (cf. équation 3),  $G_{rec}$  est facilement déduit de  $N_{rec}$  :

$$G_{rec} = \pi \cdot \left( \frac{d_g}{200} \right)^2 \cdot N_{rec} \quad (59)$$

Tout comme  $G_{max}$ ,  $G_{rec}$  est recalculée à chaque pas de temps sur la base de la liste actualisée des diamètres.

La Fig. 18 ci-dessous illustre les variations de  $G_{rec}$  en fonction de  $d_g$  pour les différentes essences présentes dans SiWaWa 2.0 :



**Fig. 18 :**  $G_{rec}$  en fonction de  $d_g$  pour les différentes essences

Cette surface terrière recommandée n'est cependant pas un objectif gravé dans le marbre, elle est simplement le reflet de la sylviculture telle qu'elle a été préconisée, en Suisse depuis les années 40, soit la sylviculture basée sur l'approche de l'éclaircie sélective définie par Schädelin (1934) puis plus tardivement sur l'approche des arbres de place définie par Abetz (1975), et enfin sur les concepts de rationalisation biologique (voir Ammann, 2013). Les concepts d'éclaircie ont déjà été différents par le passé et ils pourraient être amenés à changer dans le futur si le contexte évoluait (cf. Schütz, 2015).

#### 2.3.4.2. La distribution des diamètres des tiges prélevées lors d'une éclaircie

Une fois que l'utilisateur a décidé d'une date et d'une surface terrière à prélever  $G_{conc} = G \cdot \%écl$ , SiWaWa détermine la distribution des diamètres des tiges prélevées. Pour ce faire, le modèle utilise encore une fois la méthode décrite en section 2.3.2.1 et basée sur une fonction de Weibull.

Pour ce faire, il faut tout d'abord déterminer certaines variables dendrométriques à l'échelle du peuplement prélevé, à savoir  $d_{g,conc}$ ,  $d_{min,conc}$ , et  $d_{max,conc}$ .

Le  $d_{g,conc}$  peut être déterminé à partir du  $d_g$  du peuplement entier (avant éclaircie) à travers le coefficient de Hiley (1926). Le coefficient de Hiley est défini comme le rapport entre  $d_{g,conc}$  et  $d_g$  :

$$HIL = \frac{d_{g,conc}}{d_g} \quad (60)$$

Le coefficient de Hiley s'avère par ailleurs être un excellent indicateur de la nature et de l'intensité d'une éclaircie (Schütz et Rosset, 2016). De ce fait, les coefficients de Hiley calculés à la suite d'éclaircies observées sur un ensemble de peuplements témoins donnés, sont représentatifs du concept d'éclaircie utilisé sur ces peuplements.

Sur la base des données du WSL (cf. section 0), et pour chaque essence, une relation empirique peut être estimée entre le coefficient de Hiley correspondant à une éclaircie donnée et le  $d_g$  du peuplement avant cette même éclaircie, selon la forme linéaire suivante :

$$HIL = C_{ess,0} + C_{ess,1} \cdot d_g \quad (61)$$

La relation ainsi définie pour l'épicéa, ainsi que le nuage de points correspondant sont donnés en Fig. 19, à titre illustratif :

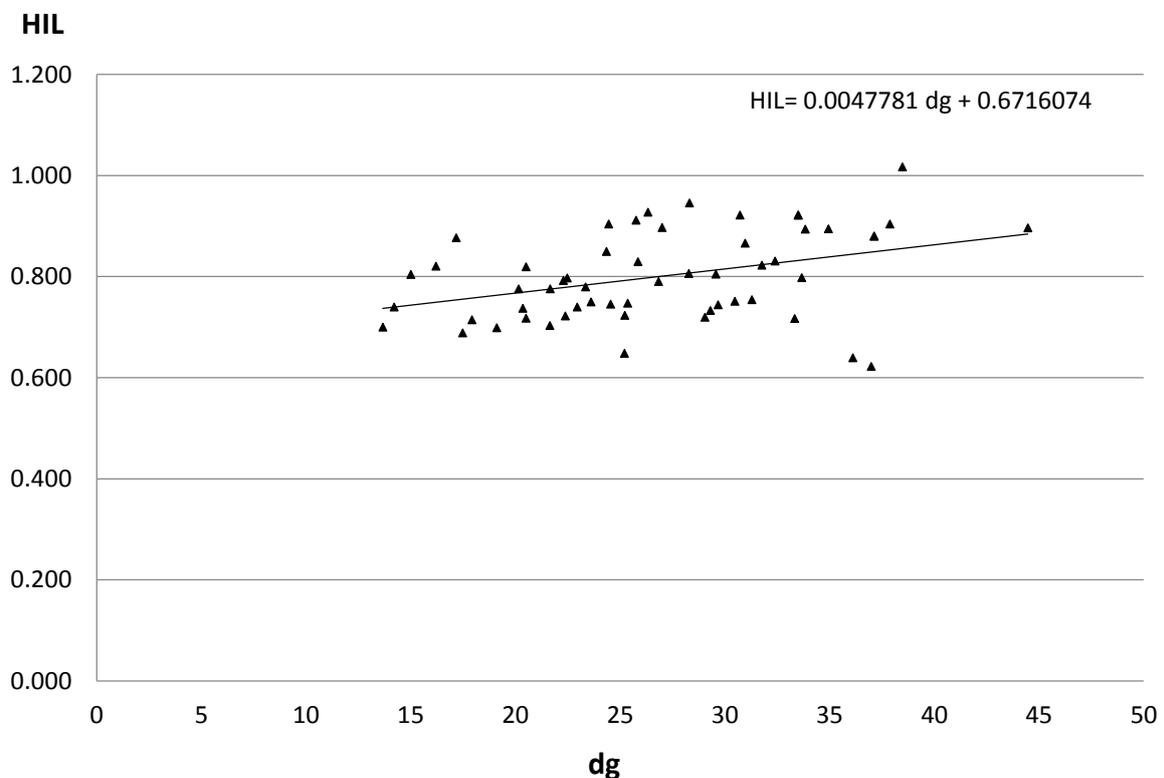
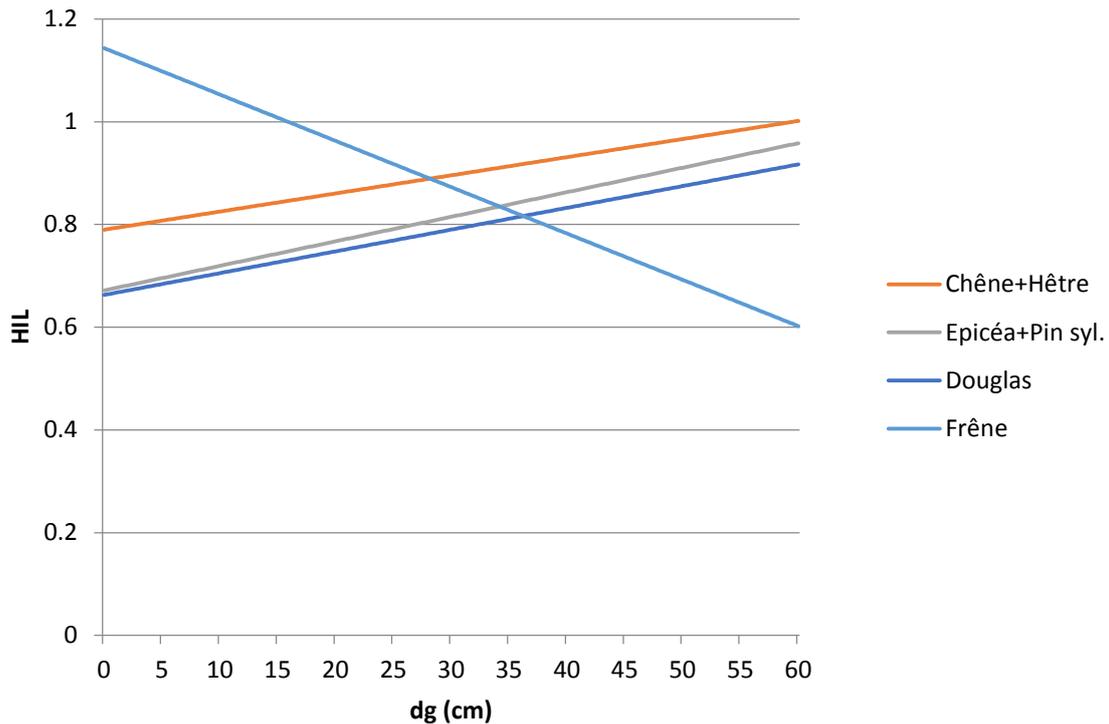


Fig. 19 : Coefficient de Hiley en fonction du  $d_g$  avant éclaircie pour l'épicéa



**Fig. 20 : Coefficients de Hiley pour les différentes essences et en fonction de  $d_g$**

La Fig. 20 révèle que les coefficients de Hiley sont relativement faibles et inférieurs à 1 pour la plupart des essences et pour des valeurs de  $d_g$  standards. Ces valeurs reflètent l'approche de l'éclaircie sélective de Schädelin (1934) qui résulte en des coefficients de Hiley un peu plus faibles que par l'approche des arbres de place (voir Abetz, 1975 ; Schütz, 1990) qui se pratique à l'heure actuelle.

Toutefois, outre le modèle sylvicole théorique suivi, d'autres explications peuvent expliquer ces éclaircies relativement basses. A dire d'expert (J.-P. Schütz), les gestionnaires forestiers pratiquent souvent des interventions qui sont socialement plus basses que celles préconisées dans l'idéal théorique. Par ailleurs, le passage des machines pour la récolte et le débardage est également responsable de la suppression de tiges de faible diamètre.

Pour un peuplement quelconque donné et à partir des équations 60 et 61, le  $d_{g,conc}$  des tiges prélevées peut être déterminé à partir du  $d_g$  du peuplement entier avant éclaircie.

Comme la surface terrière prélevée  $G_{conc}$  est par ailleurs connue, l'équation 3 permet de déterminer le nombre total de tiges prélevées  $N_{conc}$ .

Enfin, l'étude des données du WSL tend à montrer que la distribution des diamètres des tiges prélevées est assez constante, quels que soient le peuplement ou l'essence et que les extrema des tiges prélevées peuvent s'exprimer assez simplement en fonction des extrema du peuplement avant éclaircie, de la manière suivante :

$$d_{min,con} = d_{min} \quad (62)$$

$$d_{max,conc} = 0.8 \cdot d_{max} \quad (63)$$

En définitive, le nombre de tiges prélevées  $N_{conc}$  est connu, ainsi que  $d_{g,conc}$ ,  $d_{min,con}$  et  $d_{max,conc}$  qui permettent d'estimer la distribution de leur diamètre.

D'une manière similaire mais pas encore implémentée dans l'application SiWaWa, il est possible d'estimer la distribution des arbres de place ou plutôt des arbres sélectionnés selon l'approche de Schädelin (1934). Pour ce faire, certaines relations empiriques entre les variables décrivant les arbres sélectionnés ( $s$ ) et le peuplement entier ont été identifiées, elles sont décrites par les équations suivantes :

$$d_{g,s} = \frac{d_g + d_{g,max}}{2} \quad (64)$$

$$d_{min,s} = d_{min} \quad (65)$$

$$d_{max,s} = d_{max} \quad (66)$$

Dans le cadre de futurs développements du modèle SiWaWa, la modélisation des éclaircies pourra être améliorée, en la rendant en particulier plus flexible, c'est-à-dire à même de représenter différents types d'éclaircie.

### 3. L'application SiWaWa 2.0 : un processus de développement et une solution IT

*Dominique Weber, Janik Endtner, Frédéric Wyss, Christian Rosset*

Le projet « SiWaWa 2.0 et Placettes Permanentes de Suivi Sylvicole » a permis l'accomplissement d'un important travail de développement informatique ayant abouti à la bibliothèque informatique SiWaWa Core et à l'application pour smartphone SiWaWa 2.0.

La bibliothèque informatique SiWaWa Core, programmée en Java, reprend toutes les équations de SiWaWa décrites dans le chapitre 2 de ce rapport. SiWaWa Core permet l'utilisation du modèle SiWaWa à partir de plusieurs types d'interface. Jusqu'à présent, SiWaWa Core a été utilisée depuis R sous la forme d'un package et à partir d'une interface pour smartphone Android, formant l'application SiWaWa 2.0.

Nonobstant son nom, l'application SiWaWa 2.0 est la première du genre. Elle a été baptisée ainsi en référence à SiWaWa v1.0 qui est une application Windows basée sur une ancienne version du modèle SiWaWa, et dont le développement avait également été financé par l'OFEV (voir [siwawa.org](http://siwawa.org) pour plus d'information). Elle fait également suite au premier prototype d'application (Android) qui a été développé dans le cadre du projet européen FOCUS ([www.focusnet.eu](http://www.focusnet.eu)). A cet égard, le projet FOCUS a constitué une étude de faisabilité qui a posé les bases du développement de l'application SiWaWa 2.0.

Le développement de SiWaWa Core et de SiWaWa 2.0 a été réalisé au sein de la HAFL sur la base de la dernière version en date du modèle SiWaWa dont Jean-Philippe Schütz est l'auteur.

Cette section présente le processus de développement de SiWaWa Core et SiWaWa 2.0, ainsi que les différentes fonctionnalités de SiWaWa 2.0.

#### 3.1. Processus de transition du prototype Excel à la bibliothèque SiWaWa Core et à l'application SiWaWa 2.0

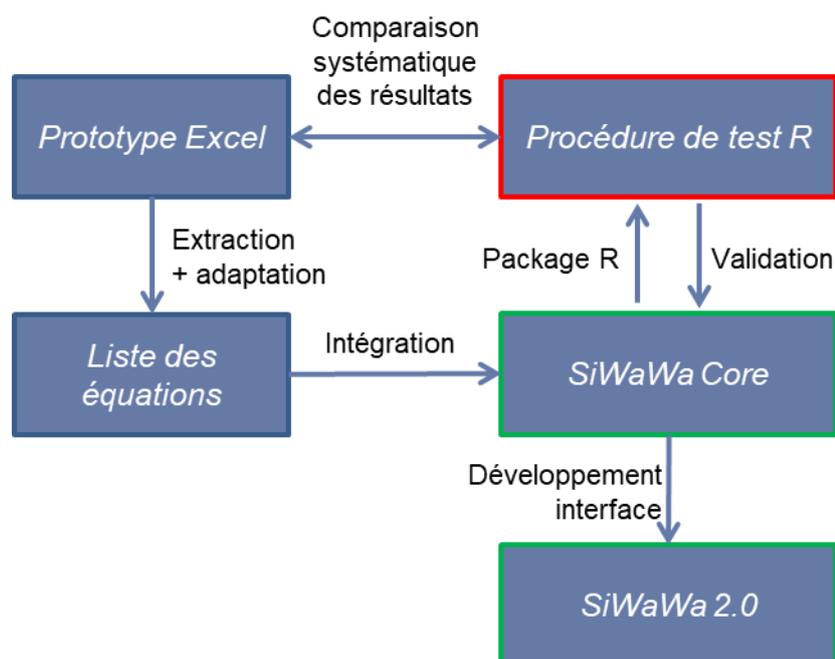
Le modèle SiWaWa a été développé itérativement et de manière modulaire par Jean-Philippe Schütz, qui a ensuite procédé à l'intégration des différents modules au sein d'un prototype réalisé sous Excel.

Un des principaux défis de ce projet et précédemment du projet européen FOCUS, a été de documenter et de formaliser le processus de transition de ce prototype Excel à une bibliothèque de classes programmée en Java, nommée SiWaWa Core. Pour ce faire, un soin tout particulier a été porté à la documentation et au test systématique de ce processus de transition.

Les équations du prototype ont tout d'abord été consciencieusement listées et la nomenclature des variables standardisée. Par la suite, ces équations ont été intégrées dans SiWaWa Core. En parallèle du développement de cette bibliothèque, un module de test a été développé dans R. En reliant SiWaWa Core à ce module de test à travers la définition d'un package R, il a été possible de tester la cohérence entre SiWaWa Core et le prototype Excel de SiWaWa. Ce processus de test a grandement facilité le développement de l'application en permettant d'identifier rapidement les problèmes en cas de divergence entre le prototype et l'application.

Une fois SiWaWa Core achevée, elle a pu servir de support au développement d'une interface pour smartphone Android, l'ensemble constituant ainsi l'application SiWaWa 2.0.

Ce processus de transition est illustré schématiquement dans la figure suivante :



**Fig. 21 : Processus de transition du prototype Excel à la bibliothèque SiWaWa Core et à l'application SiWaWa 2.0**

Ce dispositif a vocation à être pérennisé pour aider aux développements futurs de SiWaWa.

Par ailleurs, ce processus et ses différents supports (code et documentation) forment un outil efficace de transfert de connaissance au sein de la HAFL et pour ses partenaires externes, permettant aux collaborateurs de s'approprier le modèle SiWaWa plus facilement.

### 3.2. L'application SiWaWa 2.0 : présentation des fonctionnalités et de l'interface utilisateur

Les prochains paragraphes présentent les différentes fonctionnalités de l'application Android SiWaWa 2.0.

#### 3.2.1. Saisie des paramètres d'entrée

Comme expliqué dans la section 1, la force du modèle SiWaWa est de pouvoir estimer la structure et la dynamique d'un peuplement à partir d'une information limitée et disponible à l'échelle du peuplement. La saisie des paramètres d'entrée par l'utilisateur est donc simple et rapide.

L'utilisateur indique l'essence du peuplement (qui doit être monospécifique dans SiWaWa), ainsi que la surface terrière à l'hectare  $G$  et le nombre de tiges à l'hectare  $N$ . Ces deux derniers paramètres sont relativement faciles et rapides à mesurer grâce à des instruments de mesure classiques, par exemple le relascope de Bitterlich pour  $G$ , ou grâce à d'autres applications mobiles, par exemple MOTI (moti.ch), également développée à la HAFL (Rosset et al. 2017).

L'utilisateur entre également l'indice de fertilité  $IF$  correspondant à la station sur laquelle se trouve le peuplement (cf. annexe B pour une liste des indices de fertilités selon les stations et

les essences). A partir de cette information, SiWaWa est capable d'estimer l'âge du peuplement et sa hauteur dominante, complétant ainsi le triptyque de variable  $IF$ ,  $h_{dom}$ , âge.

Si l'utilisateur ne connaît pas l'indice de fertilité, mais la hauteur dominante, il peut procéder par itérations jusqu'à trouver l'indice de fertilité correspondant à la hauteur dominante recherchée. L'interface d'entrée des paramètres dans l'application permet de jouer itérativement avec la valeur d' $IF$ , grâce aux boutons + et – (voir Fig. 22).

L'utilisateur peut également entrer les diamètres minimum ( $d_{min}$ ) et maximum ( $d_{max}$ ) du peuplement s'ils sont connus, sinon SiWaWa peut les estimer (voir section 2.3.2.1). L'affichage dynamique de  $h_{dom}$  et de l'âge tient compte des valeurs entrées pour  $d_{min}$  et  $d_{max}$  qui entrent en ligne de compte dans leur détermination. Le fait de pouvoir entrer  $d_{min}$  et  $d_{max}$  est une nouveauté développée dans le cadre de ce projet.

La Fig. 22 ci-dessous représente l'écran d'accueil de SiWaWa où les paramètres d'entrée sont saisis.



**Fig. 22 : Ecran d'accueil de SiWaWa et saisie des paramètres d'entrée (exemple pour la PPSS 08)**

Le fait de pouvoir initialiser le triptyque  $IF$ ,  $h_{dom}$  et âge de manière plus flexible, par exemple en partant de  $h_{dom}$  et/ou de l'âge ou en pouvant entrer plusieurs paramètres parmi ces trois fait partie des développements futurs envisagés pour SiWaWa.

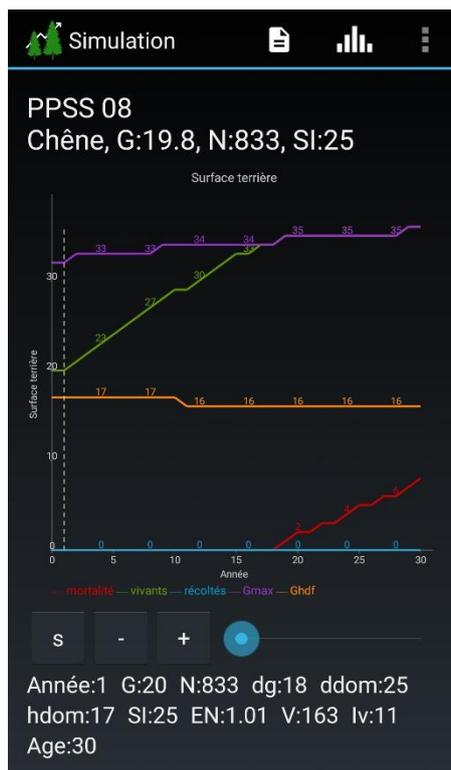
### 3.2.2. Visualisation de la structure et de l'évolution du peuplement

Une fois les paramètres d'entrée saisis et la simulation lancée, l'interface offre plusieurs écrans interactifs permettant de visualiser les résultats. Ces différents écrans sont présentés dans les rubriques suivantes.

### Evolution de la surface terrière

Le premier graphe permet de suivre l'évolution de la surface terrière du peuplement  $G$  au cours du temps pour les trente années suivantes. L'utilisateur peut comparer  $G$  à la surface terrière maximale  $G_{max}$  (voir section 2.3.3.2) et à la surface terrière recommandée (voir section 2.3.4.1). L'évolution de la surface terrière (cumulée) des arbres morts  $G_{mort}$  et de la surface terrière (cumulée) des arbres récoltés  $G_{conc}$  est également représentée.

La Fig. 23 ci-dessous représente l'écran de suivi de la surface terrière pour un exemple de peuplement donné :



**Fig. 23 : Ecran permettant de visualiser l'évolution des surfaces terrières par hectare (en vert :  $G$  ; en violet :  $G_{max}$  ; en orange :  $G_{rec}$  ( $= G_{haf}^{11}$ ) ; en rouge :  $G_{mort}$  ; en bleu :  $G_{conc} = 0$  ici)**

Sur cet écran, comme sur tous les autres, les principaux paramètres entrés par l'utilisateur sont rappelés au-dessus du graphe. L'espace en dessous du graphe rappelle ces valeurs et reporte également la valeur des variables calculées par SiWaWa, en l'occurrence le diamètre quadratique  $d_g$ , le diamètre dominant  $d_{dom}$ , la hauteur dominante  $h_{dom}$ , le niveau de production  $EN$  (Etragsniveau en allemand), le volume à l'hectare du peuplement  $V$ , et l'âge du peuplement.

Le graphe de suivi de la surface terrière est statique mais l'utilisateur peut se déplacer le long de l'axe du temps (l'axe des abscisses) grâce aux touches + ou - de l'écran qui permettent d'incrémenter ou de décrémente l'âge du peuplement d'une unité à chaque clic, ou grâce au curseur horizontal bleu, ou directement en cliquant sur le graphe. A chaque déplacement sur l'axe du temps, les données affichées en dessous du graphe s'actualisent pour

<sup>11</sup> *hdf* signifie hochdurchforstung, éclaircie par le haut en allemand. Cela rappelle que  $G_{rec}$  représente un indicateur basé sur la pratique de l'éclaircie sélective (cf. section 2.3.4.1).

correspondre à l'année sur laquelle le curseur est positionné. L'année en question est indiquée par la variable Année en dessous du graphe.

La touche S permet à l'utilisateur de passer d'un écran de visualisation à un autre.

La Fig. 24 ci-dessous représente le même écran de suivi de la surface terrière mais pour l'année 15, on voit que les données en dessous du graphe sont actualisées :

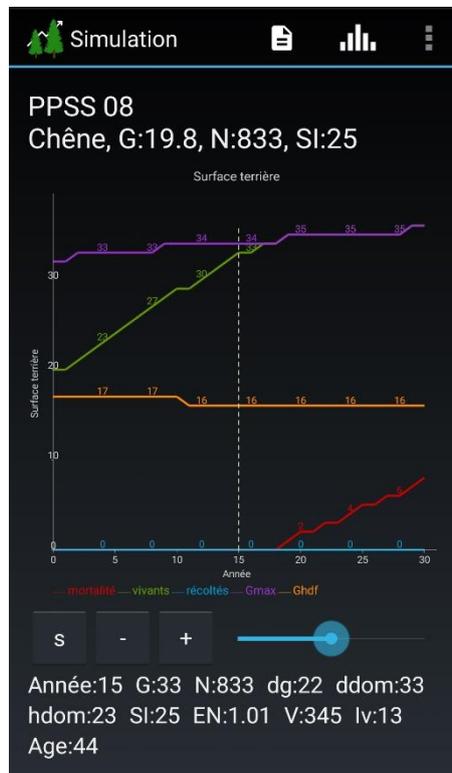


Fig. 24 : Ecran permettant de visualiser l'évolution des surfaces terrières par hectare, à l'année 15

### Evolution du volume

L'écran destiné au suivi du volume est conçu sur le même modèle. Le graphe permet de suivre l'évolution du volume par hectare du peuplement complet, ainsi que les volumes par hectare (cumulés) des arbres morts et des arbres prélevés.

La Fig. 25 ci-dessous représente l'écran de suivi du volume pour notre exemple de peuplement :

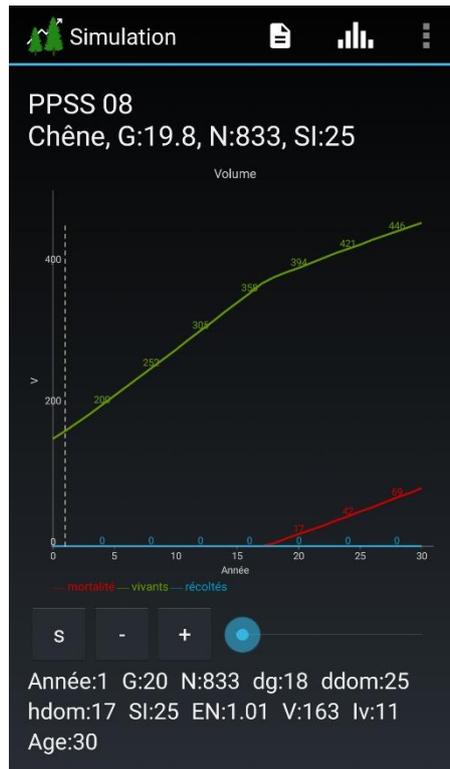
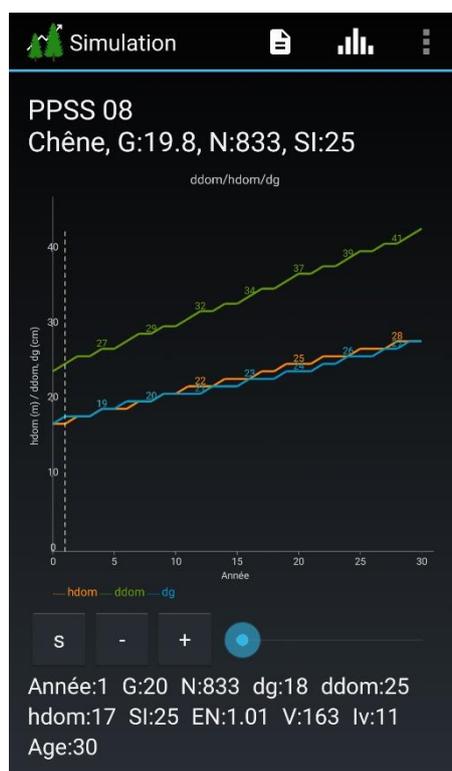


Fig. 25 : Ecran permettant de visualiser l'évolution des volumes par hectare (en vert : les arbres vivants ; en rouge : les arbres morts ; en bleu : les arbres prélevés)

### Evolution de $h_{dom}$ , $d_{dom}$ et $d_g$

Le troisième écran basé sur le même modèle permet de visualiser l'évolution de la hauteur dominante  $h_{dom}$ , du diamètre dominant  $d_{dom}$  et du diamètre quadratique  $d_g$ .

La Fig. 26 ci-dessous représente l'écran de suivi de  $h_{dom}$ ,  $d_{dom}$  et  $d_g$  pour notre exemple de peuplement :



**Fig. 26 :** Ecran permettant de visualiser l'évolution de  $h_{dom}$  (en orange),  $d_{dom}$  (en vert),  $d_g$  (en bleu)

Sur cette figure, l'échelle de l'axe des ordonnées est commune aux trois variables mais il convient de ne pas oublier que  $h_{dom}$  est exprimée en mètres alors que  $d_{dom}$  et  $d_g$  sont exprimés en centimètres.

### Distribution des diamètres<sup>12</sup>

L'écran qui permet de visualiser la distribution des diamètres par classes de 4 cm suit une logique un peu différente. Les indications numériques au-dessus et en dessous du graphe sont les mêmes que pour les écrans précédents mais le graphe en lui-même est dynamique et non plus statique.

Le graphe indique pour une année donnée les distributions respectives des diamètres pour les tiges vivantes, mortes et prélevées, avec les classes de diamètre en abscisse et le nombre de tiges en ordonnée.

<sup>12</sup> Tous les diamètres mentionnés dans cette section sont des diamètres à hauteur de poitrine (c'est-à-dire 1m30 en Suisse).

La Fig. 27 ci-dessous représente l'écran de visualisation de la distribution des diamètres pour l'année 0 de notre exemple de peuplement :

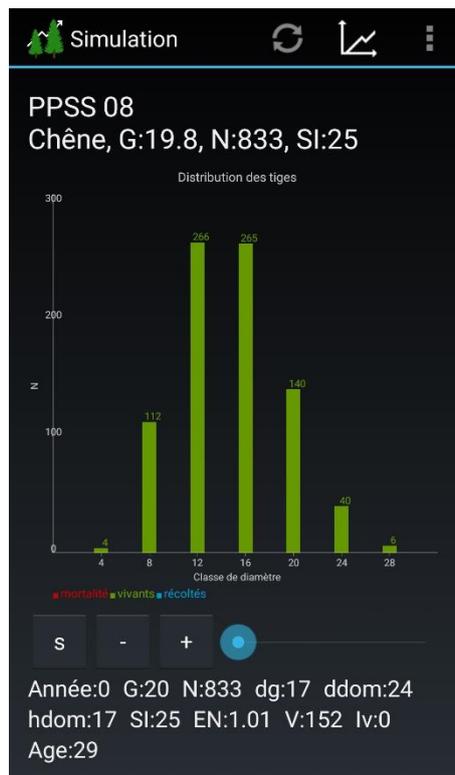


Fig. 27 : Ecran permettant de visualiser la distribution des diamètres, pour l'année 0 (en vert : les tiges vivantes ; en rouge : les tiges mortes ; en bleu : les tiges prélevées)

Le graphe est dynamique au sens où, lorsque l'utilisateur va se déplacer dans le temps, le graphe va s'actualiser pour représenter la distribution des diamètres pour l'année nouvellement définie. La navigation s'effectue cette fois uniquement grâce aux touches + et – ou au curseur horizontal bleu, un clic sur le graphe n'ayant cette fois aucun effet.

La Fig. 28 montre par exemple la distribution des diamètres pour les années 1 et 10 :



**Fig. 28 : Ecrans permettant de visualiser la distribution des diamètres, pour les années 1 et 10**

A noter que pour ce graphe, l'échelle correspondant à l'axe des ordonnées (nombre de tiges) est statique, ce qui permet de suivre plus facilement l'évolution de la distribution au cours du temps.

### Accroissement radial moyen par classe de diamètre

Le dernier écran permet de visualiser la croissance radiale moyenne par classe de diamètre. Le graphe correspondant est ici aussi dynamique et fonctionne de la même manière que le graphe de la distribution des diamètres décrit dans le paragraphe précédent.

La Fig. 29 ci-dessous représente l'écran de visualisation de la croissance radiale par classe de diamètre pour les années 1 et 10 de notre peuplement :



**Fig. 29 : Ecran permettant de visualiser la croissance radiale par classe de diamètre pour les années 1 et 10**

Au passage, la Fig. 29 illustre bien le fait que les tiges de plus gros diamètres ont la croissance la plus importante et que celle-ci décroît pour finalement devenir nulle lorsque le diamètre décroît. Cela reflète le calcul de la croissance réalisé par SiWaWa sur la base de la surface terrière susjacente  $G_{cum}$  (voir section 2.3.3.1), qui reflète à son tour la croissance différenciée des arbres en fonction de leur statut social (voir Schütz, 2015 ; Schütz and Zingg, 2007 ; Schütz et al. 2015).

### 3.2.3. Modélisation des éclaircies

Au-delà de l'estimation et de la visualisation de la structure des peuplements et de leur évolution, SiWaWa 2.0 permet également à l'utilisateur de simuler des éclaircies et visualiser leurs conséquences sur les écrans et graphes précédemment décrits.

L'assistant d'éclaircie est accessible par le menu de gestion des éclaircies, bouton  , présent en haut à droite de tous les écrans SiWaWa, comme indiqué sur la Fig. 30 ci-dessous :

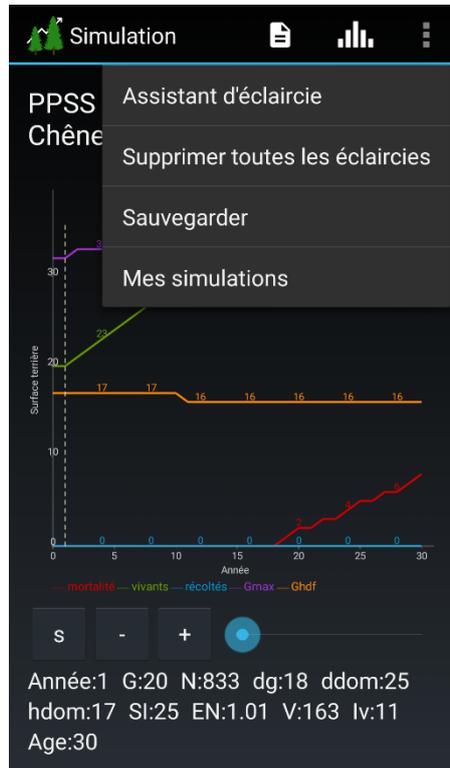


Fig. 30 : Menu de gestion des éclaircies et ouverture de l'assistant d'éclaircie

L'assistant d'éclaircie consiste en un curseur indiquant la force de l'éclaircie, c'est-à-dire le pourcentage de la surface terrière du peuplement complet (tiges vivantes) que l'utilisateur souhaite prélever, voir Fig. 31. A noter que la date de l'éclaircie en question correspond à l'année sélectionnée sur l'écran au moment où l'utilisateur ouvre le gestionnaire d'éclaircie. Dans l'exemple de la Fig. 30, il s'agit de l'année 1.



**Fig. 31 : Assistant d'éclaircie et choix de la force de l'éclaircie**

Une fois la force de l'éclaircie validée, l'utilisateur peut en visualiser les conséquences sur les différents graphes, par exemple sur le graphe de la surface terrière (Fig. 32) ou sur le graphe de la distribution des diamètres (Fig. 33).

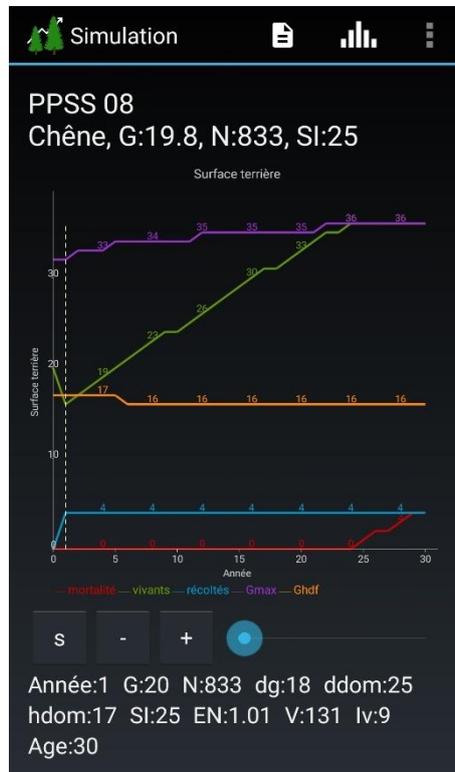


Fig. 32 : Visualisation des conséquences d'une éclaircie sur la surface terrière

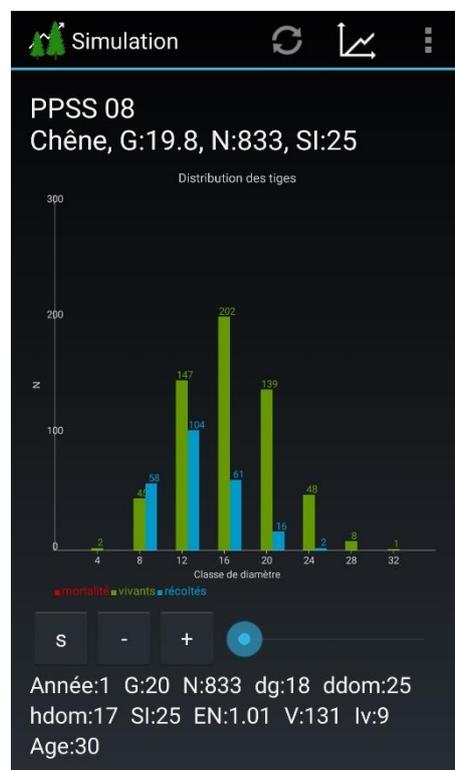


Fig. 33 : Visualisation des conséquences d'une éclaircie sur la distribution des diamètres

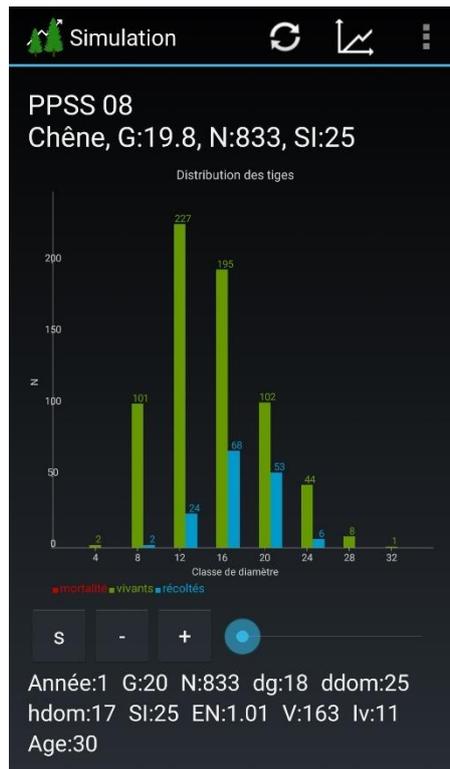
Sur la Fig. 32 et la Fig. 33 apparaissent cette fois-ci respectivement une surface terrière récoltée non-nulle et la distribution des diamètres pour les tiges prélevées.

SiWaWa permet également de simuler les effets de plusieurs éclaircies sur un même peuplement, voir Fig. 34. Cette fonctionnalité est très importante car elle permet d'aider l'utilisateur, guidé en premier lieu par les surfaces terrières maximum et recommandée, à définir un calendrier d'éclaircies à court et moyen termes.



**Fig. 34 : Visualisation des conséquences d'une série d'éclaircies sur la surface terrière (à gauche : intensité des éclaircies à 21%, à droite : à 30%)**

SiWaWa propose un second mode de saisie des éclaircies. Cette saisie est possible depuis l'écran représentant la distribution des diamètres par le nombre de tiges, voir Fig. 35. Sur cet écran, l'utilisateur peut entrer une éclaircie en personnalisant le nombre de tiges prélevés respectivement dans chaque classe de diamètre. Pour ce faire, l'utilisateur clique une ou plusieurs fois sur chaque barre de l'histogramme jusqu'à ce que la répartition des tiges entre arbres vivants et arbres récoltés pour chaque classe de diamètre lui convienne. Le nombre de tiges changeant de statut à chaque clic est défini par SiWaWa en fonction du nombre de tiges total dans la classe de diamètre correspondante.



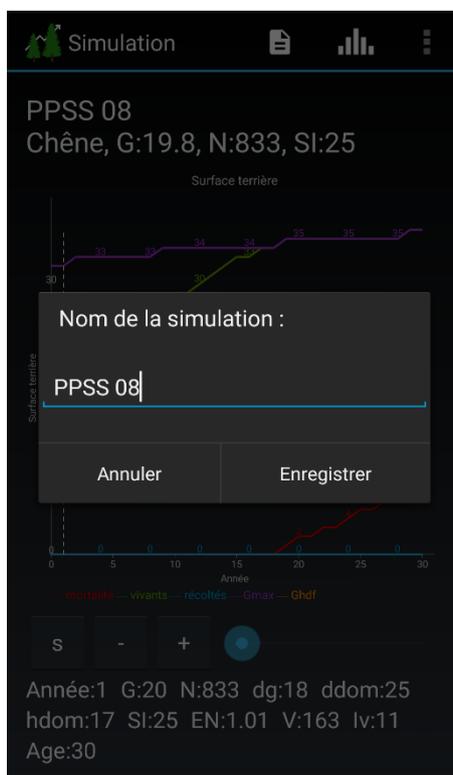
**Fig. 35 : Saisie des éclaircies au niveau des classes de diamètre**

Ce second mode de saisie est plus complexe pour l'utilisateur que la saisie d'une éclaircie par son intensité (en fonction de  $G$ ) mais elle est aussi plus flexible car l'utilisateur peut ainsi décider de la distribution des diamètres parmi les tiges prélevées.

### 3.2.4. Sauvegarde et exportation des résultats

Une fois qu'une simulation est exécutée, éventuellement complétée par une ou plusieurs éclaircies, elle peut être sauvegardée pour être rouverte plus tard, ces deux actions s'effectuant par le menu de gestion des éclaircies (Fig. 30).

Au moment de la sauvegarde, l'utilisateur doit par ailleurs nommer la simulation, comme le montre la Fig. 36 ci-dessous :



**Fig. 36 : Choix d'un nom pour la simulation au moment de sa sauvegarde**

Enfin, les résultats d'une simulation peuvent également être exportés au format csv afin de pouvoir être partagés et analysés, par exemple avec Excel. SiWaWa propose à l'utilisateur deux types de téléchargement comme le montre la Fig. 37. Soit celui-ci télécharge le fichier des données correspondant au peuplement vu dans son ensemble ( $G$ ,  $N$ , etc. voir tableaux Tab. 2 et Tab. 3), soit il télécharge deux fichiers, l'un contenant les données au niveau du peuplement et l'autre les données définies au niveau de la liste des arbres générés par SiWaWa (voir Tab. 3 et section 2.3.2.1). Dans les deux cas, les données sont fournies pour les trente années que dure la simulation.



**Fig. 37 : Choix d'un type d'exportation dans l'assistant d'exportation**

#### **4. Placettes permanentes de suivi sylvicole (PPSS) : méthode de relevé et mise en valeur sur [martelage.sylvotheque.ch](http://martelage.sylvotheque.ch)**

*Christian Rosset, Clotilde Gollut, Viola Sala, Ulrich Fiedler*

*En collaboration avec l'entreprise forestière de la Bourgeoisie de Berne (FBB)*

Le projet « SiWaWa 2.0 et Placettes Permanentes de Suivi Sylvicole (PPSS) » comprend également un volet de test et d'application de SiWaWa sur le terrain, basé sur une méthode de relevé pragmatique, simple et efficace à l'intention des praticiens définissant des placettes permanentes de suivi sylvicole (PPSS). Cette méthode offre la possibilité d'obtenir des données pour tester SiWaWa dans une multitude de conditions mais, bien au-delà, elle permet aussi de manière générale, de documenter et de quantifier les pratiques sylvicoles et leurs conséquences à court, moyen et long-termes en vue de faire évoluer les concepts de soins et d'éclaircies.

Cette méthode de relevé PPSS s'accompagne de la plateforme informatique [martelage.sylvotheque.ch](http://martelage.sylvotheque.ch) qui permet de gérer les placettes et de mieux les valoriser avec la possibilité de documenter des martelages et de les caractériser grâce à certaines variables dendrométriques clés.

Le réseau test de PPSS ayant permis d'évaluer SiWaWa a été installé dans les forêts de la Bourgeoisie de Berne, en collaboration avec son entreprise forestière.

Les PPSS sont complémentaires des placettes d'essai de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) et des martélosopes en offrant la possibilité de démultiplier les situations prises en compte grâce à leurs coûts moins élevés.

##### **4.1. Principaux objectifs des PPSS**

Les PPSS s'adressent à un public de gestionnaires forestiers mais aussi aux chercheurs en sciences forestières. Pour les gestionnaires forestiers, les PPSS doivent permettre :

- d'illustrer, quantifier et documenter les pratiques sylvicoles dans l'entreprise, en d'autres termes, formaliser le savoir-faire,
- d'assurer un suivi sur le moyen-long terme pour mieux se rendre compte des effets de ces pratiques,
- d'optimiser les pratiques actuelles et tester de nouvelles approches au moyen de différents types de martelages,
- d'échanger ses expériences et son savoir-faire avec d'autres professionnels en ayant la possibilité de comparer des situations similaires et d'en discuter,
- de disposer d'un outil de simulation de la croissance robuste dont les conditions d'utilisation et le niveau de précision susceptible d'être atteint, sont bien connus et documentés.

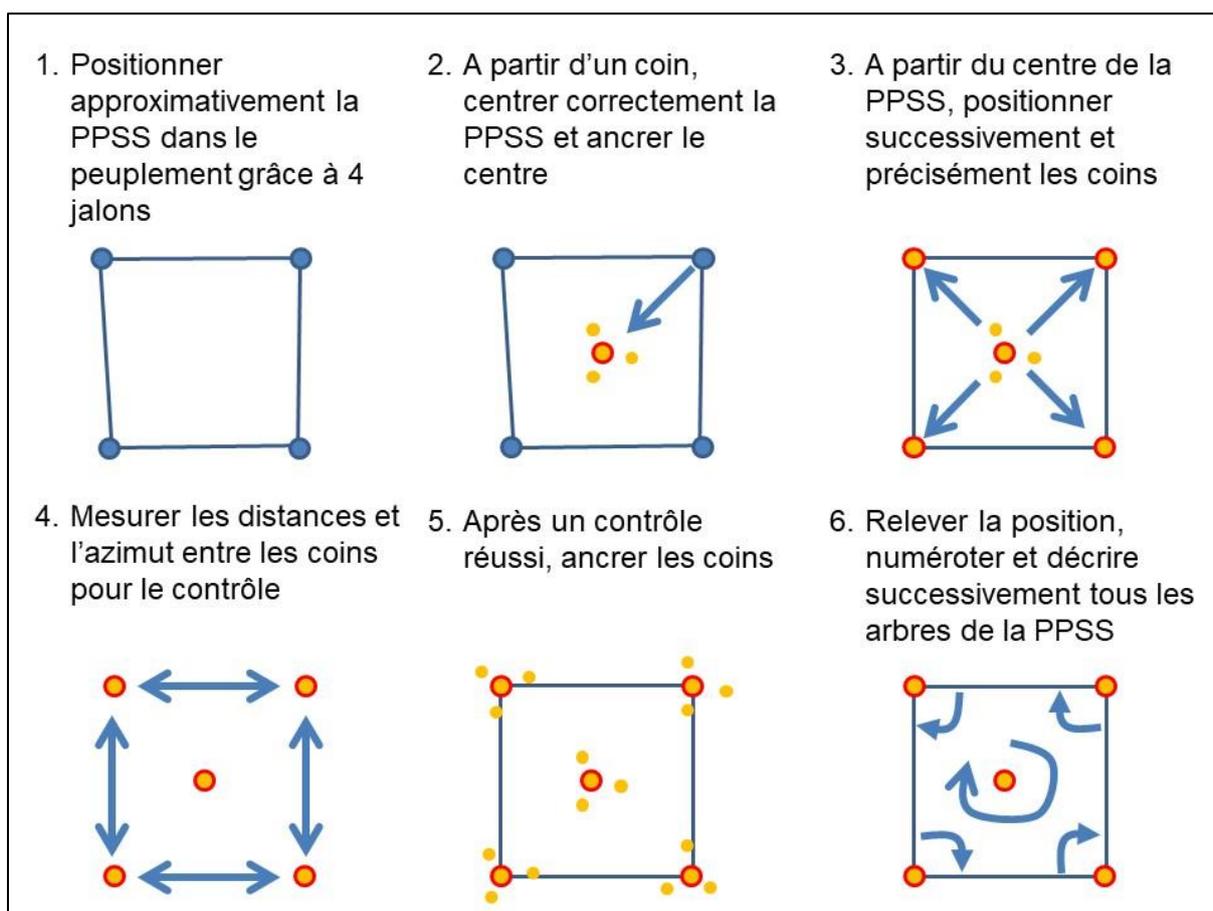
Pour les chercheurs en sciences forestières, les PPSS doivent permettre :

- de pouvoir tester et valider SiWaWa dans un grand nombre de situations et mettre en évidence les forces et les faiblesses du modèle, en particulier le niveau de précision susceptible d'être atteint, et reconnaître les priorités d'améliorations,
- de disposer d'une base de données conséquente et dynamique pour perfectionner la modélisation et la faire évoluer, non seulement sur l'état du boisement mais aussi sur les interventions sylvicoles et tout particulièrement sur les éclaircies.

Afin de répondre à ces problématiques, le choix de l'emplacement de ces placettes est réalisé délibérément, pour être représentatives de peuplements purs et à différents stades de développement, et non pas au hasard comme dans un inventaire classique. Les PPSS ont en effet pour vocation d'illustrer les pratiques sylvicoles de l'entreprise à l'aide d'exemples concrets et instructifs et pour permettre de tester SiWaWa et d'illustrer l'application concrète de ce modèle de croissance. Dans le cadre de ce projet, nous nous sommes focalisés principalement sur quatre essences : épicéa, douglas, hêtre et chêne, à plusieurs stades de développement.

#### 4.2. Méthode de relevé sur le terrain

La méthode de relevé des PPSS est résumée dans la Fig. 38 :



**Fig. 38 : Etapes principales de mise en place d'une PPSS**

Il s'agit d'abord de fixer cinq points de repère (centre + coins) afin d'ancrer la PPSS dans l'espace puis de relever la position de chaque arbre par rapport à un de ces cinq points (distance et azimut) ainsi que les caractéristiques principales de chacun de ces arbres

(essence, DHP, position sociale). Le centre de la placette est repéré par des coordonnées GPS Cette méthode requiert relativement peu de matériel. Dans le cadre de la mise en place du réseau test de PPSS dans les forêts de la Bourgeoisie de Berne, un Vertex a été utilisé pour mesurer les distances horizontales, une boussole Wyssen pour mesurer les azimuts et un compas forestier pour mesurer les diamètres des arbres. Les points de repère étaient visualisés par des jalons.

La méthode de relevé des PPSS est présentée en détail dans un document au format PDF (en allemand uniquement) disponible en ligne sur le wiki [sylvotheque.ch](http://sylvotheque.ch). Cette méthode a déjà été introduite dans le cadre de l'enseignement au sein de la HAFL et a pu être appliquée de manière autonome par les étudiants. Les relevés sont réalisés par des groupes de deux personnes et ne demandent pas de compétence particulière. Il faut compter entre une demi-journée et une journée entière pour faire le relevé d'une PPSS, selon le nombre d'arbres concerné.

Le principal enjeu dans la mise en place des PPSS est de trouver un bon équilibre en ce qui concerne l'étendue des placettes. Elles doivent être suffisamment grandes pour permettre de reproduire de façon pertinente un martelage et minimiser les effets de bordure, qui sont d'autant plus importants que la placette est petite. Elles doivent être en même temps aussi petites que possible pour diminuer les coûts des relevés.

D'après Vuokila (1965), la surface optimale des placettes pour la réalisation d'inventaires forestiers dépend de la hauteur dominante du peuplement inventorié. Plus précisément, l'auteur propose pour un peuplement de pin une surface de 1 are pour chaque mètre de hauteur dominante. Afin d'assurer la présence d'un nombre suffisant d'arbres de place pour documenter de façon pertinente un martelage, un facteur de correction de la surface a été déterminé pour chaque essence en tenant compte du nombre d'arbres de place communément admis (cf. Ammann, 2013). Le Tab. 4 ci-après présente les surfaces optimales selon la hauteur dominante et l'essence dominante.

Tab. 4 : Dimensions des PPSS et nombre d'arbres de place en fonction de l'essence et de  $h_{dom}$

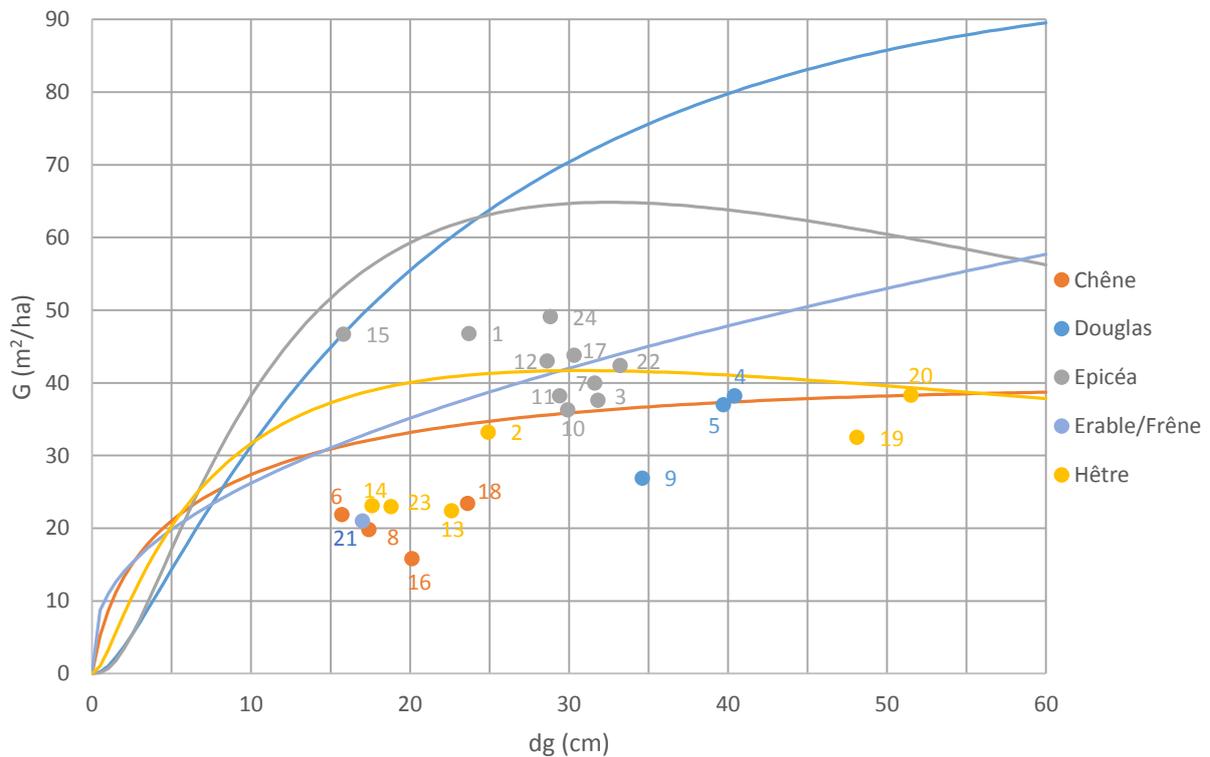
Essence majoritaire (# arbres de place/ha)	$h_{dom} \leq 10$ m				$h_{dom} \leq 20$ m				$h_{dom} \leq 30$ m				$h_{dom} \leq 40$ m			
	Surface de la PPSS, en m <sup>2</sup>	# Arbres de place	Longueur du côté, en m	Longueur demi-diagonale, en m	Surface de la PPSS, en m <sup>2</sup>	# Arbres de place	Longueur du côté, en m	Longueur demi-diagonale, en m	Surface de la PPSS, en m <sup>2</sup>	# Arbres de place	Longueur du côté, en m	Longueur demi-diagonale, en m	Surface de la PPSS, en m <sup>2</sup>	# Arbres de place	Longueur du côté, en m	Longueur demi-diagonale, en m
<b>Hêtre (120)</b>	1'000	12	32	22	2'000	24	45	32	3'000	36	55	39	4'000	48	63	45
<b>Frêne (60)</b>	2'000	12	44	31	3'900	24	63	44	5'900	35	77	54	7'800	47	89	63
<b>Erable (80)</b>	1'400	12	38	27	2'900	23	54	38	4'300	35	66	46	5'800	46	76	54
<b>Chêne (50)</b>	2'300	11	47	34	4'500	23	67	47	6'800	34	82	58	9'000	45	95	67
<b>Epicéa (200)</b>	600	13	25	18	1'300	26	36	25	1'900	38	44	31	2'600	51	51	36
<b>Pin Sylv. (150)</b>	800	12	28	20	1'600	24	40	28	2'400	36	49	35	3'200	49	57	40
<b>Douglas /Mélèze (100)</b>	1'200	12	35	25	2'400	24	49	35	3'600	36	60	43	4'800	48	70	49

Par ailleurs, la surface d'une PPSS donnée a vocation à s'agrandir au fur et à mesure de l'augmentation de sa hauteur dominante, suivant les indications du Tab. 4. L'emplacement choisi doit donc prendre en compte autant que possible cette expansion future.

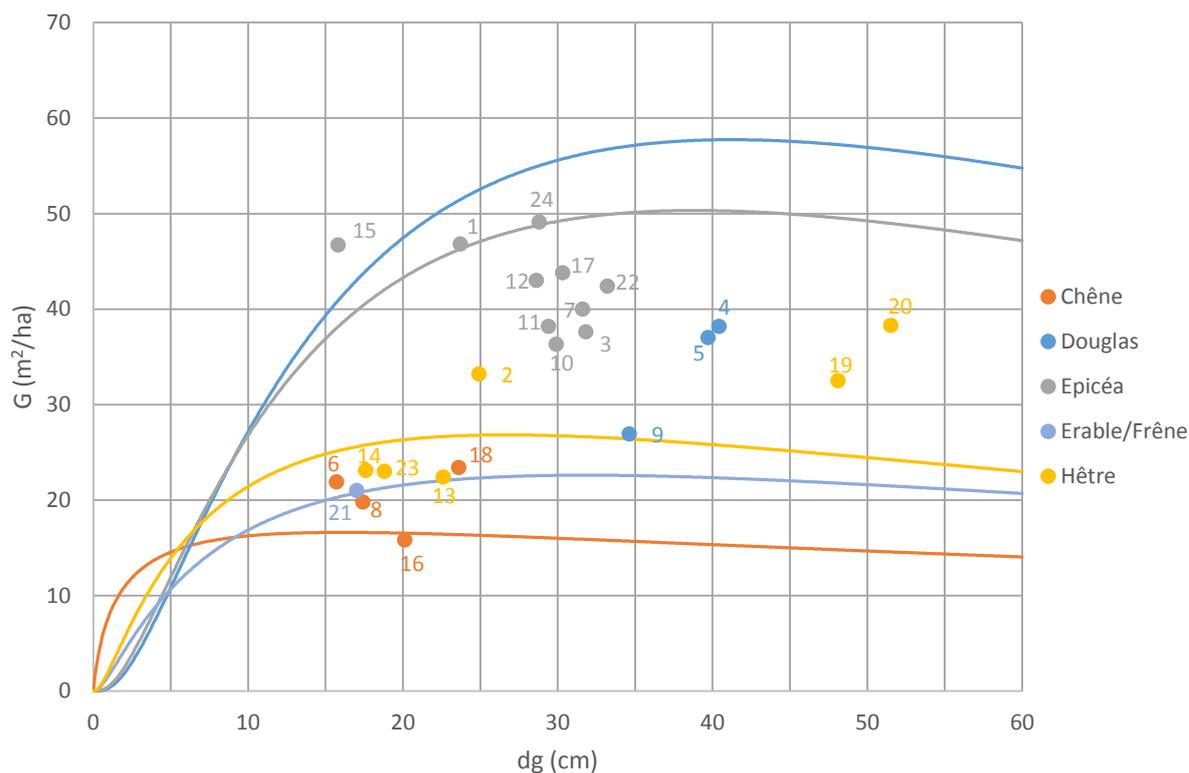
### 4.3. Réseau des PPSS

Sur la base de la méthodologie décrite dans la section précédente, un réseau test de PPSS a été mis en place par la HAFL grâce à la collaboration de l'entreprise forestière de la Bourgeoisie de Berne (Forstbetrieb Bern, FBB). Dans le cadre du projet SiWaWa 2.0, 24 PPSS ont été installées dans les environs de Berne : 10 dans des peuplements d'épicéas, 4 pour le chêne, 6 pour le hêtre, 3 pour le douglas, 1 pour l'érable. Les PPSS ont une surface moyenne de 0.17 ha (620 m<sup>2</sup> pour la plus petite jusqu'à 0.40 ha pour la plus grande). Par ailleurs, ces PPSS se situent dans des peuplements à des stades de développement assez divers.

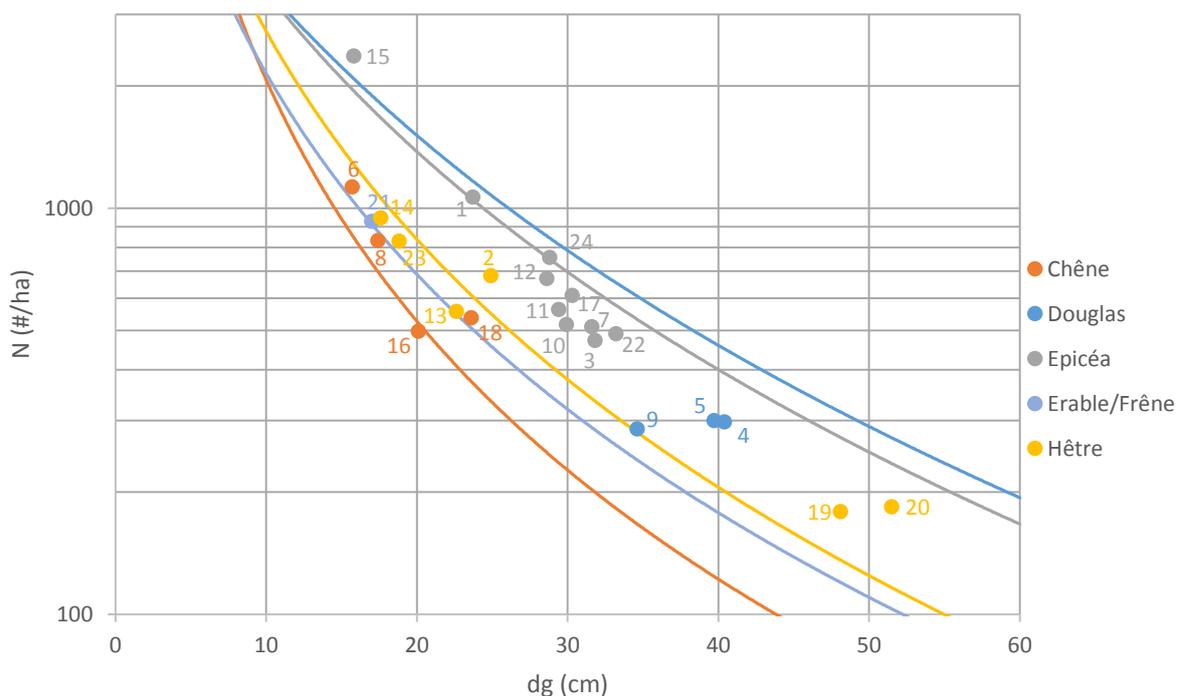
Les figures ci-dessous permettent une caractérisation visuelle des 24 PPSS dans le plan ( $d_g, G$ ), en comparaison de  $G_{max-moyen}$  (Fig. 39) et  $G_{rec}$  (Fig. 40), et dans le plan ( $d_g, N$ ) en comparaison de  $N_{rec}$  (Fig. 41).



**Fig. 39 : Caractérisation des PPSS dans le plan ( $d_g, G$ ) et comparaison avec  $G_{max-moyen}$  (les chiffres correspondent aux références des différentes PPSS)**



**Fig. 40 : Caractérisation des PPSS dans le plan ( $d_g, G$ ) et comparaison avec  $G_{rec}$  (les chiffres correspondent aux références des différentes PPSS)**

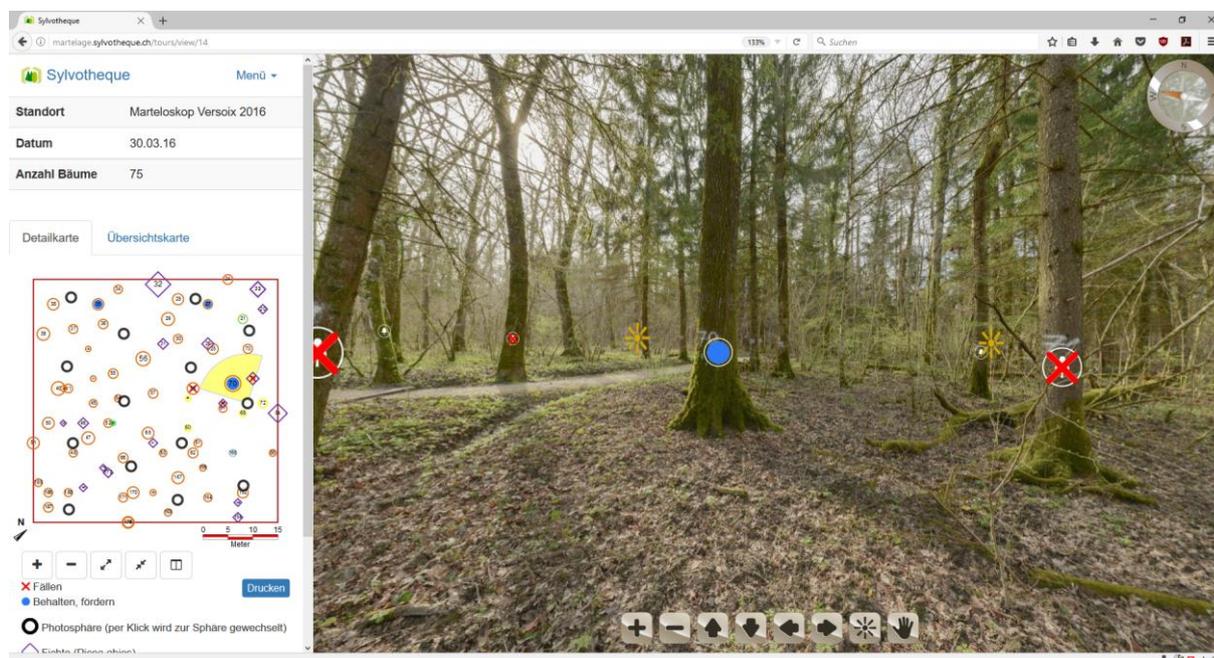


**Fig. 41 : Caractérisation des PPSS dans le plan ( $d_g, N$ ) et comparaison avec  $N_{rec}$  (les chiffres correspondent aux références des différentes PPSS)**

Une information détaillée sur les 24 premières PPSS est disponible à travers des « fiches peuplement » dont un exemple est montré en Annexe C. L'ensemble des fiches peuplement est disponible en ligne sur le wiki [siwawa.org](http://siwawa.org).

#### 4.4. Plateforme internet martelage.sylvotheque.ch

Afin de pouvoir gérer et partager facilement les données relevées sur les différentes PPSS, la plateforme en ligne [martelage.sylvotheque.ch](http://martelage.sylvotheque.ch) a été adaptée et améliorée. La première version de cette plateforme en ligne a été développée sur mandat de la Direction générale de l'agriculture et de la nature du Département de l'environnement, des transports et de l'agriculture (DETA) de la République et Canton de Genève. L'objectif de cette plateforme internet était de pouvoir effectuer des martelages virtuels dans le martelocope de Versoix. L'utilisateur a la possibilité de se déplacer dans un tour virtuel composé de photosphères (panorama à 360° projeté sur une sphère, cf. Rosset et Sala (2017) pour plus d'informations) et de modifier le statut de martelage de chaque arbre en cliquant sur la vignette qui lui est spécifique. Une carte représentant la position de chaque arbre est disponible à gauche des photosphères pour garder la vue d'ensemble sur la surface du tour virtuel (voir Fig. 42). L'utilisateur a aussi la possibilité de se rendre en tout temps sur une page internet dédiée à la présentation des résultats de son martelage (pour plus de détails, cf. le menu « A propos de Martelage » sur [martelage.sylvotheque.ch](http://martelage.sylvotheque.ch)).



**Fig. 42 : Interface utilisateur principale de l'application [martelage.sylvotheque.ch](http://martelage.sylvotheque.ch) développée pour le Canton de Genève. Les arbres de place sont signalés avec une pastille bleue, alors que les concurrents sont visualisés avec une croix rouge.**

Les adaptations apportées à [martelage.sylvotheque.ch](http://martelage.sylvotheque.ch) dans le cadre de ce projet sont les suivantes :

- Carte schématique avec l'emplacement de chaque arbre :
  - Cette carte est devenue interactive. L'utilisateur peut cliquer sur chaque arbre afin d'obtenir des informations sur l'arbre concerné et/ou changer son statut de martelage (voir section 0).
  - La carte peut être agrandie jusqu'à occuper tout l'écran afin de faciliter la documentation d'un martelage directement sur le terrain.
  - La technologie d'affichage de cette carte a été actualisée.

- Page statistique sur le martelage effectué :
  - Un type de page spécifique pour les PPSS a été créé (voir section 0).
- Importation et gestion des données sur les PPSS :
  - Simplification pour l'administrateur des processus d'importation et de gestion des données sur les PPSS (l'importation des données d'une PPSS prend moins de 20 minutes)
  - Les PPSS peuvent être ajoutées même lorsque les photosphères correspondantes ne sont pas disponibles. Dans ce cas, la carte avec l'emplacement des arbres occupe automatiquement tout l'écran lorsque l'utilisateur sélectionne la PPSS en question.

Les sections suivantes présentent, à grand renfort d'illustrations, les principales fonctionnalités actuelles de la plateforme [martelage.sylvotheque.ch](http://martelage.sylvotheque.ch) en lien avec les PPSS.

#### 4.4.1. Carte interactive offrant une vue d'ensemble de la localisation des PPSS

La page d'accueil de la plateforme propose une carte interactive sur laquelle l'utilisateur peut zoomer et se déplacer afin de visualiser la localisation des différents tours proposés. Il peut également ouvrir un tour directement à partir de cette carte en cliquant sur le libellé de la placette de son choix. La Fig. 43 montre une capture d'écran réalisée sur cette carte :

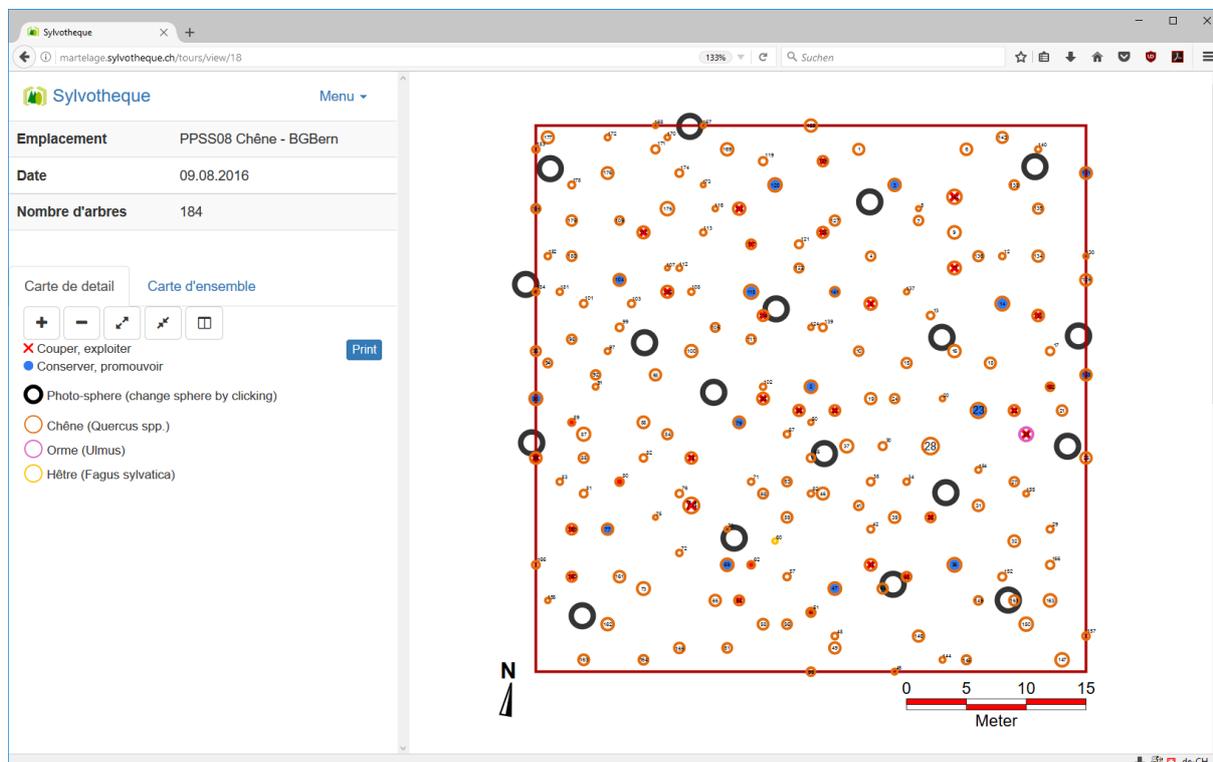
### Tours



**Fig. 43 : Carte interactive offrant une vue d'ensemble de la localisation des PPSS (ici zoom sur le secteur de Könizbergwald et affichage du libellé de la PPSS 5)**

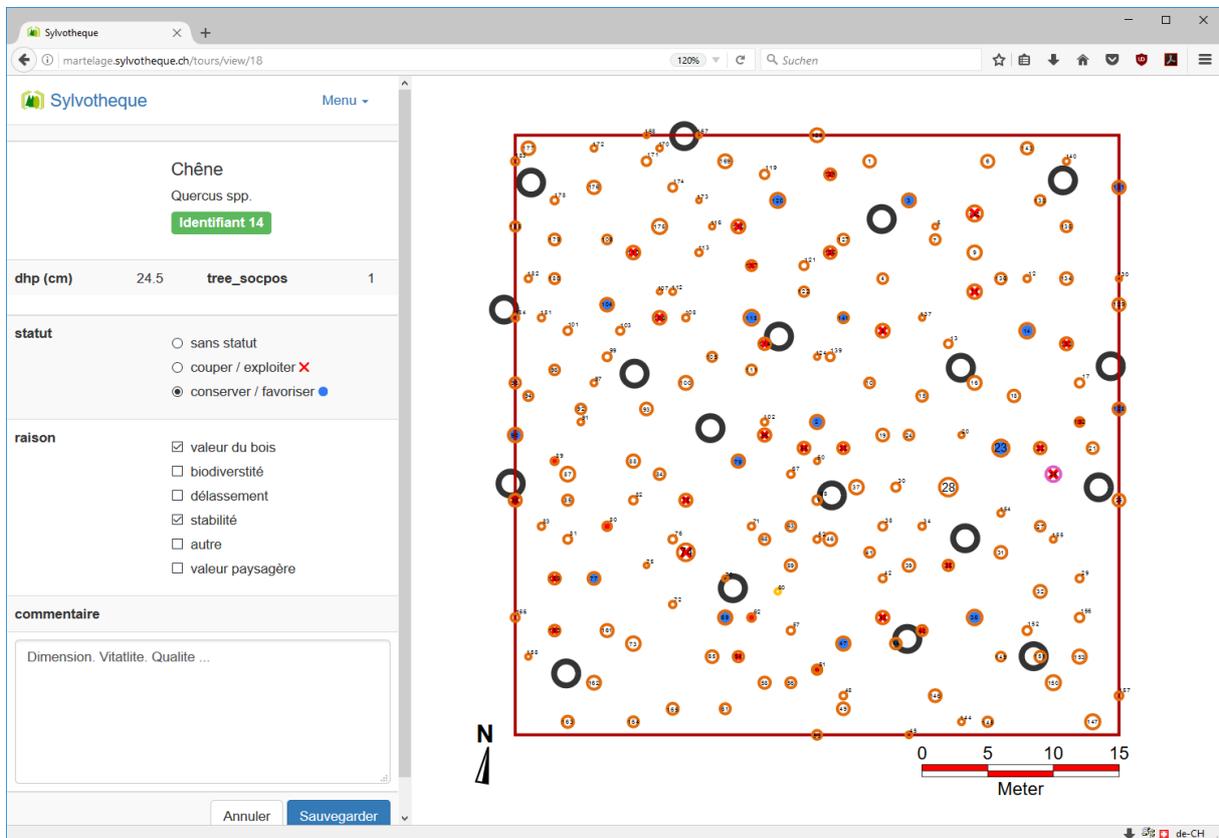
#### 4.4.2. Deux modes de visualisation des PPSS

La plateforme permet à n'importe quel utilisateur de visualiser les PPSS à travers une carte schématique représentant la position des différents arbres sur la placette, ainsi que leurs essences et leurs diamètres respectifs. A titre d'exemple, la Fig. 44 correspond à la visualisation de la PPSS 08 :



**Fig. 44 : Carte schématique avec la position de chaque arbre de la PPSS 08 (Bremgartenwald, Berne). La forme et la couleur des symboles correspondent à l'essence ; la taille des symboles est en proportion du DHP des arbres.**

Cette carte est interactive. Lorsque l'utilisateur clique sur un arbre en particulier, l'information concernant cet arbre, par exemple son diamètre et sa position sociale, s'affiche dans la partie gauche de l'écran (voir Fig. 45). L'utilisateur a aussi la possibilité de changer le statut de martelage de l'arbre et d'indiquer les raisons de son choix.



**Fig. 45** : Carte schématique avec la position de chaque arbre de la PPSS 08 (Bremgartenwald, Berne) dans la partie droite de l'écran et accès aux informations disponibles sur les arbres dans la partie gauche après avoir cliqué sur le symbole d'un arbre.

La Fig. 46 montre à titre d'exemple l'interface utilisateur lorsque des photosphères sont disponibles pour une PPSS, dans ce cas la PPSS 08. Un symbole est ajouté sur chaque arbre directement dans les photosphères. Ce symbole permet également à l'utilisateur d'accéder aux informations disponibles sur l'arbre en question et de changer son statut de martelage.

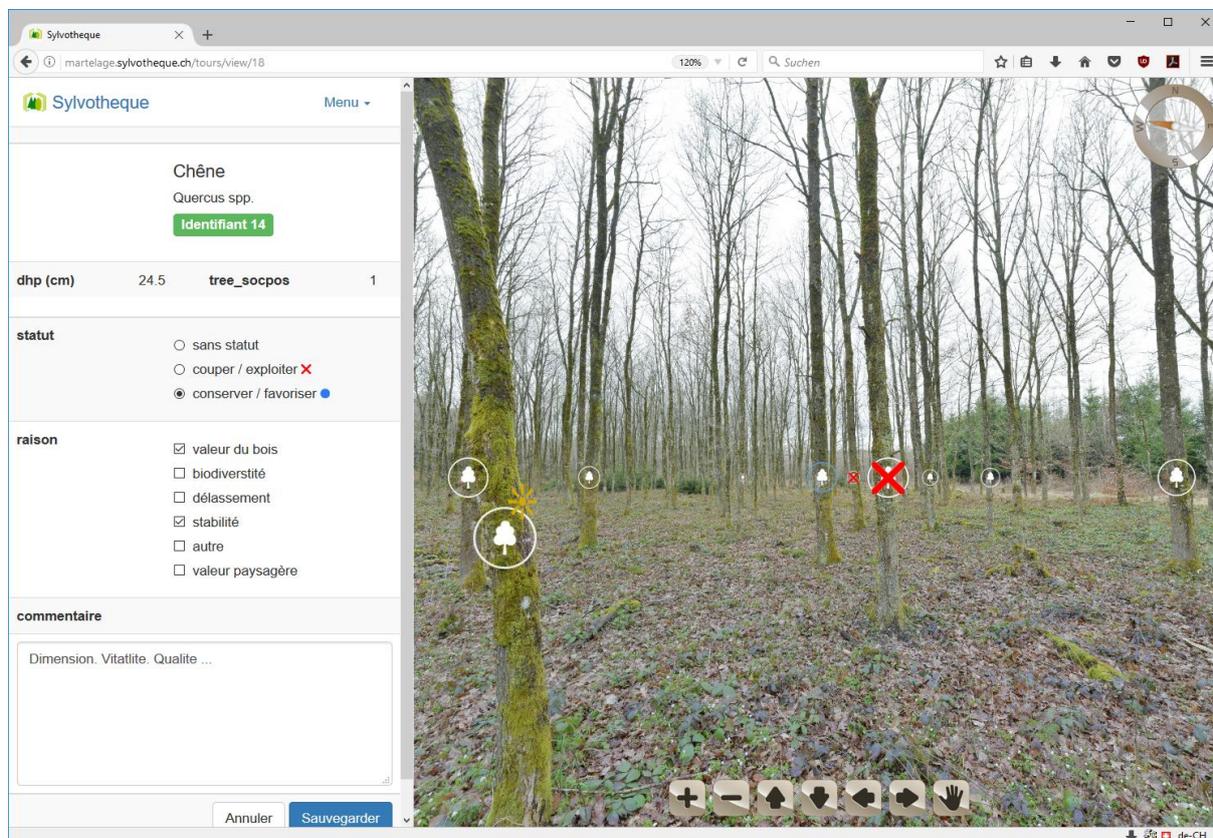
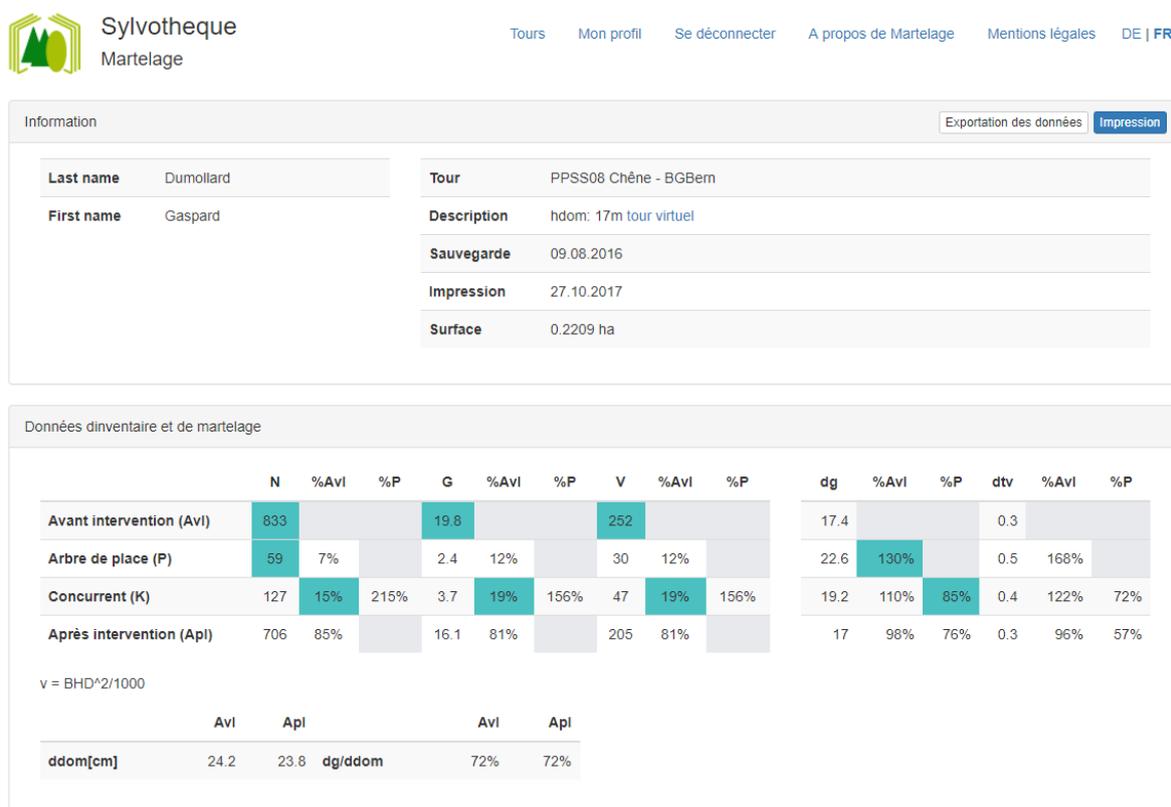


Fig. 46 : Visualisation interactive de la PPSS 08 (Bremgarten, Berne) par photosphères

### 4.4.3. Affichage des statistiques spécifiques aux PPSS

La dernière fonctionnalité importante de la plateforme *martelage.sylvotheque.ch* est l'affichage de statistiques concernant les PPSS. Ces statistiques permettent de caractériser à la fois la structure initiale du peuplement et les conséquences d'un martelage donné sur ce peuplement. La Fig. 47, la Fig. 48 et la Fig. 49 ci-dessous indiquent les différentes rubriques qui apparaissent au sein de cet onglet statistiques :



**Fig. 47 : Descriptif de la PPSS et statistiques sur les variables à l'hectare et les variables moyennes du peuplement avant et après éclaircie, pour les arbres de place et les concurrents (PPSS 08).**

Sur la Fig. 47, l'en-tête indique certaines données utilisateurs, c'est-à-dire le nom de l'utilisateur logué sur la plateforme et la date actuelle, ainsi qu'une présentation sommaire de la PPSS.

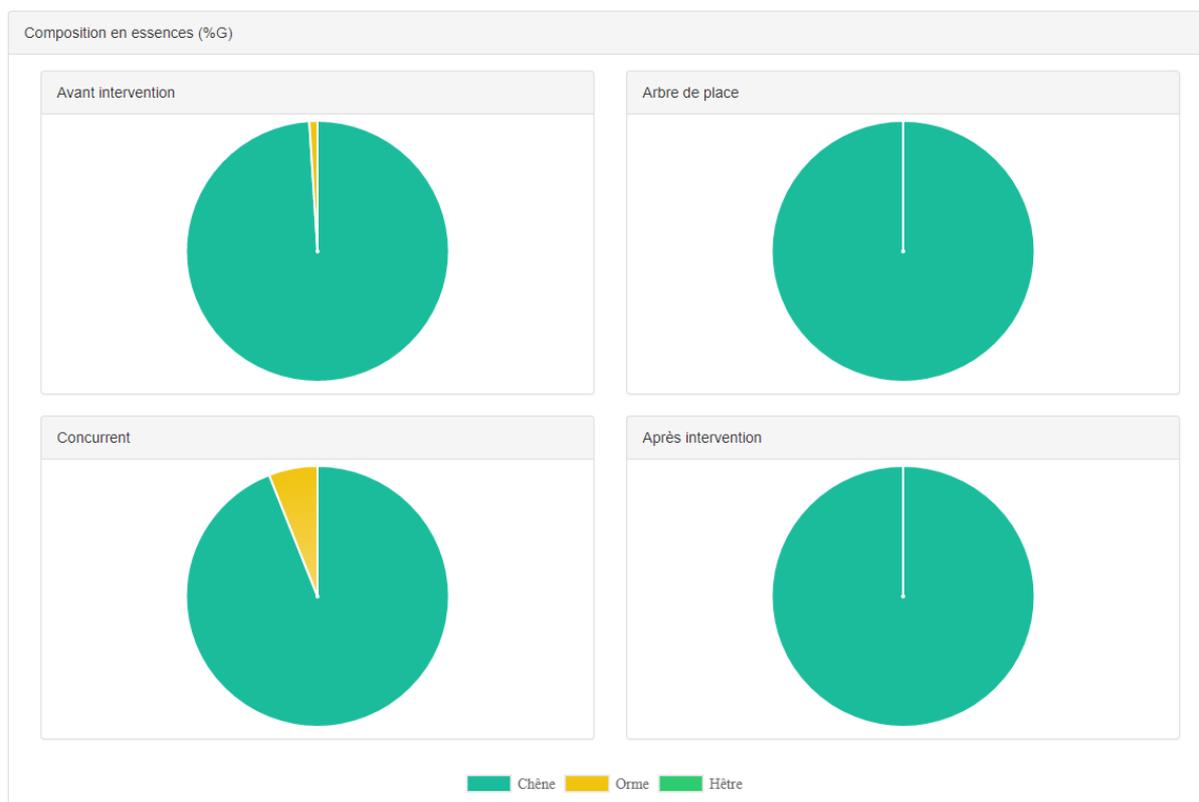
Le tableau de données en dessous de cet en-tête indique certaines valeurs à l'hectare caractéristiques du peuplement, que sont le nombre de tiges ( $N$ ), la surface terrière ( $G$ ) et le volume ( $V$ ), ainsi que le diamètre quadratique moyen ( $d_g$ ). Ces valeurs sont données pour le peuplement avant et après intervention et spécifiquement pour les arbres de places et les arbres concurrents. En outre, pour les arbres de place, pour les concurrents et pour le peuplement entier après éclaircie, les valeurs relatives au peuplement avant éclaircie sont données en pourcentage.

Il est ainsi possible de chiffrer et de caractériser un martelage par exemple par rapport :

- au nombre d'arbres de place par ha effectivement sélectionnés dans la PPSS (59 dans la Fig. 47) ; l'utilisateur peut comparer ce résultat avec les objectifs qu'il s'était fixé avant le martelage ;

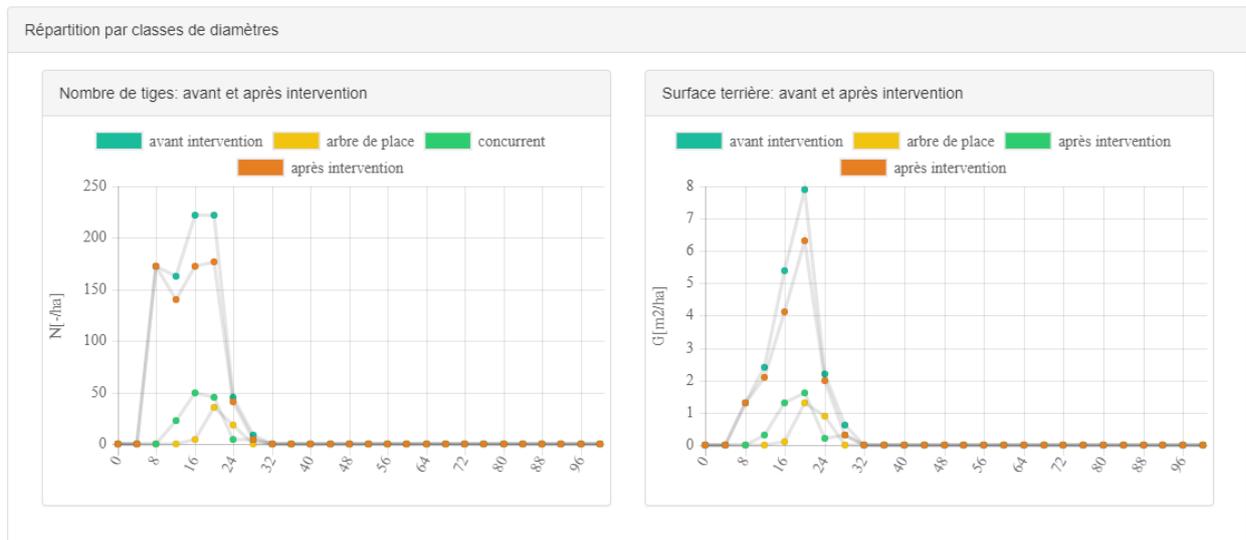
- à l'intensité de l'intervention exprimée en nombre de concurrents moyen par arbre de place (215% dans la Fig. 47) et en pourcentage de surface terrières exploitée (19% dans la Fig. 47) ;
- au type d'intervention selon le facteur de Hiley (cf. section 2.3.4.2 ; 110% dans la Fig. 47) ainsi que le rapport entre le diamètre quadratique moyen des concurrents par rapport à celui des arbres de place (85% dans la Fig. 47) ;
- au recul éventuel du diamètre dominant suite à l'exploitation de un ou plusieurs arbres dominants considérés comme des concurrents (0.4 cm de moins dans la Fig. 47 en passant de 24.2 avant exploitation à 23.8 après exploitation).

La Fig. 48 indique, grâce à des diagrammes circulaires, la composition en essence du peuplement avant et après éclaircie, ainsi que pour les arbres de place et les concurrents.



**Fig. 48 : Diagrammes circulaires indiquant la composition en essences du peuplement avant et après éclaircie, pour les arbres de place et pour les concurrents**

L'onglet statistiques comprend également des graphiques illustrant la distribution des diamètres, respectivement par le nombre de tiges et par la surface terrière. Ces graphiques sont présentés dans la Fig. 49 :



**Fig. 49 : Graphiques représentant la distribution des diamètres par le nombre de tiges et par la surface terrière pour le peuplement avant et après éclaircie, pour les arbres de place et pour les concurrents**

L'utilisateur peut interagir avec ces graphiques en cliquant sur les éléments de la légende pour faire apparaître ou disparaître la visualisation des données correspondantes.

Pour finir, l'utilisateur a la possibilité d'imprimer les résultats obtenus et de sauvegarder son martelage sous format CSV, ce qui permet de tester différentes variantes et facilite l'échange d'information entre personnes concernées.

## 5. Données PPSS et validation de l'estimation de la distribution des diamètres par SiWaWa

*Valère Martin, Gaspard Dumollard*

Les PPSS offrent une série d'inventaires complets n'ayant pas été utilisés dans l'estimation du modèle SiWaWa et permettant d'évaluer sa capacité à estimer la distribution des diamètres. Par ailleurs, des martelages sur le terrain ont été réalisés pour un certain nombre de PPSS par les collaborateurs de l'entreprise forestière de la bourgeoisie de Berne et des sylviculteurs expérimentés externes à cette organisation. Les données issues de ces martelages permettent d'évaluer l'estimation qui est faite par SiWaWa de la distribution des arbres concurrents prélevés lors d'une éclaircie et des arbres de place.

En tout, l'estimation de la distribution des diamètres calculée par SiWaWa a été comparée aux relevés de terrain pour 24 PPSS, et l'estimation de la distribution des diamètres pour les arbres concurrents prélevés et les arbres de place a été comparée pour 11 martelages réalisés sur 8 placettes. Les PPSS sont situées dans les environs de Berne, c'est-à-dire dans le plateau suisse, et dans des peuplements en futaie régulière, soit dans le domaine de validité de SiWaWa.

Les sections 5.1 et 0 décrivent la méthodologie employée pour conduire ces tests et présentent un résumé des résultats obtenus. Les résultats détaillés de ces tests sont documentés au travers de fiches PPSS. Celles-ci sont nommées « fiches peuplement » lorsque les tests portent sur la distribution des diamètres pour l'ensemble des tiges d'un peuplement, et « fiches martelage » lorsque les tests portent sur les distributions en diamètres respectives des arbres de place et des concurrents. Un exemple de fiche peuplement et un exemple de fiche martelage sont respectivement présentés en Annexe C et en Annexe D. L'intégralité des fiches PPSS (PPSS 01 à PPSS 24) sont disponibles en ligne sur le wiki [siwawa.org](http://siwawa.org).

### 5.1. Tests sur la distribution des peuplements entiers

Deux types de test sont menés pour évaluer les estimations de la distribution des diamètres réalisées par SiWaWa : i) des tests graphiques intuitifs, et ii) des tests statistiques formels.

#### 5.1.1. Tests graphiques : comparaison des courbes des distributions estimées et de la distribution réelle

Le premier test de validation de la distribution déterminée par SiWaWa est visuel, il consiste pour une PPSS donnée à comparer les courbes de distribution des diamètres (les densités de probabilité) obtenues par l'intermédiaire de plusieurs méthodes avec la distribution réelle.

Trois méthodes sont utilisées pour estimer la distribution des diamètres :

- Un ajustement de la fonction de Weibull sur la distribution réelle par une estimation du **maximum de vraisemblance** (impossible dans SiWaWa car la distribution réelle est inconnue, cf. section 2.3.2.1). Cette distribution constitue une référence car elle montre à quel point il est possible d'ajuster la fonction de Weibull à la distribution réelle lorsque toute l'information possible est disponible.

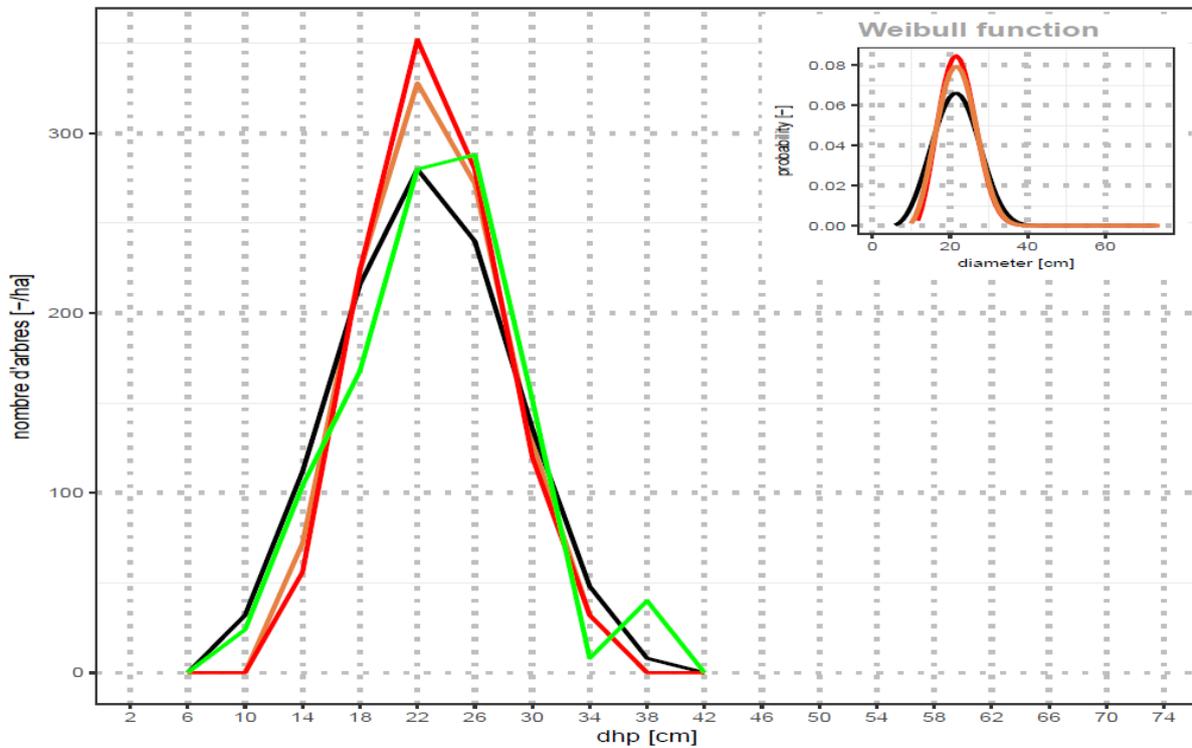
- Un ajustement de la fonction de Weibull basé sur la **méthode de SiWaWa 2.0** lorsque les **valeurs réelles de  $d_{min}$  et  $d_{max}$  sont inconnues** et qu'elles sont elles-mêmes déterminées par les équations de SiWaWa.
- Un ajustement de la fonction de Weibull basé sur la **méthode SiWaWa 2.0** qui donnent les paramètres de la Weibull en fonction de  $d_g$ ,  $d_{min}$  et  $d_{max}$  lorsque les **valeurs réelles de  $d_{min}$  et  $d_{max}$  sont connues** (c'est-à-dire entrées par l'utilisateur).

Les deux derniers cas de figure correspondent tous les deux à des usages possibles de SiWaWa.

Les résultats obtenus de cette manière sur 24 PPSS montrent que dans l'ensemble, l'estimation de la distribution des diamètres par SiWaWa est proche de la réalité. Surtout, les distributions estimées par SiWaWa sont bien centrées sur les distributions réelles et présentent une dispersion similaire, ce qui montre que la procédure d'estimation définie dans SiWaWa tire correctement parti des informations disponibles, à savoir la position du centre de la distribution ( $d_g$ ) et éventuellement de ses extrema ( $d_{min}$  et  $d_{max}$ ).

A noter que les distributions réelles sont tronquées en dessous d'un diamètre de 8 cm qui correspond au seuil d'inventaire des PPSS. Cette troncature peut avoir une influence, certes modeste, sur les estimations réalisées.

La Fig. 50 ci-dessous représente la distribution réelle et les distributions estimées grâce aux trois méthodes décrites ci-dessus, pour la PPSS 01. L'encart en haut à droite montre les résultats analytiques tandis que le graphe principal indique les distributions discrètes, par classe de diamètre, qui en est tirée. La représentation discrète est pertinente car elle correspond à la visualisation offerte par l'interface de l'application pour smartphone SiWaWa 2.0.

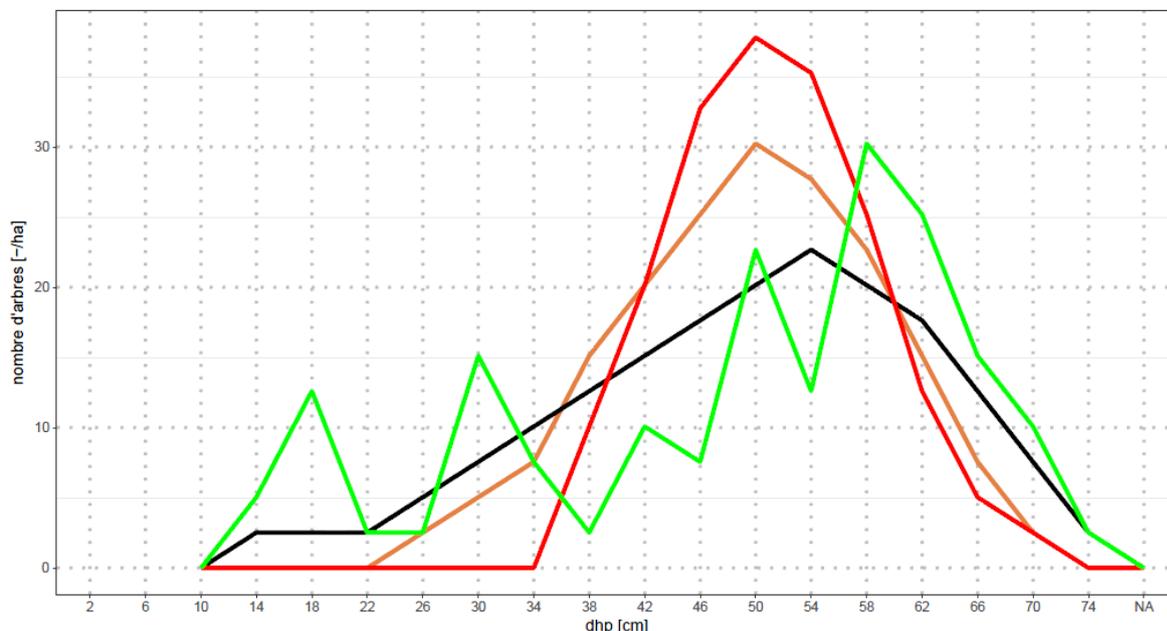


**Fig. 50** : Distributions des diamètres pour la PPSS 01 (Epicéa), réelle (vert) et estimées (noir : maximum de vraisemblance, orange : SiWaWa avec valeurs réelles de  $d_{min}$  et  $d_{max}$ , rouge : SiWaWa sans  $d_{min}$  et  $d_{max}$ )

SiWaWa montre cependant ses limites lorsque la distribution est particulièrement étalée et/ou asymétrique. Dans ce cas, l'estimation de SiWaWa basée sur les valeurs réelles de  $d_{min}$  et  $d_{max}$  donne sans surprise de meilleurs résultats que lorsqu'ils sont inconnus. Mais dans tous les cas, les deux estimations réalisées par SiWaWa offrent des résultats moins précis que l'estimation du maximum de vraisemblance (basée, elle, sur l'ensemble des données).

Par ailleurs, la fonction de Weibull est incapable de s'ajuster précisément lorsque la distribution présente une forme particulière, par exemple lorsqu'elle est en « dents de scie » au lieu d'être « en cloche », quelle que soit la méthode d'estimation utilisée, y compris le maximum de vraisemblance. Le choix de la fonction de Weibull est néanmoins un choix sans regret car il s'agit d'une forme fonctionnelle relativement flexible au vu du faible nombre de ses paramètres.

La Fig. 51 ci-dessous, illustrant les distributions réelle et estimées pour la PPSS 20, présente un cas d'école de peuplement difficile à modéliser avec SiWaWa :



**Fig. 51 : Distributions des diamètres pour la PPSS 20 (Hêtre), réelle (vert) et estimées (noir : maximum de vraisemblance ; orange : SiWaWa avec valeurs réelles de  $d_{min}$  et  $d_{max}$  ; rouge : SiWaWa sans  $d_{min}$  et  $d_{max}$ )**

La Fig. 51 représente un vieux peuplement de hêtre (plus de 100 ans). Au vu des pics observés dans la partie inférieure de la distribution, il est possible que dans le cas de la PPSS 20, des tiges des strates intermédiaires aient été inventoriées par erreur. Cette situation est problématique pour SiWaWa et pour une modélisation par une courbe de Weibull qui n'est pas conçue pour prendre en compte différentes strates. Si ce peuplement est singulier, les peuplements dont la distribution des diamètres comprend « deux pics » au lieu d'un sont au contraire assez courants. Ce type de distribution dont un exemple est donné en Fig. 52 (PPSS 08) révèle une éclaircie (relativement) récente dans le peuplement.

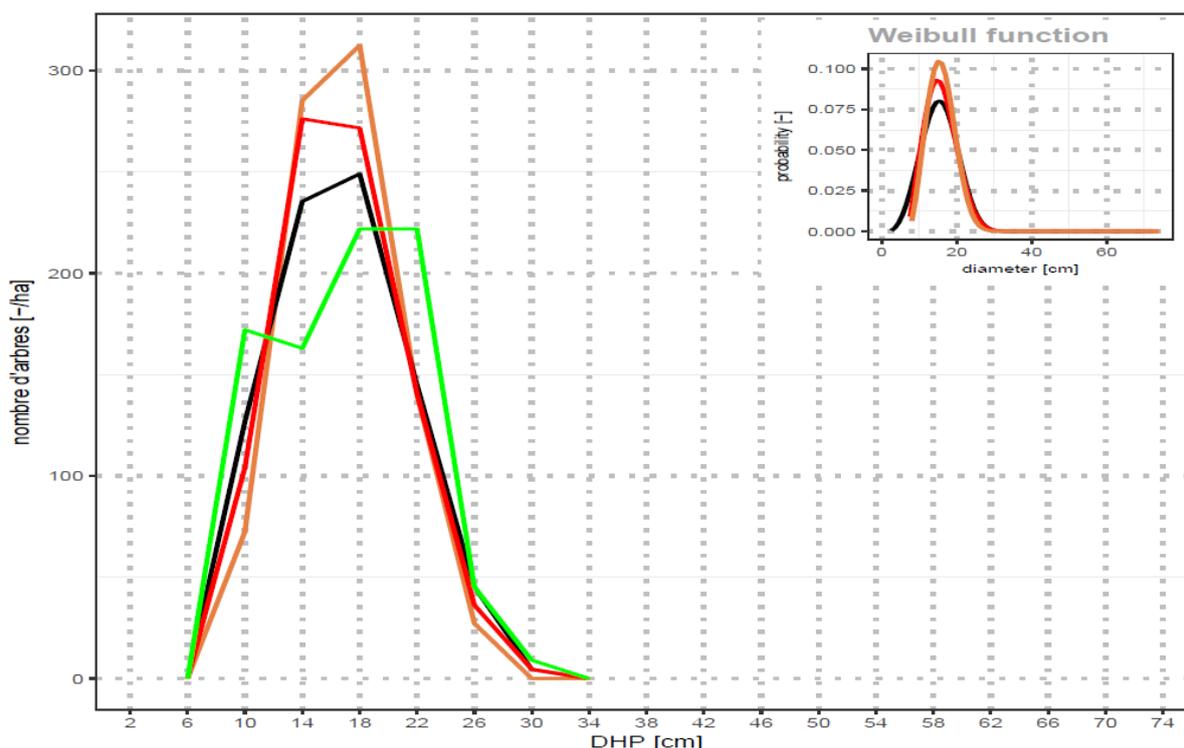


Fig. 52 : Distributions des diamètres pour la PPSS 08 (Chêne), réelle (vert) et estimées (noir : maximum de vraisemblance ; orange : SiWaWa avec valeurs réelles de  $d_{min}$  et  $d_{max}$  ; rouge : SiWaWa sans  $d_{min}$  et  $d_{max}$ )

La Fig. 52 confirme le fait que la fonction de Weibull n'est pas adaptée pour représenter ce type de structure car même lorsque toute l'information sur la distribution réelle est disponible, la distribution estimée par le maximum de vraisemblance ne représente pas les deux pics.

Malgré leurs limites, l'usage de la fonction de Weibull et les méthodes d'estimation de SiWaWa donnent de manière générale et selon ces tests des résultats très satisfaisants.

Ces premiers tests graphiques, très intuitifs, sont complétés par des tests statistiques plus formels.

### 5.1.2. Tests statistiques : *Supremum* et Anderson-Darling

Plusieurs tests non-paramétriques sont menés à bien pour évaluer la qualité des estimations réalisées par SiWaWa.

Tout d'abord, plusieurs tests basés sur des statistiques de type *supremum*, dont la statistique de Kolmogorov-Smirnov (voir Daniel, 1990), sont entrepris. Ces statistiques mesurent l'écart maximal entre la fonction de répartition d'une distribution de référence (en l'occurrence une distribution estimée par l'ajustement de la fonction de Weibull, par le maximum de vraisemblance ou par la méthode SiWaWa) et une distribution empirique, en l'occurrence la distribution réelle des diamètres.

La fonction de répartition de la distribution réelle  $F_{réelle}(d)$  peut-être exprimée comme suit (lorsque  $N$  est le nombre d'arbres dans la PPSS,  $K_d$  un opérateur binaire basé sur la distribution des  $d_i$ , et les  $d_{i \in \{1, \dots, N\}}$  la liste complète des diamètres mesurés dans la PPSS) :

$$F_{réelle}(d) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N K_d(d_i), \quad \text{avec } K_d(d_i) = 1 \text{ si } d_i \leq d, 0 \text{ sinon} \quad (67)$$

La fonction de répartition de la distribution estimée  $F_{wei}(d)$  est la fonction de répartition de Weibull (équation 2) munie des paramètres estimés.

A partir de ces définitions, trois statistiques de type *supremum* sont définies, respectivement basées sur :

- l'écart positif maximal :

$$D^+ = \max_{d_i} \{F_{réelle}(d_i) - F_{wei}(d_i)\} \quad (68)$$

- l'écart négatif maximal :

$$D^- = \min_{d_i} \{F_{réelle}(d_i) - F_{wei}(d_i)\} \quad (69)$$

- la statistique de Kolmogorov-Smirnov :

$$D = \max_{d_i} \{|F_{réelle}(d_i) - F_{wei}(d_i)|\} \quad (70)$$

Sans entrer davantage dans les détails, ces statistiques permettent de tester l'hypothèse nulle suivante : *la distribution réelle est un échantillon aléatoire tirée à partir de la distribution de Weibull*. Le test échoue lorsque la probabilité que l'hypothèse nulle soit vraie (*p-value*) est inférieure à un seuil donné. Deux seuils ont été fixés pour ce test et le test d'Anderson-Darling ci-dessous, 25% et 5%. Le test échoue si la *p-value* est inférieure à 25%. Si elle est, de surcroît inférieure à 5%, cela est indiqué.

Cependant, les tests basés sur des statistiques de type *supremum* ne sont basés que sur l'écart le plus important entre deux distributions données, ils ne prennent pas en compte l'écart cumulé. D'autres types de tests sont en revanche basés sur des statistiques qui mesurent cet écart cumulé. C'est le cas du test d'Anderson-Darling (1952) qui est le test standard pour le type de problème qui nous intéresse. Sur la base des notations précédemment définies, la statistique d'Anderson-Darling (*A*) est définie comme suit :

$$A^2 = -N - S \quad (71)$$

$$\text{avec } S = \sum_{i=1}^N \frac{2i-1}{N} \cdot [\ln(F_{wei}(d_i)) + \ln(1 - F_{wei}(d_{N+1-i}))] \quad (72)$$

Sans entrer davantage dans les détails, cette statistique permet comme les tests précédents de déterminer si l'hypothèse nulle qui suppose que *la distribution réelle est un échantillon aléatoire tirée à partir de la distribution de Weibull* est vraie. Contrairement aux tests du *supremum* qui sont surtout sensibles aux écarts observés au centre des distributions, le test d'Anderson-Darling prend également en compte les écarts observés dans les queues de distribution (cf. Rinne, 2009).

En résumé, quatre tests statistiques sont menés à bien sur les données :

- Test *supremum* sur le plus grand écart positif ( $D^+$ ),
- Test *supremum* sur le plus grand écart négatif ( $D^-$ ),
- Test *supremum* sur le plus grand écart absolu, Kolmogorov-Smirnov ( $D$ ),
- Test d'Anderson-Darling ( $AD$ ),

Pour chaque PPSS, ces quatre tests sont réalisés systématiquement pour les trois distributions respectivement estimées par : i) le maximum de vraisemblance (**modele mle**), ii)

la méthode SiWaWa lorsque  $d_{min}$  et  $d_{max}$  sont inconnus (**siw 2.0**), et iii) la méthode SiWaWa lorsque  $d_{min}$  et  $d_{max}$  sont connus (**siw 2.0 dmin/dmax**).

La figure suivante donne à titre d'exemple les résultats obtenus pour la PPSS 01 :

Modèle	Test	Résultats
mle modèle	$D^+$	success
mle modèle	$D^-$	success
mle modèle	$D$	success
mle modèle	$AD$	success
siw 2.0	$D^+$	failed (p=0.25)
siw 2.0	$D^-$	success
siw 2.0	$D$	failed (p=0.25)
siw 2.0	$AD$	failed (p=0.05)
siw 2.0 dmin/dmax	$D^+$	success
siw 2.0 dmin/dmax	$D^-$	success
siw 2.0 dmin/dmax	$D$	success
siw 2.0 dmin/dmax	$AD$	failed (p=0.05)

**Fig. 53 : Résultats des tests statistiques sur la conformité des distributions estimées des diamètres pour la PPSS 01 (Epicéa)**

Les résultats obtenus pour les 24 PPSS sont résumés dans la table de contingence ci-dessous qui reporte le nombre de tests positifs (sur les 24 menés) pour chaque paire type d'estimation/type de test :

**Tab. 5 : Table de contingence dénombrant le nombre de tests positifs (sur 24 PPSS) pour chaque paire type d'estimation/type de test**

Test	modele mle	siw 2.0	siw 2.0 $d_{min}/d_{max}$
$D^+$	22	3	7
$D^-$	23	23	23
$D$	23	7	11
$AD$	20	1	0

Le Tab. 5 révèle plusieurs éléments intéressants :

- Les estimations SiWaWa échouent la plupart du temps au test du *supremum* basé sur l'écart positif maximal ( $D^+$ ). Le sommet des distributions SiWaWa (donc aux environs du  $d_g$ ) tend en effet à être surestimé. Les échecs au test de Kolmogorov-Smirnov ( $D$ ) en sont également une conséquence directe.
- Les estimations SiWaWa échouent pratiquement tout le temps au test d'Anderson-Darling ( $AD$ ) qui est connu pour être plus exigeant. Ces échecs systématiques au test  $AD$  alors que les tests graphiques ont montré des distributions estimées plutôt proches de la réalité tendent à montrer que ce test n'est pas forcément adapté à l'usage que l'on veut en faire ici.

Par ailleurs, les résultats obtenus sont similaires, quelle que soit l'essence du peuplement considéré, voir Tab. 6, et quelle que soit sa hauteur dominante (qui donne une indication sur le stade de développement), voir Tab. 7. L'épicéa montre tout de même de meilleurs résultats au test de Kolmogorov-Smirnov, ce qui semble indiquer que dans son cas, l'écart maximal souvent observé au centre de la distribution est plus faible.

**Tab. 6 : Table de contingence dénombrant le nombre de tests positifs par essence, pour l'épicéa, le hêtre et le chêne (le nombre de PPSS pour les autres essences étant trop faible pour être pertinent)**

<b>Epicéa (10 placettes)</b>			
Test	<i>modele mle</i>	<i>siw 2.0</i>	<i>siw 2.0 d<sub>min</sub>/d<sub>max</sub></i>
$D^+$	10	1	5
$D^-$	10	10	10
$D$	10	3	9
$AD$	10	0	0
<b>Hêtre (6 placettes)</b>			
Test	<i>modele mle</i>	<i>siw 2.0</i>	<i>siw 2.0 d<sub>min</sub>/d<sub>max</sub></i>
$D^+$	6	0	0
$D^-$	6	6	6
$D$	6	0	0
$AD$	5	0	0
<b>Chêne (4 placettes)</b>			
Test	<i>modele mle</i>	<i>siw 2.0</i>	<i>siw 2.0 d<sub>min</sub>/d<sub>max</sub></i>
$D^+$	3	1	0
$D^-$	4	4	4
$D$	4	2	1
$AD$	3	1	0

**Tab. 7 : Table de contingence dénombrant le nombre de tests positifs par catégorie de  $h_{dom}$ , pour  $20m < h_{dom} \leq 30m$  et  $30m < h_{dom}$  (le nombre de PPSS pour les autres catégories étant trop faible pour être pertinent)**

<b><math>20m &lt; h_{dom} \leq 30m</math></b>			
Test	<i>modele mle</i>	<i>siw 2.0</i>	<i>siw 2.0 d<sub>min</sub>/d<sub>max</sub></i>
$D^+$	13	1	4
$D^-$	13	13	13
$D$	13	3	6
$AD$	13	0	0
<b><math>30m &lt; h_{dom}</math></b>			
Test	<i>modele mle</i>	<i>siw 2.0</i>	<i>siw 2.0 d<sub>min</sub>/d<sub>max</sub></i>
$D^+$	9	1	3
$D^-$	9	9	9
$D$	9	3	5
$AD$	7	0	0

## 5.2. Tests sur la distribution des arbres concurrents et des arbres de place

Les tests graphiques et statistiques présentées dans la section précédente ont également été utilisés pour évaluer les estimations réalisées par SiWaWa de la distribution des diamètres des arbres concurrents (c'est-à-dire les arbres prélevés lors d'une éclaircie) et des arbres de place (voir section 2.3.4.2).

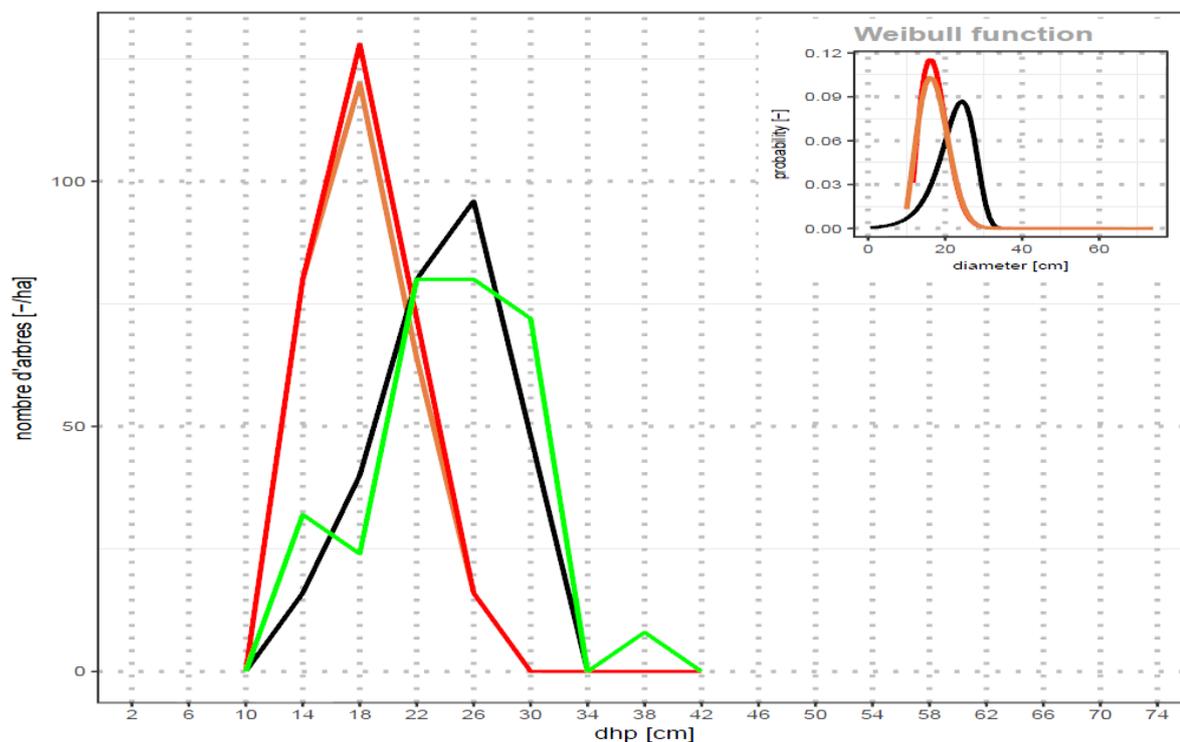
### 5.2.1. Tests graphiques : comparaison des courbes des distributions estimées et de la distribution réelle

Les tests les plus pertinents sont ceux qui portent sur la distribution des arbres prélevés lors d'une éclaircie car il s'agit d'une fonctionnalité déjà implémentée dans SiWaWa dont la détermination affecte par ailleurs la dynamique du peuplement.

Trois méthodes sont utilisées pour estimer la distribution des diamètres, qui diffèrent légèrement de celles utilisées pour le peuplement complet :

- Un ajustement de la fonction de Weibull sur la distribution réelle des arbres prélevés (c'est-à-dire issue du martelage de la PPSS) par une estimation du **maximum de vraisemblance**. Cette distribution constitue une référence car elle montre à quel point il est possible d'ajuster la fonction de Weibull à la distribution réelle lorsque toute l'information possible sur le martelage est disponible.
- Un ajustement de la fonction de Weibull basé sur la **méthode de SiWaWa 2.0** lorsque les **valeurs réelles de  $d_{min}$  et  $d_{max}$**  pour l'ensemble du peuplement **sont inconnues**. Dans ce cas de figure,  $d_{min}$  et  $d_{max}$  sont d'abord calculés à partir des équations du modèle puis sur cette base,  $d_{min,conc}$  et  $d_{max,conc}$  sont déterminés grâce aux équations 62 et 63.  $d_{g,conc}$  est calculé sur la base du  $d_g$  du peuplement entier grâce aux équations 60 et 61.
- Un ajustement de la fonction de Weibull basé sur la **méthode de SiWaWa 2.0** lorsque les **valeurs réelles de  $d_{min}$  et  $d_{max}$**  pour l'ensemble du peuplement **sont connues** par l'utilisateur.  $d_{g,conc}$  est calculé sur la base du  $d_g$  du peuplement entier grâce aux équations 60 et 61.  $d_{min,conc}$  et  $d_{max,conc}$  sont déterminés grâce aux équations 62 et 63.

La Fig. 54 ci-dessous illustre la distribution réelle et les trois distributions estimées des diamètres des arbres concurrents pour la PPSS 01 (Epicéa) :



**Fig. 54 : Distributions des diamètres des arbres concurrents pour la PPSS 01 (Epicéa), réelle (vert) et estimées (noir : maximum de vraisemblance ; orange :  $d_{min}$  et  $d_{max}$  (pour l'ensemble du peuplement) sont connus ; rouge :  $d_{min}$  et  $d_{max}$  calculés par SiWaWa)**

Les résultats de la PPSS 01 sont représentatifs des résultats de l'ensemble des PPSS sur lesquelles un martelage a été effectué. En l'occurrence, on observe que SiWaWa sous-estime systématiquement la distribution des diamètres des arbres concurrents quelle que soit la méthode d'estimation. La méthode d'estimation par la fonction de Weibull n'est pas en cause car les estimations réalisées de cette manière mais basées sur les vraies valeurs  $d_{g,conc}$ ,  $d_{min,conc}$  et  $d_{max,conc}$  donnent des résultats fiables et une distribution bien centrée. Cela montre en revanche que SiWaWa sous-estime systématiquement  $d_{g,conc}$ ,  $d_{min,conc}$  et  $d_{max,conc}$ , avant-même d'estimer la distribution.

Cela s'explique très bien, notamment pour le  $d_{g,conc}$ , qui est calculé à partir de coefficients de Hiley qui sont faibles (entre 0.7 et 0.9, voir Fig. 20) au regard de la sylviculture qui se pratique aujourd'hui. Il ne s'agit cependant pas ici d'une erreur de conception. Les coefficients de Hiley utilisés dans SiWaWa ont en majorité été estimés sur la base de peuplements conduits selon le mode d'éclaircie sélective défini par Schädelin (1934), pour lequel de nombreuses données sont disponibles. Or, la sylviculture a depuis évolué et se concentre à l'heure actuelle sur les arbres de place et non plus sur les candidats (Abetz, 1975 ; Ammann, 2004). Les éclaircies typiques de cette approche se caractérisent par des coefficients de Hiley souvent supérieurs à 1. Par ailleurs, des écarts existants entre ces modèles théoriques et la sylviculture telle qu'elle est pratiquée peuvent également expliquer ces valeurs faibles pour les coefficients de Hiley. Par exemple, le passage des engins forestiers lors des éclaircies a pour effet d'éliminer certaines tiges de faible diamètre qui gênent leur passage (voir section 2.3.4.2).

L'évaluation graphique de la distribution des arbres de place proposée dans le prototype excel de SiWaWa est conduite grâce aux mêmes méthodes. Les résultats révèlent que la distribution

des diamètres pour les arbres de place est pour la plupart des PPSS légèrement surestimé par SiWaWa. Ce phénomène s'explique encore une fois par la différence entre éclaircie sélective et éclaircie par arbres de place. Etant donné que la distribution des arbres de place n'est pas implémentée à l'heure actuelle dans SiWaWa 2.0, les résultats ne sont pas davantage détaillés dans cette section. L'ensemble des résultats sont cependant présentés dans des fiches martelage disponibles en ligne sur le wiki [siwawa.org](http://siwawa.org) et dont un exemple est présenté en Annexe D.

### 5.2.2. Tests statistiques : *Supremum* et Anderson-Darling

Les tests statistiques présentés en section 5.1 sont utilisés pour tester formellement la conformité des distributions des arbres concurrents et des arbres de place, estimées selon les approches décrites dans le paragraphe précédent.

La Fig. 55 ci-dessous montre à titre d'exemple les résultats obtenus pour les tests statistiques portant sur la distribution des diamètres des tiges concurrentes pour la PPSS 01, estimée respectivement par : i) le maximum de vraisemblance (*modele mle*), ii) la méthode SiWaWa lorsque  $d_{min}$  et  $d_{max}$  sont inconnus (*siw 2.0*), et iii) la méthode SiWaWa lorsque  $d_{min}$  et  $d_{max}$  sont connus (*siw 2.0 dmin/dmax*) :

Modèle	Test	Résultats
mle modèle	$D^+$	success
mle modèle	$D^-$	success
mle modèle	$D$	success
mle modèle	$AD$	success
siw 2.0	$D^+$	success
siw 2.0	$D^-$	success
siw 2.0	$D$	success
siw 2.0	$AD$	failed (p=0.05)
siw 2.0 dmin/dmax	$D^+$	success
siw 2.0 dmin/dmax	$D^-$	success
siw 2.0 dmin/dmax	$D$	success
siw 2.0 dmin/dmax	$AD$	failed (p=0.05)

**Fig. 55 : Résultats des tests statistiques sur la conformité des distributions estimées des diamètres des arbres concurrents, pour la PPSS 01 (Epicéa)**

Les résultats obtenus pour les arbres concurrents et pour les 11 martelages (sur 8 PPSS) sont résumés dans la table de contingence ci-dessous qui dénombrent le nombre de tests positifs (sur les 11) pour chaque paire type d'estimation/type de test :

**Tab. 8 : Table de contingence dénombrant le nombre de tests positifs (sur 11 martelages) pour chaque paire type d'estimation/type de test, pour la distribution des diamètres des arbres concurrents**

Test	<i>modele mle</i>	<i>siw 2.0</i>	<i>siw 2.0 d<sub>min</sub>/d<sub>max</sub></i>
$D^+$	11	9	9
$D^-$	11	11	11
$D$	11	9	9
$AD$	9	0	0

Le Tab. 8 révèle plusieurs résultats intéressants :

- Les estimations réalisées grâce au maximum de vraisemblance sont très bonnes dans l'ensemble. Cependant, ce résultat peut être dû en partie au fait que les échantillons sont ici relativement petits (il y a beaucoup moins d'arbres concurrents que d'arbres au total dans un peuplement) et que les tests donnent donc mécaniquement de meilleurs résultats. La même explication s'applique probablement aux résultats des tests  $D^+$  réalisés sur les estimations de SiWaWa, qui sont ici beaucoup plus positifs que pour les peuplements complets.
- Les estimations réalisées par SiWaWa échouent toutes au test d'Anderson-Darling ( $AD$ ). Le fait que les distributions estimées par SiWaWa ne soient pas bien centrées sur les distributions réelles explique sans doute ces échecs. Cela montre encore une fois que ce test n'est pas nécessairement adapté à notre objet d'étude.

Les résultats des tests menés sur la distribution des arbres de place ne sont pas abordés dans cette section. Toutefois, ceux-ci peuvent être consultés dans les fiches martelage disponibles en ligne sur le wiki [siwawa.org](http://siwawa.org).

## 6. Bilan et perspectives

### **Utilisation facilitée du modèle de croissance SiWaWa grâce à l'application SiWaWa 2.0 pour smartphone**

SiWaWa est un modèle de simulation de la croissance forestière particulièrement utile pour le praticien. Il permet en forêt et en quelques clics de quantifier l'état actuel d'un peuplement, de manière spécifique et détaillée, et de simuler son développement futur sans ou avec interventions. En particulier, SiWaWa livre des informations essentielles pour bien se figurer le niveau de densité du peuplement considéré et son évolution dans le temps, et permet de les mettre en perspective par rapport à des repères de densité maximale et de densité recommandée. Il offre ainsi une base décisionnelle pertinente pour définir les moments opportuns pour intervenir dans l'évolution du peuplement et déterminer l'intensité des interventions successives. Les indications que livre SiWaWa sur la croissance en hauteur et en diamètre sont en outre utiles pour se représenter l'évolution des arbres du peuplement.

SiWaWa 2.0, la nouvelle application pour Smartphone (Android), permet de disposer facilement de toutes ces informations directement en forêt, là où la décision sylvicole se prend. SiWaWa 2.0 met à profit la diffusion et l'usage généralisé des smartphones pour rendre les résultats de la recherche directement accessibles et applicables par les praticiens dans des situations concrètes. L'interface tactile de l'application permet à l'utilisateur d'interagir de manière simple et intuitive avec le modèle de croissance. La simulation de la croissance des peuplements se fait en une fraction de seconde grâce à la puissance de calcul des smartphones et livre sans attendre les résultats sous forme de graphiques synthétiques. L'utilisateur peut élaborer différentes variantes d'interventions et les comparer. Les résultats peuvent être sauvegardés et exportés pour un traitement ultérieur. Grâce à MOTI, une autre application pour Smartphone (voir Rosset et al. 2017), les quelques caractéristiques des peuplements, nécessaires à la simulation, peuvent être mesurées sur le terrain en quelques clics. SiWaWa 2.0 et MOTI forment un couple unique qui allie de façon innovante inventaire forestier et croissance forestière sur smartphone. SiWaWa 2.0 représente un résultat essentiel de ce projet pour la diffusion du modèle de croissance dans la pratique.

### **Prise en main de SiWaWa dans un grand nombre de situations sylvicoles concrètes grâce au réseau de placettes permanentes de suivi sylvicole (PPSS) et à l'application web [martelage.sylvotheque.ch](http://martelage.sylvotheque.ch)**

Le réseau de PPSS mis en place dans le cadre de ce projet ainsi que la nouvelle version de l'application web [martelage.sylvotheque.ch](http://martelage.sylvotheque.ch) complètent le dispositif pour favoriser la diffusion de SiWaWa dans la pratique. Les PPSS et leurs données disponibles sur [martelage.sylvotheque.ch](http://martelage.sylvotheque.ch) offrent à l'utilisateur de SiWaWa 2.0 la possibilité de se familiariser avec l'usage du modèle de croissance dans un grand nombre de situations différentes, y compris pour la prise de décisions sylvicoles concrètes.

Une attention particulière a été portée au développement de l'interface utilisateur de [martelage.sylvotheque.ch](http://martelage.sylvotheque.ch). Les données des PPSS sont mises en valeur sous forme de tableaux synoptiques et de graphiques interactifs, ainsi que sous la forme de cartes représentant la position des arbres avec laquelle l'utilisateur peut interagir pour effectuer et documenter un martelage. Une documentation visuelle sous forme de photosphères est disponible pour certaines PPSS. Elle offre une immersion visuelle proche de la réalité et permet de donner du relief aux données. Etant disponible sur Internet, l'application peut être utilisée aussi bien au bureau que sur le terrain, directement dans les PPSS, par exemple à l'aide d'une tablette.

L'utilisateur peut reprendre les données des PPSS pour effectuer des simulations avec SiWaWa et comparer les résultats obtenus, en particulier la distribution des tiges. Avec SiWaWa, il peut aussi déterminer le moment opportun pour la prochaine éclaircie, son intensité et le nombre d'années jusqu'à l'intervention suivante. Il peut aussi s'informer sur la croissance en hauteur des arbres dominants afin de mieux se représenter leur évolution jusqu'à la prochaine intervention, en particulier celle de leur couronne. L'utilisateur peut préparer de cette manière son martelage, puis le concrétiser et pour finir l'analyser sur [martelage.sylvotheque.ch](http://martelage.sylvotheque.ch), voire effectuer différentes variantes de martelage.

Le réseau de PPSS représente ainsi un terrain d'expérimentation pour SiWaWa 2.0. Il permet de tester le modèle dans un grand nombre de situations contrastées, y compris comme aide à la décision sylvicole, ce qui permet d'identifier ses points forts mais aussi ses limites.

Ce réseau compte déjà 36 placettes dont 24 ont été mises en place dans le cadre de ce projet. Les PPSS existantes sont installées dans des peuplements d'une grande diversité en termes d'essences, avec 6 essences ou mélanges d'essences représentés, et en termes de stades de développement.

La méthode de relevé des PPSS a été conçue de sorte à ce qu'elle puisse être mise en œuvre facilement dans la pratique, en particulier au niveau des entreprises forestières. La facilité de prise en main de cette méthode a d'ailleurs été démontrée lors d'une session de formation des étudiants de la HAFL organisée dans le cadre du module d'enseignement de spécialisation en sylviculture. A cette occasion, les étudiants ont mis en place 8 nouvelles PPSS. Par ailleurs, une fois mise en place, une PPSS peut être intégrée facilement sur [martelage.sylvotheque.ch](http://martelage.sylvotheque.ch) en moins d'une demi-heure.

L'accessibilité et la simplicité de la méthode PPSS permettent d'envisager un développement à plus grande échelle de ce réseau dans les années à venir. L'ensemble des PPSS mises en place jusqu'à présent ont été installées dans les forêts gérées par l'entreprise forestière de la Bourgeoisie de Berne et une extension à deux autres entreprises forestières est déjà en discussion. Cette extension va permettre d'étendre la base de comparaison des situations sylvicoles à disposition et devrait ainsi contribuer à favoriser les échanges entre acteurs du secteur. Selon l'ampleur de cette extension, il sera nécessaire d'adapter [martelage.sylvotheque.ch](http://martelage.sylvotheque.ch) pour une gestion d'un nombre important de PPSS et d'utilisateurs, mais aussi compléter les fonctionnalités pour faciliter les échanges d'expériences entre utilisateurs.

### **Comprendre le fonctionnement de SiWaWa à l'aide de la documentation technique de ce rapport**

Ce projet a permis la rédaction d'une documentation technique détaillée du modèle de croissance SiWaWa (cf. chapitre 2 de ce rapport). Cette documentation s'adresse à plusieurs publics, d'une part à l'utilisateur de l'application SiWaWa 2.0 souhaitant comprendre de manière approfondie le fonctionnement du modèle, mais aussi aux spécialistes de la croissance forestière souhaitant se familiariser avec l'approche SiWaWa, et enfin aux chercheurs qui vont poursuivre les développements du modèle. La description du modèle est abordée pas à pas et illustrée d'exemples tirés des PPSS afin de faciliter la compréhension de SiWaWa.

L'élaboration de cette documentation a fait l'objet de nombreux échanges avec J.-Ph. Schütz, l'auteur des modèles SiWaWa. Ces échanges ont permis de découvrir toute la richesse des concepts qu'il a mis en place, intégrant inventaire forestier, croissance forestière et sylviculture au sein d'un système de modélisation cohérent et fonctionnel. De manière générale, le projet

SiWaWa 2.0 a beaucoup bénéficié de sa très longue expérience dans le domaine. Il en ait très chaleureusement remercié.

### **Mise en pratique, vulgarisation, publication**

SiWaWa 2.0, le réseau de PPSS et [martelage.sylvoteque.ch](http://martelage.sylvoteque.ch) font déjà partie intégrante de l'enseignement en croissance forestière et en sylviculture de la HAFL. Ils représentent un outil didactique très utile qui permet d'illustrer la théorie mais qui permet aussi aux étudiants de s'exercer à la pratique sylvicole et de développer un savoir-faire en la matière. L'application SiWaWa 2.0 a aussi déjà été présentée dans le cadre d'excursions à l'EPFZ. Ces outils didactiques suscitent également un intérêt de la part des praticiens. Des cours de formation continue ont déjà eu lieu dans les PPSS à la demande de trois entreprises forestières différentes, dont l'entreprise forestière de la Bourgeoisie de Berne. Ces outils ont également été présentés dans le cadre du cours FoWaLa numéro 270 (« Werkzeugkiste für die betriebliche Planung ») qui a eu lieu à Bern le 26 avril 2017. Pour finir, deux articles ont été publiés pendant la durée du projet (cf. Schütz et Rosset, 2016 et Schütz et al., 2016).

Les différents résultats de ce projet, à savoir l'application SiWaWa, la méthode et le réseau des PPSS, ainsi que ce rapport technique sont des éléments nécessaires à la pérennité et à la diffusion du modèle de croissance SiWaWa. Néanmoins, ils ne sont probablement pas suffisants pour assurer une diffusion efficace auprès des praticiens. La rédaction d'un manuel d'utilisation de SiWaWa devrait faciliter la prise en main de cet instrument, mais aussi la compréhension des concept-clés et des mécanismes principaux en s'appuyant sur des exemples concrets pour, d'une part, illustrer la théorie et, d'autres part, proposer un certain nombre d'exercices pour maîtriser son utilisation de façon autonome. Le manuel devra également permettre à l'utilisateur d'identifier les forces et les faiblesses de SiWaWa selon différentes situations.

### **Développements futurs**

Les nombreux martelages qui ont déjà été documentés sur les PPSS ont généré une quantité importante de données qui vont permettre d'affiner la modélisation des éclaircies dans le sens d'une meilleure représentation des approches de martelage. Il s'agit non seulement d'affiner la représentation des pratiques de martelage, mais aussi de permettre à l'utilisateur de réaliser des simulations d'éclaircies basées sur ses propres préférences en poursuivant les développements de J.-Ph. Schütz dans ce domaine. Sur cette base, une aide à la décision plus performante pourrait être proposée aux utilisateurs en intégrant un calcul économique des interventions simulées.

Le domaine d'application de SiWaWa porte à l'heure actuelle exclusivement sur les futaies régulières monospécifiques. Il serait intéressant de travailler à une extension du modèle, ou tout du moins de son approche à la question des peuplements mélangés ou des futaies irrégulières. Au vu de l'engouement de ces dernières années pour la futaie irrégulière et de son développement important en Suisse, cette deuxième question paraît particulièrement opportune. Le fait que certains concepts à la base de SiWaWa aient été à l'origine pensés et développés par J.-Ph. Schütz dans le cadre de sa thèse de doctorat (Schütz, 1969), portant sur la croissance des futaies jardinées, renforce l'idée qu'une extension du modèle allant en ce sens est techniquement faisable.

## 7. Références

- Abetz, P. (1975). Eine Entscheidungshilfe für die Durchforstung von Fichtenbeständen. *Allgemeine Forstzeitschrift*, 30(33/34), 666-667.
- Anderson, T. W., & Darling, D. A. (1952). Asymptotic theory of certain "goodness of fit" criteria based on stochastic processes. *The annals of mathematical statistics*, 193-212.
- Ammann, P. L. (2004). Untersuchung der natürlichen Entwicklungsdynamik in Jungwaldbeständen-Biologische Rationalisierung der waldbaulichen Produktion bei Fichte, Esche, Bergahorn und Buche (Doctoral dissertation).
- Ammann, P. (2013). Erfolg der Jungwaldpflege im Schweizer Mittelland? Analyse und Folgerungen (Essay). *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 164(9), 262-270.
- Assmann, E. (1955). Die Bedeutung des „erweiterten EICHHORN'schen Gesetzes“ für die Konstruktion von Fichten-Ertragstafeln. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 74(11), 321-330.
- Assmann, E. (1957). Standraumregelung und Ertragsleistung. *Forstarchiv*, 28(11), 217-223.
- Assmann, E. (1974). Zum Begriff «Ertragsniveau». *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 93(1), 177-179.
- Bachmann, P., & Zürich, W. E. (1999). *Waldwachstum I/II*. Zürich, Skript der ETH.
- Badoux, E. (1983). Ertragstafeln für die Fichte in der Schweiz. *Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Birmensdorf*, 3.
- Bailey, R. L., & Dell, T. R. (1973). Quantifying diameter distributions with the Weibull function. *Forest Science*, 19(2), 97-104. Bitterlich, W. (1984). The relascope idea. Relative measurements in forestry. Commonwealth Agricultural Bureaux.
- Bailey, J. D., & Tappeiner, J. C. (1998). Effects of thinning on structural development in 40-to 100-year-old Douglas-fir stands in western Oregon. *Forest Ecology and Management*, 108(1), 99-113.
- Bräker, O.U. (1989). Ergebnisse zum Baumwachstum aufgrund von Jahrringanalysen an Bohrkernen aus der SANASILVA-Waldschadeninventur 1984. In: *Waldwachstum und Waldschäden, Sanasilva-Tagungsbericht, Tagung an der ETH-Zürich vom 14. Juni 1989*: 32 - 40.
- Bryndum, H. (1969). A thinning experiment in Norway spruce in Gludsted plantation. *Det Forstlige Forsøgsvæsen i Danmark*, 32(1), 1-156.
- Bryndum, H. (1974). A thinning experiment in Norway spruce at Ravnholt forest estate. *The Danish Forest Experiment Station*, 34, 1-159.
- Burger, H. (1953). *Holz, Blattmenge und Zuwachs*. Kommissionsverlag von Beer.
- Charru, M., Seynave, I., Morneau, F., Rivoire, M., & Bontemps, J. D. (2012). Significant differences and curvilinearity in the self-thinning relationships of 11 temperate tree species assessed from forest inventory data. *Annals of forest science*, 69(2), 195-205.
- Chroust, L. (2001). Thinning experiment in a Scots pine forest stand after 40-year investigations. *J. For. Sci*, 47(8), 356-365.
- Dagnélie, P., Palm, R., Rondeux, J., & Thill, A. (1999). *Tables de cubage des arbres et des peuplements forestiers*. Les presses agronomiques de Gembloux.
- Daniel, W. W. (1990). Kolmogorov–Smirnov one-sample test. *Applied Nonparametric Statistics*, 319-330.

- Dobbertin, M., Hug, C., & Schwyzer, A. (2001). Aufnahmeanleitung für die Sanasilva-Inventur und Kronenansprachen auf den LWF-Flächen. Stand März.
- Eichhorn, F. (1904). Beziehungen zwischen Bestandshöhe und Bestandsmasse. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 80, 45-49.
- Franz, F. (1965). Ermittlung von Schätzwerten der natürlichen Grundfläche mit Hilfe ertragskundlicher Bestimmungsgrößen des verbleibenden Bestandes. Forstw. Cbl, 84, 357-386.
- Franz, F. (1967). Ertragsniveau-Schätzverfahren für die Fichte an Hand einmalig erhobener Bestandesgrößen. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 86(2), 98-125.
- Hiley, W. E. (1956). Economics of plantations. Faber And Faber Limited 24 Russell Square; London.
- Huss, J. (1998): Der Fichtendurchforstungsversuch Göggingen. Eisschäden an Fichten in einem Durchforstungsversuch, AFZ, 8/1998, 430-432
- Hugershoff, R. (1940). Ausgleichsrechnung, Kollektivmaßlehre und Korrelationsrechnung im Dienste von Technik, Wissenschaft und Wirtschaft: eine Einführung insbesondere für Forst- und Kulturingenieure und für Studierende der Naturwissenschaften. H. Wichmann.
- Näslund, M. (1936). Skogsförsöksanstaltens gallringsförsök i tallskog (No. 29: 1).
- Pretzsch, H., Biber, P., Schütze, G., Uhl, E., & Rötzer, T. (2014). Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. Nature communications, 5.
- Reineke, L. H. (1933). Perfecting a stand-density index for even-aged forests. SCHÜTZ, J. P. (1981). L'éclaircie sélective de Schädelin, évolution actuelle. Revue Forestière Française, 1981, S, fascicule thématique" Sylvicultures en futaies feuillues".
- Rinne, H. (2009). The Weibull Distribution: A Handbook, Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC
- Rosset et al. (2013). SiWaWa: Waldwachstumssimulationsmodell der neuen Generation. Rapport final du projet SiWaWa, Office fédéral de l'environnement OFEV, 56p.
- Rosset et al. (2014). MOTI - L'inventaire forestier facilité par le smartphone. Rapport final. Projet no 2012.24. Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires HAFL, Zollikofen, Suisse. 110 p.
- Rosset et al. (2017). MOTI - L'inventaire forestier simplifié par le smartphone. Verlag Kessel, Remagen, Allemagne. 94 p.
- Rosset et Sala (2017). Voyager dans le temps en forêt. infoHAFL, février 2017.
- Schädelin W. (1934). Die Durchforstung als Auslese- und Veredlungsbetrieb höchster Wertleistung. P. Haupt, Bern-Leipzig, 96 p.
- Schütz, J. P. (1969). Etude des phénomènes de la croissance en hauteur et en diamètre du sapin (*Abies alba* Mill.) et de l'épicéa (*Picea abies* Karst.) dans deux peuplements jardinés et une forêt vierge (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
- Schütz, J. P. (1990). Sylviculture : Principes d'éducation des forêts (Vol. 5). PPUR presses polytechniques.
- Schütz, V. J. P. (1996). Rationalisierung im Forstbetrieb. Schweiz. Z. Forstwes, 147(5), 315-349.
- Schütz, J. P. (2006). Funktionelle Bestandescharakterisierung: Die Fortschreibung der Stammzahlverteilungen, ein versprechender Weg zur Modellierung der Bestandesentwicklung. Jahrestagung, 54-63.
- Schütz, J. P. (2008). Ertragsniveau und maximale Bestockungsdichte als Grundlage für die Modellierung der natürlichen Mortalität. Jahrestagung, 123-132.

- Schütz, J. P. (2015). Notre façon de conduire les éclaircies a évolué ces 50 dernières années : et pourquoi ? (Essai). *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 166(1), 2-8.
- Schütz, J. P. (2016) Bestandeseigene Schätzung des Ertragsniveaus anhand bestandesstruktureller Grössen.
- Schütz, J. P., & Zingg, A. (2007). Zuwachsprognose nach der sozialen Hierarchie im Entwicklungs- und Wuchsmodell SiWaWa. *Jahrestagung*, 180-187.
- Schütz, J. P., & Zingg, A. (2010). Improving estimations of maximal stand density by combining Reineke's size-density rule and the yield level, using the example of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European Beech (*Fagus sylvatica* L.). *Annals of forest science*, 67(5), 507.
- Schütz, J. P., Ammann, P. L., & Zingg, A. (2015). Optimising the yield of Douglas-fir with an appropriate thinning regime. *European Journal of Forest Research*, 134(3), 469-480.
- Schütz, J. P., & Rosset, C. (2016). Des modèles de production et d'aide à la décision sur smartphone. *Outils et méthodes. Revue Forestière Française LXVIII*, 5-2016.
- Schütz, J.P., Rosset, C., Lüthy, D. (2016). Von der Ertragstafel bis zum Modell SiWaWa1: Wichtige Hilfsmittel zur Schätzung ertragskundlicher Kenngrößen für die forstliche Praxis. *Infoblatt 2|2016*, Schweizerischer Forstverein.
- Schütz, J. P., & Mandallaz, D. (En cours de publication). A method for modelling diameter distributions based on basal area and total stem numbers.
- Vuokila, Y. (1965). Functions for variable density yield tables of pine based on temporary sample plots. *Publications de l'Institut finlandais de recherche forestière (Metla)*.
- Weibull, W. (1951). Wide applicability. *Journal of applied mechanics*, 103(730), 293-297.
- Zingg, A. (1996). Diameter and basal area increment in permanent growth and yield plots in Switzerland. *SPIECKER, H.; MIELIKÄINEN, K.; KÖHL, M*, 239-265

## Annexe A. Liste complète des équations de SiWaWa Core (repris dans l'application SiWaWa 2.0)

### Distribution des diamètres

**a) Lorsque DMAX et DMIN sont connus** Estimation en deux étapes :  
 1ère étape, estimations provisoires :  
 $c_{prov} = \text{Epicéa: 2.4; Hêtre: 2.2; Frêne: 2.0; Pin sylv.: 1.9; Chêne: 2.7; Douglas: 2.35}$   
 $a_{prov} = \text{DMIN}$   
 $b_{prov} = (-0.026975 + (1.03673 * DG)) - a_{prov}$

2e étape, estimations finales :  
 $a_w = \text{DMIN} - \{b_{prov} [-\ln(1 - (1/N))^{1/c_{prov}}]\}$   
 $b_w = (-0.026975 + (1.03673 * DG)) - a_w$   
 $c_w = (\ln(-\ln(1/2N)))/(\ln((\text{DMAX} - a_w)/b_w))$

**b) lorsque DMAX et DMIN sont inconnus** Equations d'estimation de DMAX et DMIN

FRÊNE	$\text{DMIN} = -0.635834344 + 0.03841123 (DG^{1.73}) + 2.1941255664 (G/DG)^{-0.66}$ $\text{DMAX} = 1.788025409 + 4.656101518 (DG^{0.71}) - 9.274254114 (G/DG)^{-0.56}$	$R^2 = 0.938; N 80$ $R^2 = 0.933; N 80$
ÉPICÉA	$\text{DMIN} = 0.292814804 + 0.216214381 (DG^{1.24}) + 1.095854229 (G/DG)^{-1.23}$ $\text{DMAX} = 0.902011561 + 3.2457725592 (DG^{0.8}) - 4.936440585 (G/DG)^{-0.75}$	$R^2 = 0.909; N 539$ $R^2 = 0.931; N 539$
HÊTRE	$\text{DMIN} = 0.244648 * (DG^{1.2384})$ $\text{DMAX} = 1.401206877 + 3.689977935 (DG^{0.77}) - 5.325663339 (G/DG)^{-0.79}$	$R^2 = 0.899; N 665$ $R^2 = 0.941; N 666$
DOUGLAS	$\text{DMIN} = -1.762907445 + 0.063543617 (DG^{1.5}) + 4.933485472 (G/DG)^{-0.61}$	$R^2 = 0.829; N 224$

$$\text{DMAX} = - 4.542996329 + 2.668159731(\text{DG}^{0.86}) + 8.118250238 \ln(\text{G/dg}) \quad R^2 = 0.9498; N 224$$

PIN SYLVESTRE

$$\text{DMIN} = - 0.402446 + 0.137131 (\text{DG}^{1.45})$$

$$\text{DMAX} = 2.35640618 + 1.264617815 * \text{DG} + 2.457832 \text{ G/DG} \quad R^2 = 0.952; N = 508$$

CHÊNE

$$\text{DMIN} = 0.334620331 + 0.249051539 (\text{DG}^{1.25}) - 1.831201969 (\text{G/DG})^{-1.1}$$

$$\text{DMAX} = 1.834329089 + 4.525881758 (\text{DG}^{0.75}) - 9.231207236 (\text{G/DG})^{-0.65} \quad R^2 = 0.932$$

$$R^2 = 0.969$$

### c) Estimation de la distribution de la surface terrière (ni\*gi)

$$a_w = \text{DMIN}$$

$$b_w = (0.000085721 * \text{DG}^2) - a_w$$

$$c_w = \ln(-\ln(1/2N)/\ln(((\text{DMAX}-\text{DMIN})/b))$$

### Croissance en diamètre

en mm

$$id = a_1 + b_1 * (\text{GCUM}^c); \text{SDI} = \text{G}/\text{Gmax}$$

FRÊNE

$$a_1 = 7.2721 - 0.0355491 * \text{âge} \quad R^2 0.38; N 24$$

$$\text{INT} = - 28.56501733 + 0.399856974 * \text{DG} + 15.05981365 * \text{LN}(\text{G}) \quad R^2 0.705; N 24$$

$$c_1 = 1.822154 + (0.018975 * \text{DG}) \quad R^2 0.06; N 24$$

ÉPICÉA

$$a_1 = 5.901664919 - 3.436264091 * \text{SDI} - 0.007948336 * \text{âge} + 0.074307697 * \text{IF} \quad R^2 0.243; N 315$$

$$\text{INT} = - 33.25347363 + 0.894443177 * \text{GMAX} + 38.72640751 * \text{SDI} \quad R^2 = 0.695; N 313$$

$$c_1 = - 0.37528243 + 2.524117449 * (\text{G}/\text{DG})^{-0.93} + 0.058587098 * \text{DG}^{0.7} \quad R^2 = 0.544; N 314$$

HÊTRE

$$a_1 = 3.108675446 + 1.948196709 * \text{SDI} - 1.772083846 * \text{G}/\text{DG} + 0.130851568 * \text{IF} + 2.030289084 * ((\text{DO}-\text{DG})/\text{DG}) \quad R^2 = 0.338; N 495$$

$$- 0.018650885 * A$$

$$INT = 20.87589781 + 0.0159178002 * G^2 - 5.840681332 * ((DO-DG)/DG)$$

$$R^2 = 0.92; N 504$$

$$c_1 = 0.028307283 + 1.622791221 * (G/DG)^{-0.66} + 0.547587084 * LN((DO-DG)/DG) + 0.034739177 * DG$$

$$R^2 = 0.318; N345$$

DOUGLAS  $a_1 = 11.73241662 - [1.823589735 * LN(DG)] - (3.902550953 * LN(SDI))$

$$R^2 = 0.6748; N 1009$$

$$INT = 7.699371987 - (5.4524126 * SDI) + (1.056939 * G) - (0.50433389 * (DO-DG))$$

$$R^2 = 0.912; N 128$$

$$c_1 = 3.27787007 - (0.82773345 * SDI) - (1.0090528 * ((DO-DG)/DG))$$

$$R^2 = 0.275; N 192$$

PIN SYLVESTRE  $a_1 = 2.1773956 - 0.0420154(A) - 6.679674 SDI + 9.808089 EN$

$$INT_1 = - 0.3542129 + 2.918383 G^{0.8} - 1.198531 (DO-DG)$$

$$c_1 = 1.103134 + 0.04437 DG$$

CHÊNE  $a_1 = 5.761862368 + 5.470895518 * SDI - 3.592863931 * \ln(G/DG) - 1.340295801 * ((D_{MAX}-DG)/DG) - 0.0452238511 * A$

$$R^2 = 0.60; N 174$$

$$INT_1 = - 22.96650622 + 0.366072286 * (D_{MAX}-DG) + 1.264565203 * G_{MAX}$$

$$R^2 = 0.468; N = 167$$

$$c_1 = 2.260426 - 0.391553 * G/DG$$

$$R^2 = 0.08$$

### Niveau de production : NP

$$SDI_{prov} = G/G_{max} - \text{moyen}; SDI = G/G_{max}$$

FRÊNE  $NP = [((33.10305808 - 31.30686331 * SDI_{prov} - 3.249979539 * ((DO-DG)/DG))] + G]/G_{max} - \text{moyen}$

$$R^2 = 0.888; N = 63$$

ÉPICÉA  $NP = [((52.13762639 - 38.60773191 * SDI_{prov} - 17.55774539 * (DO-DG)/DG))] + G]/G_{max} - \text{moyen}$

$$R^2 = 0.703; N = 69$$

HÊTRE  $NP = [((32.99440247 - 28.3010052 * SDI_{prov} - 5.718819829 * (DO-DG)/DG))] + G]/G_{max} - \text{moyen}$

$$R^2 = 0.758; N = 336$$

DOUGLAS  $NP = [(48.09481 - (72.486384 * SDI) + (7.619508 * LN(DO-DG)) + (0.236324 * DG)] + G]/G_{max} - \text{moyen}$

PIN SYLVESTRE  $NP = [(33.717979 - (19.065825 * SDI_{prov}) - (21.762352 * ((DO-DG)/DG))) + G] / G_{max-moyen}$   $R^2 = 0.800; N = 133$

CHÊNE  $NP = [(26.0592847 - 15.1067255 * SDI_{prov} - 10.2670579 * (DO-DG)/DG) + G] / G_{max-moyen}$   $R^2 = 0.411$

### Gmax-moyen: Surface terrière maximale moyenne

FRÊNE  $[139608.87 * e^{[-1.6571007 * \ln(DG) + 0.01527965 * (\ln(DG)^2)]}] * (DG/100)^2 * \pi/4$

ÉPICÉA  $[8221.33 * e^{[+0.647461 * \ln(DG) - 0.380165 * (\ln(DG)^2)]}] * (DG/100)^2 * \pi/4$

HÊTRE  $[40901.74516 * e^{[-0.503894719 * \ln(DG) - 0.218332695 * (\ln(DG)^2)]}] * (DG/100)^2 * \pi/4$   $R^2 = 0.984, N = 158$

DOUGLAS  $[13200 * e^{[-(0.01822025 * DG) - (0.2180693 * DG^2)]}] * (DG/100)^2 * \pi/4$

PIN SYLVESTRE  $[7205.6291 * e^{[(0.753449 * \ln(DG)) - (0.4374649 * (\ln(DG)^2))]}] * (DG/100)^2 * \pi/4$

CHÊNE  $[109627.69 * e^{[-(1.3238953 * \ln(DG)) - (0.0754752 * (\ln(DG)^2))]}] * (DG/100)^2 * \pi/4$

### GMAX

Pour toutes les

essences  $G_{max-moyen} * NP$

### Mortalité

$G_{mort} = G - G_{MAX}$  lorsque  $G > G_{MAX}$ , =0 sinon

$dg_{mort} = D_{MIN} + (((DG - D_{MIN}) / 2)$

->  $N_{mort}$

La distribution des diamètres chez les arbres morts est définie par une fonction de Weibull ayant les paramètres suivants :

$$a_{WMort} = DMIN$$

$$b_{WMort} = (-0.026975 + 1.03673 * DG_{Mort}) - a_{WMort}$$

$$c_{WMort} = \ln(-\ln(1/2N)) / (\ln((DG - DMIN) / b_{WMort}))$$

### Surface terrière recommandée (Grec), pour éclaircie sélective selon l'école de sylviculture de l'EPF Zürich

FRÊNE	$[20831.02 * e^{[-0.4816405 * \ln(DG) - 0.21947637 * (\ln(DG)^2)}]] * (DG/100)^2 * \pi/4$	dg(cm)    $R^2 = 0.943, N = 80$
ÉPICÉA	$[6510.0679 * e^{[0.508152 * \ln(DG) - 0.342688 * (\ln(DG)^2)}]] * (DG/100)^2 * \pi/4$	
HÊTRE	$[27277.02 * e^{[-0.460231 * \ln(DG) - 0.234509 * (\ln(DG)^2)}]] * (DG/100)^2 * \pi/4$	
DOUGLAS	$[4063.3866 * e^{[0.7954655 * \ln(DG) - 0.3758423 * (\ln(DG)^2)}]] * (DG/100)^2 * \pi/4$	
PIN SYLVESTRE	$[6232.637295 * e^{[0.479197853 * \ln(DG) - 0.383435745 * (\ln(DG)^2)}]] * (DG/100)^2 * \pi/4$	
CHÊNE	$[99927.736 * e^{[-1.4601166 * \ln(DG) - 0.0971328 * (\ln(DG)^2)}]] * (DG/100)^2 * \pi/4$	

### Hauteur dominante

A = Age

$$H_{dom} = [A / (a_{IF} + (b_{IF} * A))]^{c_{IF}}$$

FRÊNE  $a_{IF} = 6.7629 - (0.29516495 * IF) + (0.00411692 * IF^2)$

$$b_{IF} = 0.089068 - 0.001111 * IF$$

$$c_{IF} = 1.4$$

ÉPICÉA  $a_{IF} = 6.175204 - (0.048682 * IF) - (0.00126453 * IF^2)$

$$b_{IF} = 0.33392043 - (0.01151621 * IF) + (0.000187107 * IF^2)$$

$$c_{IF} = 2.3$$

IF (hdom à 50 ans)

HÊTRE  $a_{IF} = 11.37614 - (0.557778 * IF) + (0.0088626 * IF^2)$   
 $b_{IF} = 0.111925 - (0.0023558 * IF) + (0.0000340363 * IF^2)$   
 $c_{IF} = 1.6$

DOUGLAS  $a_{IF} = 12.6806956339 - (0.3520510934 * IF) + (0.0021083923 * IF^2)$   
 $b_{IF} = 0.2923735144 - (0.0005194497 * IF) + (0.0000237093 * IF^2)$   
 $c_{IF} = 3.5$

PIN SYLVESTRE  $a_{IF} = 7.601471 - (0.281972 * IF) + (0.00430518 * IF^2)$   
 $b_{IF} = 0.513098 - (0.0222823 * IF) + (0.000783954 * IF^2) - (0.0000108018 * IF^3)$   
 $c_{IF} = 3$

CHÊNE  $a_{IF} = 7.521785 - 0.381722 * IF + 0.00629015 * IF^2$   
 $b_{IF} = 0.075463 - (0.002976992 * IF) + 0.0000456914 * IF^2$   
 $c_{IF} = 1.2$

### Détermination de la fertilité

$$ab + aa \frac{1}{A} - \frac{1}{H_{dom}} \wedge \left( \frac{1}{cHäs} \right) (= Q)$$

$$(bb + ba \frac{1}{A}) IF (= R)$$

$$(cb + ca \frac{1}{A}) IF^2 (=S)$$

$$\text{Soit } IF = -R - \text{racine } R^2 - 4QS / 2S$$

FRÊNE  $IF = -((0.001111 + (0.29516495 * (1/A))) - \text{SQRT}(((0.001111 + (0.29516495 * (1/A)))^2 - ((0.089068 + (6.7629 * (1/A)) - (1/(H_{dom}^{1/1.4}))) * (0.00411692 * (1/A)^4)))) / (0.00411692 * (1/A)^2))$

ÉPICÉA  $IF = -((( - 0.01151621 - (0.048682/A)) - \text{SQRT}((( - 0.01151621 - (0.048682/A))^2 - (((0.33392043 + (6.172004/A)) - (1/H_{dom}^{1/2.3})) * (0.000187107 - (0.00126453/A)))^4))))$

	$\frac{1}{((0.000187101+(0.00126453/A))^2)}$
HÊTRE	$IF = -\frac{(((0.0023558+(0.5578/A)) - \sqrt{((0.0023558+(0.5578/A))^2}) - (((0.111925+(11.37614/A)) - (1/H_{dom}^{1/1.6})) * (0.0000340363+(0.0088626/A))^4))}}{((0.0000340363+(0.0088626/A))^2)}$
DOUGLAS	$IF = -\frac{((( -0.0005194497 - (0.35205109/A)) + \sqrt{(( -0.0005194497 - (0.35205109/A))^2}) - (((0.29237351+(12.6806956/A)) - (1/H_{dom}^{1/3.5})) * (0.0000237093+(0.0021083923/A))^4))}}{((0.0000237093+(0.00210839/A))^2)}$
PIN SYLVESTRE	$IF = -\frac{((( -0.010983 - (0.281972/A)) + \sqrt{(( -0.010983 - (0.281972/A))^2}) - (((0.4466026+(7.601471/A)) - (1/H_{dom}^{1/3})) * (0.000168253+(0.00430518/A))^4))}}{((0.000168253+(0.00430518/A))^2)}$
EICHE	$IF = -\frac{((( -0.00297699 - (0.381722/A)) + \sqrt{(( -0.00297699 - (0.381722/A))^2}) - (((0.075463+(7.521785/A)) - (1/H_{dom}^{1/1.2})) * (0.000045691+(0.00629015/A))^4))}}{((0.000045691+(0.0062915/A))^2)}$

### Hauteurs individuelles

		BHD(cm); h(m) Hdom(m);Ddom(cm);D g(cm) dg(cm)
FRÊNE	$a_{hi} = H_{dom} - [b_{hi} * \ln(D_{dom})]$ $b_{hi} = 3.080915 + (0.890122 * \ln(dg))$	
ÉPICÉA	$a_{hi} = H_{dom} - [b_{hi} * \ln(D_{dom})]$ $b_{hi} = 5.401326 + 0.244983 * DG$	
HÊTRE	$a_{hi} = H_{dom} - [b_{hi} * \ln(D_{dom})]$ $b_{hi} = 1.871830 + 1.725027 * \ln(DG)$	
DOUGLAS	$a_{hi} = H_{dom} - [b_{hi} * \ln(D_{dom})]$ $b_{hi} = -11.057 + (5.312 * \ln(A))$	
PIN SYLVESTRE	$a_{hi} = H_{dom} - [b_{hi} * \ln(D_{dom})]$	

$$b_{hi} = - 5.730909 + (0.172254 * A) - (0.00103225 * A^2) + (0.249406 * IF)$$

CHÊNE  $b_{hi} = 0.381898 + 2.0151124 * \ln(DG)$

### Estimation de l'âge

Deux formules : une simple avec seulement DG et G qui permet de calculer l'âge puis IF s'il est inconnu

Une plus complexe avec notamment IF comme variable d'entrée

SDIprov=G/Gmax-moyen; SDI=G/Gmax

FRÊNE  $A = 0.4403396 + (2.361802 * DG)$

$$A = 25.4963 + (2.1711073 * DG) - (0.9693595 * IF) + (0.1596803 * G)$$

dg(cm);G(m2):A(années)

ÉPICÉA  $A = - 2.505261 + (5.058775 * DG^{0.8})$

$$A = 55.0121 + (4.533922 * DG^{0.8}) - (2.536719 * IF) + (0.2230495 * G)$$

HÊTRE  $A = 18.921018 + (2.626754 * DG)$

$$A = 18.6926 + (45.0684 * DG/IF) + (0.794795 * G) - (0.736455 * IF)$$

DOUGLAS  $A = - 23.543506 + (1.369400 * DG) + (29.541857 * SDI)$

$$A = 14.908169 + (1.00088503 * DG) + (7.145794 * SDI) + (1.144331 * (D_{MAX}-DG))$$

PIN SYLVESTRE  $A = - 15.879267 + (2.383543 DG) + (9.391882 (G/DG))$

$$A = - 20.676959 + (1.844775 DG) + (2.0360208 (D_{MAX}-DG)) + (4.387685 (G/DG))$$

CHÊNE  $A = - 9.987245 + (2.7776908 DG) + (11.51374 (G/DG))$

$$A = 113.7595178 + (1.640643061 DG) + (91.24216811 * SDI_{prov}) - (5.839722313 * IF) - (20.16708712 (G/DG))$$

R<sup>2</sup> = 0.816

### Estimation des volumes individuelles

V<sub>s</sub>(m<sup>3</sup>)

V<sub>s</sub>= volume de la tige; V<sub>b7</sub>=volume de bois fort des branches

FRÊNE  $V_s = 0.00003025346 * \text{EXP} [(2.24584615 * \text{Ln}(D_i)) - (0.03747857 * (\text{Ln}(D_i))^2) + (0.9409369 * \text{Ln}(H_i))]$   
 $V_{b7} = 0.000001642321 * \text{EXP} [(2.7473215 * \text{Ln}(D_i)) + (0.134828247 * (\text{Ln}(D_i))^2)]$  Di(cm) =BHD;Hi(m)  
 Di(cm);Hi(m)

ÉPICÉA  $V_s = 0.000019905788 * \text{EXP} [(2.52647725 * \text{Ln}(D_i)) - (0.11215444 * (\text{Ln}(D_i))^2) + (1.0487959 * \text{Ln}(H_i))]$   
 $V_{b7} = 0.00466695 * \text{EXP} [(3.06624529 * \text{Ln}(D_i)) - (3.357674 * \text{Ln}(H_i)) + (0.358675 * (\text{Ln}(H_i))^2)]$  Di(cm);Hi(m)  
 Di(cm);Hi(m)

HÊTRE  $V_s = 0.00003695535 * \text{EXP} [(2.31532768 * \text{Ln}(D_i)) - (0.061629119 * (\text{Ln}(D_i))^2) + (0.76100482 * \text{Ln}(H_i)) + (0.03871903 * (\text{Ln}(H_i))^2)]$   
 $V_{b7} = 0.0000000330548 * \text{EXP} [(4.8705796 * \text{Ln}(D_i)) - (0.1584562 * (\text{Ln}(D_i))^2)]$  Di(cm);Hi(m)  
 Di(cm);Hi(m)

DOUGLAS  $V_s = 0.0000640157 * \text{EXP} [(2.128416 * \text{Ln}(D_i)) - (0.05231699 * (\text{Ln}(D_i))^2) + (0.615552 * \text{Ln}(H_i)) + (0.07266674 * (\text{Ln}(H_i))^2)]$   
 $V_{b7} = 218902.9187 * \text{EXP} [(0.434968 * (\text{Ln}(D_i))^2) - (11.963458 * \text{Ln}(H_i)) + (1.810322 * (\text{Ln}(H_i))^2)]$  Di(cm);Hi(m)  
 Di(cm);Hi(m)

PIN SYLVESTRE  $V_s = 0.00004745673 * \text{EXP} [(2.3655399 * \text{Ln}(D_i)) - (0.0575113 * (\text{Ln}(D_i))^2) + (0.6384159 * \text{Ln}(H_i)) + (0.0287252 * (\text{Ln}(H_i))^2)]$   
 $V_{b7} = 0.0000418516 * \text{EXP} [(2.993859 * \text{Ln}(D_i)) - (0.9245714 * \text{Ln}(H_i))]$  Di(cm);Hi(m)  
 Di(cm);Hi(m)

CHÊNE  $V_s = 0.00002193802 * \text{EXP} [(2.277335865 * \text{Ln}(D_i)) - (0.045203919 * (\text{Ln}(D_i))^2) + (1.182327283 * \text{Ln}(H_i)) - (0.042474153 * (\text{Ln}(H_i))^2)]$   $R^2 = 0.998; N = 1899$   
 $V_{b7} = 0.013919329 * \text{EXP} [(-0.468964946 * (\text{Ln}(D_i)) + (0.457406134 * (\text{Ln}(D_i))^2) - (0.543718741 * \text{Ln}(H_i)))]$   $R^2 = 0.986; N = 77$

**Assortiments** D'après les travaux de Dagnélie et al. 1999

a) Drel en fonction de Hrel et paramètres de développement

Drel en % du DHP

FRÊNE  $\text{Drel} = 0.996267 + (0.398246 * \text{Hrel}) - (2.523314 * \text{Hrel}^2) + (1.1518224 * \text{Hrel}^3) - (0.000633599 * \text{DHP})$   
 $\text{Drel} = 1.0580754 - (0.7282756 * \text{Hrel}) + (0.5256125 * \text{Hrel}^2) - (0.8643715 * \text{Hrel}^3) + (0.000630176 * \text{DHP}) -$

ÉPICÉA  $(0.000008639 * \text{DHP}^2) - (0.000089492 * \text{Hi})$  DHP(cm), Hi (m)

HÊTRE  $\text{Drel} = 1.017762 - (1.84744021 * \text{Hrel}^2) + (0.8343452 * \text{Hrel}^3) - (0.000003279 * \text{DHP}^2)$

DOUGLASIE  $\text{Drel} = 1.080409 - (0.952037 * \text{Hrel}) + (0.803164 * \text{Hrel}^2) - (0.939776 * \text{Hrel}^3) + (0.000122359 * \text{DHP}) -$   
 $/(0.000002573234 * \text{DHP}^2)$

PIN SYLVESTRE	$\text{Drel} = 1.117096291 - (1.327060725 * \text{Hrel}) + \text{/(}1.630224658 * \text{Hrel}^2) - (1.469364878 * \text{Hrel}^3) + (0.000353562 * \text{DHP}) - (0.00006001177 * \text{DHP}^2)$	R <sup>2</sup> = 0.995; N= 1449
CHÊNE	$\text{Drel} = 0.957151686 + (0.445731676 * \text{Hrel}) - (2.54049979 * \text{Hrel}^2) + (1.102690441 * \text{Hrel}^3) + (0.00086446 * \text{DHP}) - (0.000001007 * \text{DHP}^2)$	R <sup>2</sup> = 0.989; N= 1449

b) Hrel en fonction de Drel et paramètres de développement

FRÊNE	$\text{Hrel} = 1.017949 - (1.106486 * \text{Der}) + \text{/(}1.3503786 * \text{Drel}^2) - (1.144441 * \text{Drel}^3) - (0.000309044 * \text{DHP})$	
ÉPICÉA	$\text{Hrel} = 0.9958518 - (0.48043011 * \text{Drel}) + (0.05933427 * \text{Drel}^2) - \text{/(}0.49011185 * \text{Drel}^3) + (0.00050768 * \text{DHP}) - (0.000007545 * \text{DHP}^2) - (0.000083949 * \text{Hi})$	
HÊTRE	$\text{Hrel} = 1.0062829 - (0.9831806 * \text{Drel}) + (0.8599408 * \text{Drel}^2) - (0.7765284 * \text{Drel}^3) - (0.000002337 * \text{DHP}^2)$	
DOUGLASIE	$\text{Hrel} = 0.990558 - (0.772914 * \text{Drel}) - (0.921808 * \text{Drel}^2) + (0.696797 * \text{Drel}^3)$	
PIN SYLVESTRE	$\text{Hrel} = 0.89764538 + (0.2605614412 * \text{Drel}) - (1.685474924 * \text{Drel}^2) + (0.61750558 * \text{Drel}^3) + (0.000280781 * \text{DHP}) - (0.00000500386 * \text{DHP}^2)$	R <sup>2</sup> = 0.997; N= 1449
CHÊNE	$\text{Hrel} = 1.017758122 - (1.40606691 * \text{Drel}) + (2.001087099 * \text{Drel}^2) - (1.528494741 * \text{Drel}^3) + (0.001151864 * \text{DHP}) - (0.00000107665 * \text{DHP}^2)$	R <sup>2</sup> = 0.989; N = 1449

**Eclaircie** Données : HIL (coefficient de Hiley ou DGe/DGav, rapport entre le DG du peuplement avant éclaircie et DGe, le DG des arbres prélevés)  
 DMAXe, DMINE donnés par les fonctions ci-dessous :

### Distribution des concurrents

La distribution des diamètres chez les arbres prélevés est définis par une fonction de Weibull

$$\text{DMAXe} = 0.8 * \text{DMAX}$$

$$\text{DMINE} = \text{DMIN}$$

$$\text{DGe} = \text{HIL} * \text{DG}$$

commun à toutes les essences  
 commun à toutes les essences

### Coefficients de Hiley

FRÊNE	$\text{HIL} = 1.1433 - (0.00902 * \text{DG (Bestand)})$
ÉPICÉA	$\text{HIL} = 0.6716 + (0.0047781 * \text{DG (Bestand)})$

HÊTRE	$HIL = 0.7898 + (0.00353 * DG (Bestand))$
DOUGLAS	$HIL = 0.66284 + (0.004237 * DG (Bestand))$
PIN SYLVESTRE	comme Epicéa
CHÊNE	comme Hêtre

## Annexe B. Indices de fertilité et unités phytosociologiques

L'indice de fertilité est défini, selon le standard suisse, comme la hauteur dominante du peuplement à 50 ans. Les valeurs ci-dessous sont des valeurs moyennes basées sur des mesures de l'institut de sylviculture de l'EPFZ réalisées dans les années 70-80 par Hansjörg Lüthy (source : Jean-Philippe Schütz). Elles ont ensuite été actualisées pour correspondre à la nouvelle typologie des unités phytosociologiques.

Nr	Unité phytosociologique	Epicéa	Sapin	Pin	Mélèze	Douglas	Hêtre	Frêne	Erable	Chêne
1	Luzulo silvaticae-Fagetum typicum	22.5	19.9	23.1	26.8	32	19.8			
2	Luzulo silvaticae-Fagetum leucobryetosum	23.8	20	22.1	27	32	20.1			
6	Galio odorati-Fagetum luzuletosum	24.8	23.6	25.8	29.1	32.5	23.8	25.1	21	26
7a	Galio odorati-Fagetum typicum	24.9	24	24	27.5	33	25.1	26.7	25	22
7as	Galio od.-Fagetum typ. mit Stachys	25.1	24.1	20.8	24	33	23.4	26.7	25	22
7d	Galio od.-Fagetum typ. mit Luzula	25.2	21	23.4	28	33	23.4	26.7	25	21.5
7e	Galio od.-Fagetum typ. mit Cornus	25.2	21.2	23	29.8	33	24	26.7	25	19
7f	Galio od.-Fagetum typ. mit Pulmonaria	24.3	22.2	23	26.1	33	24	26.7	25	21.5
7*	Galio od.-Fagetum typ. mit Blechnum	23.5	19	23	24	33	24	26.7	25	20
8	Milio-Fagetum typicum	25.4	24.3	24.5	29.5	35	23.5	26	23	21.5
8as	Milio-Fagetum typicum mit Stachys	25.1	23	24.5	29.5	35	23.9	26	23	21.5
8f	Milio-Fagetum typicum mit Pulmonaria	24.3	21.2	24.5	29.5	35	23	26	23	21.5
8g	Milio-Fagetum typ. mit Pulmon. und Stachys	23.3	19	24.5	29.5	35	23	26	23	21.5
9	Pulmonario-Fagetum typicum	23.8	22.2	23	26.8	32	21.3	25	22.5	17
10	Pulmonario-Fagetum mellitetosum	18.5	13	18.4	23.4	29	20.6	23	20	21.5
11	Aro-Fagetum	25.4	25.2	18.2	26.4	36.5	24	30	25	21
12	Cardamino-Fagetum typicum	18.6	17.7	21	21.9	30.5	17.1	22	19.5	19
13	Cardamino-Fagetum tilietosum	21.	16	22	23		18			
14	Carici albae-Fagetum typicum	15	12.3	14.3			18.6			
15	Carici albae-Fagetum caricetosum montanae	16.8	10.6	15.9			16			
16	Seslerio-Fagetum									
18	Abieti-Fagetum typicum	21	16.	22	23	28	18			
19	Abieti-Fagetum luzuletosum	15.5	10	17	15.5	25	14			

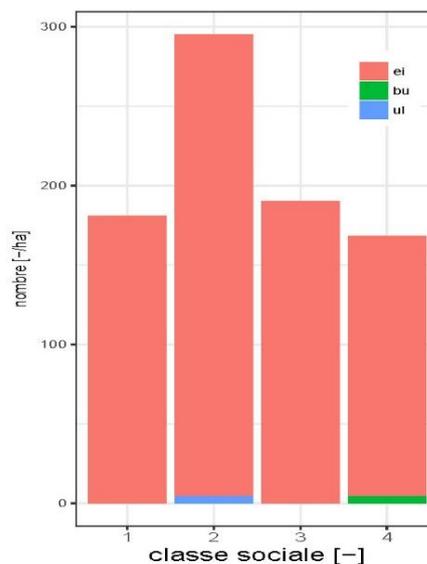
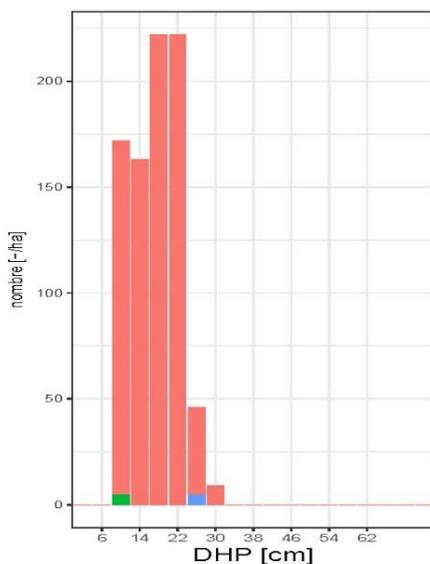
## Annexe C. Evaluation de la distribution des diamètres estimée par SiWaWa 2.0 sur la base des données PPSS : exemple de fiche peuplement

L'intégralité des fiches peuplement est disponible en ligne sur le wiki [siwawa.org](http://siwawa.org).

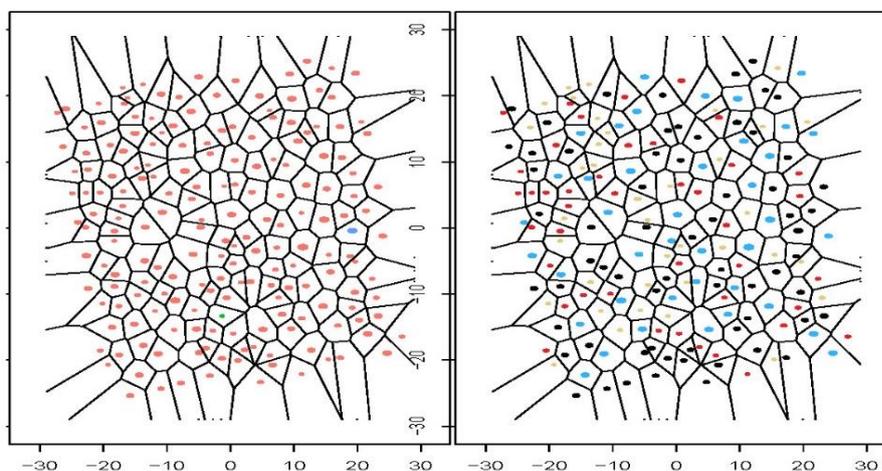
# PPSS 08

surface : 0.22 ha  
 coord. : 597'405 / 200'369  
 essence principale : ei (98.9 % )  
 nombre d'arbres relevés : 184  
 seuil d'inventaire : 8 cm  
 mise en place : 09.08.2016

- N : 833 /ha
- G : 19.8 m<sup>2</sup>/ha dg : 17.4 cm
- dmax : 30 cm dmin : 8 cm
- ddom : 24.2 cm hdom : 16.1 m
- $\frac{dg}{ddom}$  : 72%  $\frac{hdom}{ddom}$  : 67%



Description du peuplement : Nombre de tiges par classe de DHP et par position sociale



Carte : polygones de Thiessen (Voronoi) ; couleur : essence à gauche, statut social à droite (1=bleu, 2=noir, 3=rouge, 4=jaune)

PPSS 08 : Distribution des DHP et des G (distribution de Weibull)

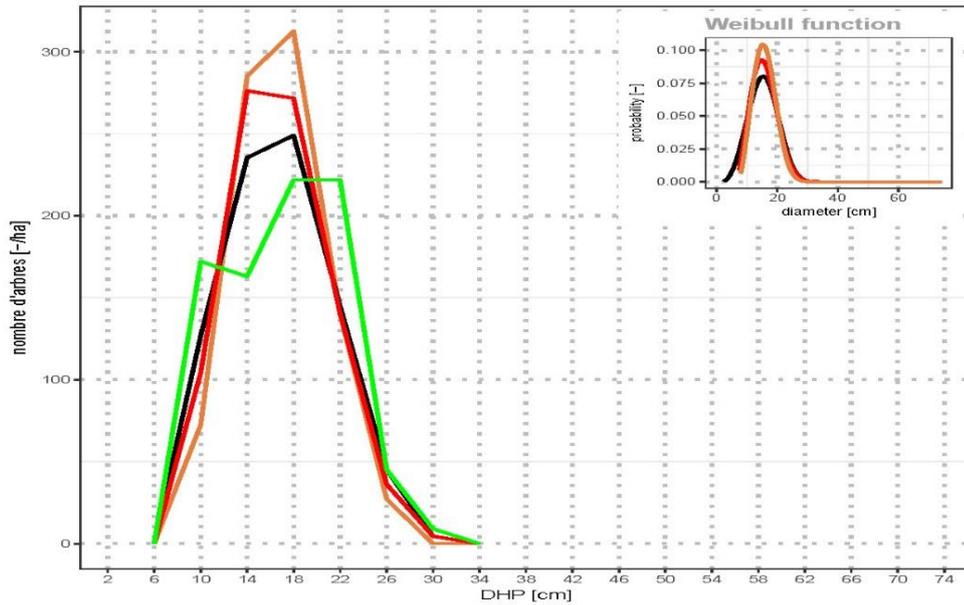


Figure 1: Distribution des DHP en fonction du nombre de tiges : données originales en vert, calculée par l'algorithme du maximum de vraisemblance (en anglais "Maximum Likelihood") en noir, et calculée par Siwawa 2.0 respectivement en orange lorsque  $d_{min}$  et  $d_{max}$  proviennent des données et en rouge lorsque  $d_{min}$  et  $d_{max}$  sont eux-mêmes calculés par siwawa 2.0. Les solutions analytiques exactes des courbes de Weibull sont aussi montrées dans l'encart.

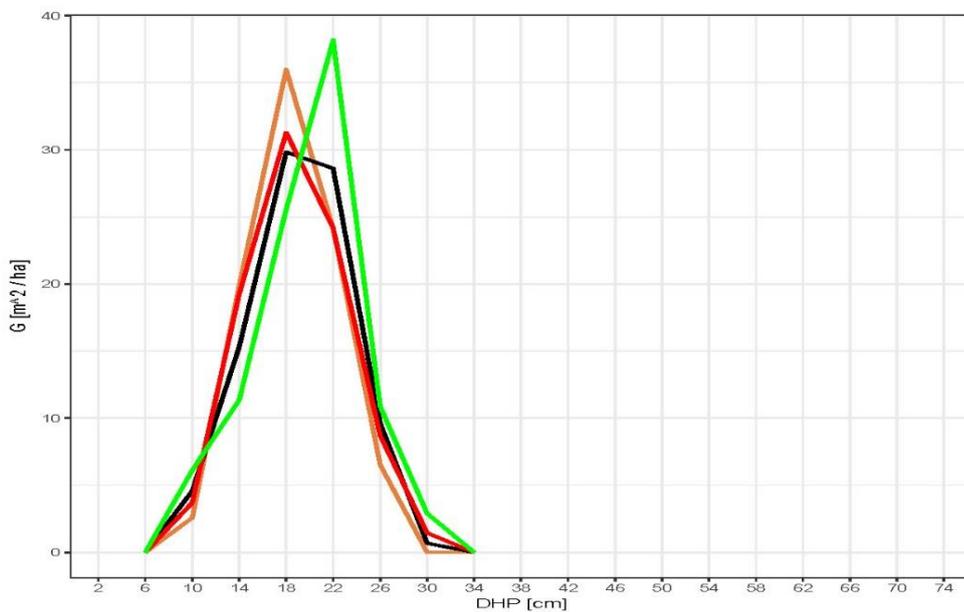


Figure 2: Distribution des DHP en fonction de la surface terrière : données originales en vert, calculée par l'algorithme du maximum de vraisemblance à partir de la distribution de G en noir, et calculée par Siwawa 2.0 à partir de la distribution des tiges respectivement en orange lorsque  $d_{min}$  et  $d_{max}$  proviennent des données et en rouge lorsque  $d_{min}$  et  $d_{max}$  sont eux-mêmes calculés par siwawa 2.0.

PPSS 08 : Tests statistiques (sur DHP et  $g_i * n_i$ )

Les tests  $D^+$ ,  $D^-$ ,  $D$ , et  $AD$  ci-dessous portent tous sur l'hypothèse nulle suivante : *la distribution réelle observée est un échantillon aléatoire tirée à partir de la distribution de Weibull estimée.*

Les tests  $D^+$ ,  $D^-$  et  $D$  sont des tests de type *extremum*, ils sont basés sur des statistiques qui mesurent respectivement l'écart positif maximum entre les distributions réelle et estimée ( $D^+$ ), l'écart négatif maximum ( $D^-$ ) et l'écart absolu maximum ( $D$ ) (ce dernier étant aussi appelé statistique de Kolmogorov-Smirnov).

Le test  $AD$  est le test d'Anderson Darling qui prend en compte l'écart cumulé entre les distributions réelle et estimée sur tout leur ensemble de définition. A ce titre, ce test prend les écarts dans les queues de distribution et pas seulement les écarts maximum (cf. Rinne, 2009), en l'occurrence souvent observés vers le centre de la distribution.

Les tests sont effectués sur les trois types distributions estimées pour ces tests : i) la distribution estimée par le maximum de vraisemblance sur toute l'information disponible ("mle modèle"), ii) la distribution estimée par SiWaWa lorsque les  $d_{min}$  et  $d_{max}$  réels sont connus ("siw 2.0"), iii) la distribution estimée par SiWaWa lorsque les  $d_{min}$  et  $d_{max}$  réels sont inconnus et eux-mêmes estimés par SiWaWa ("siw 2.0 dmin/dmax").

La table 1 présente les tests réalisés sur la distribution des diamètres exprimée en nombre de tiges.

Table 1: Résultat des analyses statistiques (distribution DHP)

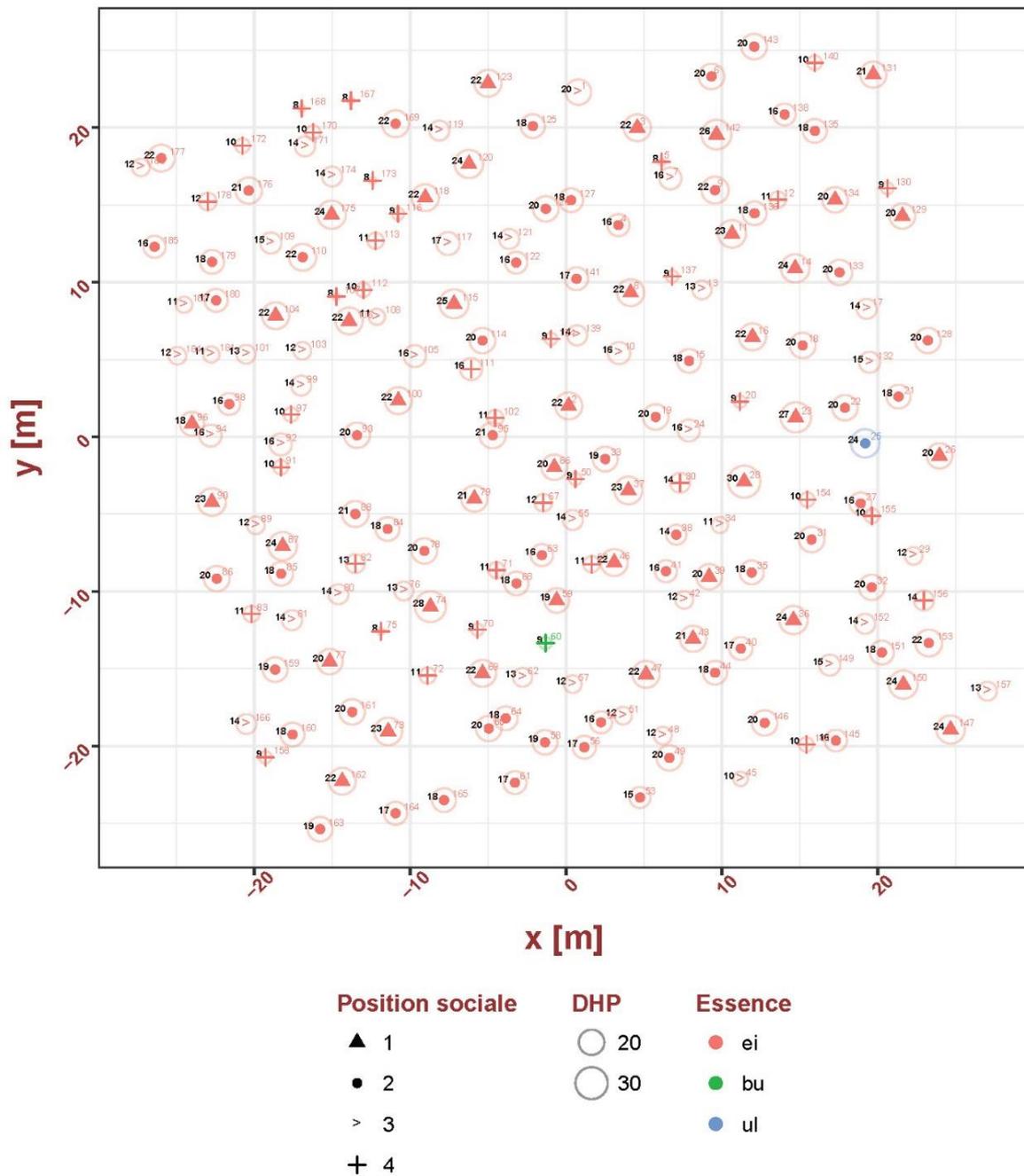
Modèle	Test	Résultats
<b>mle modèle</b>	$D^+$	failed (p=0.25)
<b>mle modèle</b>	$D^-$	success
<b>mle modèle</b>	$D$	success
<b>mle modèle</b>	$AD$	failed (p=0.25)
<b>siw 2.0</b>	$D^+$	failed (p=0.005)
<b>siw 2.0</b>	$D^-$	success
<b>siw 2.0</b>	$D$	failed (p=0.005)
<b>siw 2.0</b>	$AD$	failed (p=0.05)
<b>siw 2.0 dmin/dmax</b>	$D^+$	failed (p=0.005)
<b>siw 2.0 dmin/dmax</b>	$D^-$	success
<b>siw 2.0 dmin/dmax</b>	$D$	failed (p=0.005)
<b>siw 2.0 dmin/dmax</b>	$AD$	failed (p=0.05)

La table 2 présente les tests réalisés sur la distribution des diamètres exprimée par la surface terrière. Dans SiWaWa, cette distribution est calculée directement à partir de la distribution des diamètres par le nombre de tiges. Les tests ne sont pas donc pas refaits pour les valeurs données par SiWaWa, les résultats du tableau 1 ci-dessus restant pertinents.

Table 2: Résultat des analyses statistiques (distribution  $g_i * n_i$ )

Modèle	Test	Résultats
<b>mle modèle</b>	$D^+$	success
<b>mle modèle</b>	$D^-$	success
<b>mle modèle</b>	$D$	success
<b>mle modèle</b>	$AD$	failed (p=0.05)

PPSS 08 : Carte des arbres. Nombre noir : DHP en cm, nombre en couleur : identifiant de l'arbre, rayon du cercle selon le DHP, couleur du figuré selon l'essence, forme du figuré selon la position sociale.



PPSS 08 : Données brutes. Les arbres ayant une position sociale supérieure ou égale à 5 sont reportés dans la table ci-dessous mais ne sont pas pris en compte dans les graphes et tests précédents. Autrement dit, seuls les arbres vivants de la strate principale (position sociale strictement inférieure à 5), pertinents dans l'utilisation de SiWaWa, sont pris en compte dans les analyses précédentes.

Num.	Esp.	dhp	x	y	Pos. soc.	dhp_trier	ID
1	ei	19.50	0.80	22.29	3	29.50	28
2	ei	22.50	0.18	2.00	1	28.00	74
3	ei	22.00	4.58	19.98	1	27.00	23
4	ei	16.50	3.37	13.69	2	25.50	142
5	ei	8.50	6.13	17.77	4	25.00	115
6	ei	20.50	9.34	23.30	2	24.50	14
7	ei	16.50	6.70	16.71	3	24.50	25
8	ei	22.00	4.15	9.32	1	24.50	36
9	ei	22.50	9.57	15.95	2	24.00	120
10	ei	16.50	3.41	5.41	3	24.00	147
11	ei	23.00	10.66	13.12	1	24.00	150
12	ei	11.00	13.60	15.34	4	24.00	175
13	ei	13.00	8.73	9.50	3	23.50	87
14	ei	24.50	14.71	10.89	1	23.00	11
15	ei	18.00	7.90	4.91	2	23.00	37
16	ei	22.00	11.97	6.46	1	23.00	73
17	ei	14.50	19.30	8.27	3	23.00	90
18	ei	19.50	15.19	5.91	2	22.50	2
19	ei	20.00	5.76	1.28	2	22.50	9
20	ei	9.00	11.17	2.27	4	22.50	47
21	ei	18.50	21.34	2.60	2	22.50	69
22	ei	19.50	17.90	1.88	2	22.50	153
23	ei	27.00	14.75	1.26	1	22.00	3
24	ei	16.50	7.89	0.41	3	22.00	8
25	ul	24.50	19.20	-0.42	2	22.00	16
26	ei	20.00	23.97	-1.23	1	22.00	100
27	ei	16.50	18.91	-4.31	2	22.00	118
28	ei	29.50	11.44	-2.90	1	22.00	123
29	ei	12.00	22.31	-7.70	3	22.00	162
30	ei	14.00	7.32	-2.97	4	22.00	169
31	ei	20.00	15.76	-6.64	2	21.50	46
32	ei	20.50	19.62	-9.73	2	21.50	104
33	ei	19.00	2.52	-1.44	2	21.50	106
34	ei	11.00	9.88	-5.70	3	21.50	110
35	ei	17.50	11.92	-8.77	2	21.50	177
36	ei	24.50	14.60	-11.85	1	21.00	43
37	ei	23.00	4.01	-3.47	1	21.00	79
38	ei	13.50	7.08	-6.33	2	21.00	88
39	ei	20.00	9.19	-9.05	1	21.00	95
40	ei	17.00	11.22	-13.69	2	21.00	131
41	ei	16.50	6.42	-8.69	2	21.00	176
42	ei	12.00	7.59	-10.55	3	20.50	6
43	ei	21.00	8.16	-13.06	1	20.50	32
44	ei	18.00	9.57	-15.25	2	20.50	78
45	ei	10.00	11.21	-22.12	3	20.50	86
46	ei	21.50	3.10	-8.13	1	20.50	129
47	ei	22.50	5.14	-15.36	1	20.50	133
48	ei	11.50	6.22	-19.32	3	20.50	161
49	ei	20.00	6.64	-20.76	2	20.00	19
50	ei	9.00	0.61	-2.73	4	20.00	26
51	ei	12.00	3.67	-18.03	3	20.00	31
52	ei	11.00	1.65	-8.24	4	20.00	39
53	ei	15.00	4.75	-23.32	2	20.00	49
54	ei	16.00	2.25	-18.46	2	20.00	65
55	ei	14.50	0.44	-5.38	3	20.00	66
56	ei	17.00	1.18	-20.07	2	20.00	77
57	ei	12.50	0.44	-15.99	3	20.00	93
58	ei	19.00	-1.34	-19.75	2	20.00	126
59	ei	19.00	-0.59	-10.58	1	20.00	128
60	bu	9.00	-1.31	-13.34	4	20.00	134
61	ei	17.00	-3.27	-22.36	2	20.00	146
62	ei	13.00	-2.78	-15.55	3	19.50	1
63	ei	16.50	-1.54	-7.65	2	19.50	18
64	ei	17.50	-3.86	-18.20	2	19.50	22
65	ei	20.00	-4.95	-18.86	2	19.50	114
66	ei	20.00	-0.74	-1.97	1	19.50	143

Continued on next page

Num.	Esp.	dhp	x	y	Pos. soc.	dhp_trier	ID
67	ei	11.50	-1.45	-4.26	4	19.00	33
68	ei	17.50	-3.17	-9.48	2	19.00	58
69	ei	22.50	-5.35	-15.29	1	19.00	59
70	ei	9.00	-5.68	-12.47	4	19.00	159
71	ei	11.00	-4.45	-8.62	4	19.00	163
72	ei	11.00	-8.87	-15.43	4	18.50	21
73	ei	23.00	-11.40	-19.05	1	18.50	125
74	ei	28.00	-8.69	-10.98	1	18.50	165
75	ei	8.00	-11.87	-12.58	4	18.50	179
76	ei	13.00	-10.39	-9.97	3	18.00	15
77	ei	20.00	-15.15	-14.54	1	18.00	44
78	ei	20.50	-9.08	-7.38	2	18.00	84
79	ei	21.00	-5.87	-4.00	1	18.00	127
80	ei	14.50	-14.60	-10.18	3	18.00	135
81	ei	13.50	-17.57	-11.86	3	18.00	136
82	ei	13.00	-13.51	-8.20	4	18.00	151
83	ei	11.00	-20.18	-11.45	4	18.00	160
84	ei	18.00	-11.44	-5.96	2	17.50	35
85	ei	17.50	-18.27	-8.85	2	17.50	64
86	ei	20.50	-22.40	-9.17	2	17.50	68
87	ei	23.50	-18.17	-7.07	1	17.50	85
88	ei	21.00	-13.51	-4.99	2	17.50	96
89	ei	12.00	-19.89	-5.72	3	17.00	40
90	ei	23.00	-22.71	-4.22	1	17.00	56
91	ei	10.00	-18.29	-1.97	4	17.00	61
92	ei	16.50	-18.29	-0.49	3	17.00	117
93	ei	20.00	-13.40	0.10	2	17.00	141
94	ei	15.50	-22.80	0.08	3	17.00	164
95	ei	21.00	-4.70	0.10	2	17.00	180
96	ei	17.50	-23.99	0.84	1	16.50	4
97	ei	10.00	-17.64	1.44	4	16.50	7
98	ei	16.50	-21.60	2.12	2	16.50	10
99	ei	13.50	-16.98	3.31	3	16.50	24
100	ei	22.00	-10.75	2.34	1	16.50	27
101	ei	13.00	-20.52	5.34	3	16.50	41
102	ei	11.00	-4.54	1.22	4	16.50	63
103	ei	12.50	-16.91	5.56	3	16.50	92
104	ei	21.50	-18.62	7.83	1	16.50	98
105	ei	15.50	-9.69	5.22	3	16.50	111
106	ei	21.50	-13.91	7.49	1	16.50	138
107	ei	8.00	-14.73	9.07	4	16.00	54
108	ei	11.00	-12.13	7.76	3	16.00	122
109	ei	15.00	-18.93	12.53	3	16.00	145
110	ei	21.50	-16.89	11.61	2	16.00	185
111	ei	16.50	-6.09	4.38	4	15.50	94
112	ei	10.00	-13.00	9.50	4	15.50	105
113	ei	11.00	-12.21	12.68	4	15.00	53
114	ei	19.50	-5.35	6.22	2	15.00	109
115	ei	25.00	-7.18	8.60	1	15.00	132
116	ei	9.00	-10.77	14.42	4	15.00	149
117	ei	17.00	-7.56	12.49	3	14.50	17
118	ei	22.00	-9.02	15.46	1	14.50	55
119	ei	14.50	-8.12	19.80	3	14.50	80
120	ei	24.00	-6.22	17.64	1	14.50	119
121	ei	14.00	-3.64	12.79	3	14.50	156
122	ei	16.00	-3.19	11.26	2	14.50	171
123	ei	22.00	-5.00	22.86	1	14.00	30
124	ei	9.00	-0.96	6.33	4	14.00	121
125	ei	18.50	-2.12	20.09	2	14.00	152
126	ei	20.00	-1.29	14.74	2	13.50	38
127	ei	18.00	0.33	15.30	2	13.50	81
128	ei	20.00	23.22	6.23	2	13.50	99
129	ei	20.50	21.59	14.27	1	13.50	139
130	ei	9.00	20.62	16.07	4	13.50	166
131	ei	21.00	19.72	23.42	1	13.50	174
132	ei	15.00	19.48	4.82	3	13.00	13

Continued on next page

Num.	Esp.	dhp	x	y	Pos. soc.	dhp_trier	ID
133	ei	20.50	17.55	10.63	2	13.00	62
134	ei	20.00	17.27	15.32	1	13.00	76
135	ei	18.00	15.97	19.78	2	13.00	82
136	ei	18.00	12.10	14.45	2	13.00	101
137	ei	9.00	6.82	10.37	4	13.00	157
138	ei	16.50	14.03	20.84	2	12.50	57
139	ei	13.50	0.72	6.56	3	12.50	103
140	ei	10.50	15.96	24.19	4	12.50	183
141	ei	17.00	0.68	10.22	2	12.00	29
142	ei	25.50	9.66	19.54	1	12.00	42
143	ei	19.50	12.08	25.23	2	12.00	51
144	ei	10.00	15.42	-19.89	4	12.00	89
145	ei	16.00	17.32	-19.64	2	12.00	178
146	ei	20.00	12.75	-18.50	2	12.00	184
147	ei	24.00	24.68	-18.93	1	11.50	48
148	ei	10.50	18.47	-16.62	7	11.50	67
149	ei	15.00	16.93	-14.76	3	11.00	12
150	ei	24.00	21.65	-16.02	1	11.00	34
151	ei	18.00	20.27	-13.95	2	11.00	52
152	ei	14.00	19.19	-12.09	3	11.00	71
153	ei	22.50	23.28	-13.33	2	11.00	72
154	ei	10.50	15.48	-4.06	4	11.00	83
155	ei	10.00	19.64	-5.11	4	11.00	102
156	ei	14.50	22.97	-10.58	4	11.00	108
157	ei	13.00	27.04	-16.45	3	11.00	113
158	ei	9.00	-19.28	-20.72	4	11.00	181
159	ei	19.00	-18.65	-15.05	2	11.00	182
160	ei	18.00	-17.54	-19.25	2	10.50	140
161	ei	20.50	-13.71	-17.79	2	10.50	148
162	ei	22.00	-14.35	-22.27	1	10.50	154
163	ei	19.00	-15.77	-25.37	2	10.00	45
164	ei	17.00	-10.93	-24.34	2	10.00	91
165	ei	18.50	-7.82	-23.49	2	10.00	97
166	ei	13.50	-20.50	-18.57	3	10.00	112
167	ei	8.50	-13.79	21.73	4	10.00	144
168	ei	8.50	-16.95	21.23	4	10.00	155
169	ei	22.00	-10.93	20.24	2	10.00	172
170	ei	9.50	-16.22	19.68	4	9.50	170
171	ei	14.50	-16.74	18.78	3	9.00	20
172	ei	10.00	-20.75	18.83	4	9.00	50
173	ei	8.00	-12.40	16.57	4	9.00	60
174	ei	13.50	-15.00	16.83	3	9.00	70
175	ei	24.00	-15.03	14.36	1	9.00	116
176	ei	21.00	-20.35	15.92	2	9.00	124
177	ei	21.50	-25.96	18.02	2	9.00	130
178	ei	12.00	-22.98	15.21	4	9.00	137
179	ei	18.50	-22.70	11.31	2	9.00	158
180	ei	17.00	-22.44	8.82	2	8.50	5
181	ei	11.00	-22.75	5.32	3	8.50	167
182	ei	11.00	-24.49	8.54	3	8.50	168
183	ei	12.50	-27.26	17.42	3	8.00	75
184	ei	12.00	-24.92	5.24	3	8.00	107
185	ei	16.00	-26.39	12.29	2	8.00	173

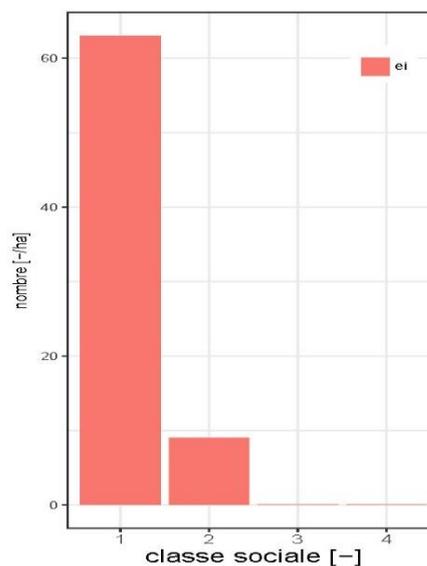
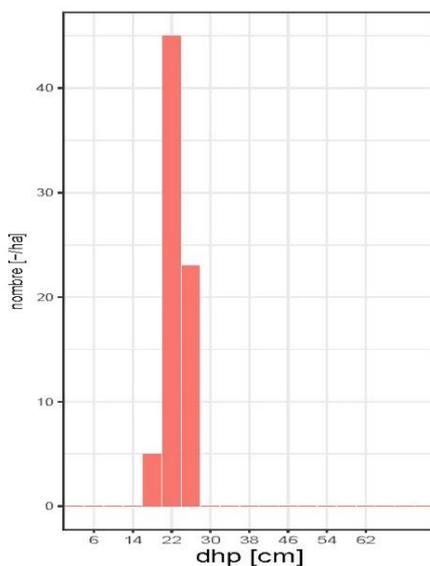
## Annexe D. Evaluation de la distribution des diamètres estimée par SiWaWa 2.0 sur la base des données PPSS : exemple de fiche martelage

L'intégralité des fiches martelage est disponible en ligne sur le wiki [siwawa.org](http://siwawa.org).

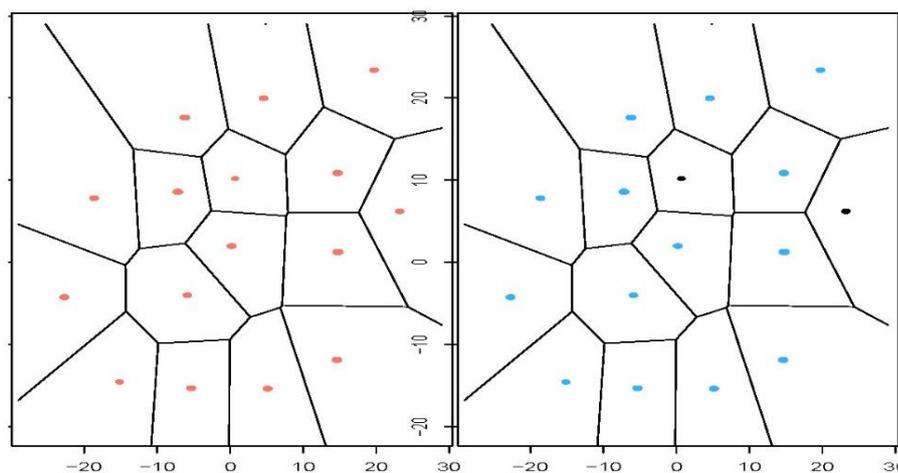
### PPSS 08 - Martelage 1 : Arbres de place

surface: 0.22 ha  
 coord.: 597°405 / 200°369  
 essence principale: ei (100 %)  
 nombre d'arbres relevés: 16  
 seuil d'inventaire : 8 cm  
 martelage : Groupe 1 (04.09.2017)

- N : 72 /ha
- G : 2.88 m<sup>2</sup>/ha dg : 22.5 cm
- dmax : 27 cm dmin : 17 cm



Description des arbres de place : Nombre de tiges par classe de DHP et par position sociale



Carte : polygones de Thiessen (Voronoi) pour les arbres de place ; couleur : essence à gauche (voir légende ci-dessus) et statut social à droite (1=bleu, 2=noir, 3=rouge, 4=jaune)

PPSS 08 : distribution des DHP et des G (distribution de Weibull)

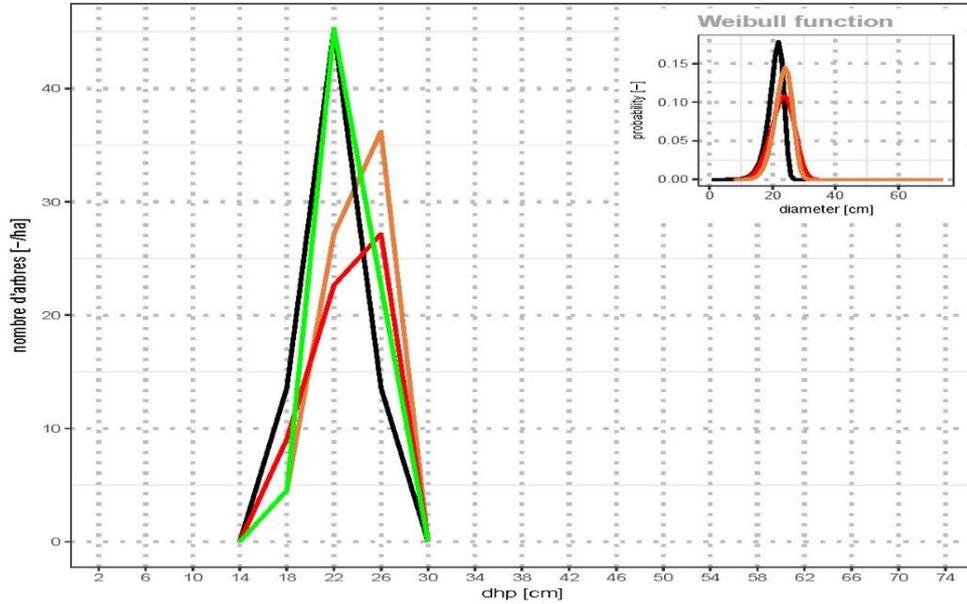


Figure 1: Distribution des DHP des arbres de place en fonction du nombre de tiges : données originales en vert, calculée par l'algorithme du maximum de vraisemblance (en anglais "Maximum Likelihood") en noir, et calculée par Siwawa 2.0 respectivement en orange lorsque  $d_{min}$  et  $d_{max}$  proviennent des données et en rouge lorsque  $d_{min}$  et  $d_{max}$  sont eux-mêmes calculés par siwawa 2.0. Les solutions analytiques exactes des courbes de Weibull sont aussi montrées dans l'encart.

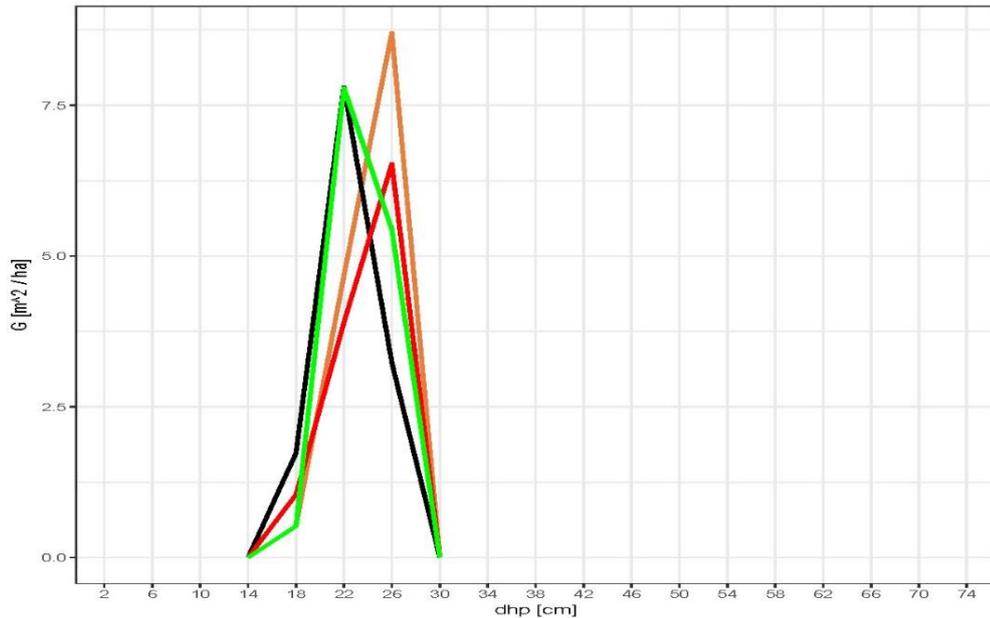


Figure 2: Distribution des DHP des arbres de place en fonction de la surface terrière : données originales en vert, calculée par l'algorithme du maximum de vraisemblance à partir de la distribution de G en noir, et calculée par Siwawa 2.0 à partir de la distribution des tiges respectivement en orange lorsque  $d_{min}$  et  $d_{max}$  proviennent des données et en rouge lorsque  $d_{min}$  et  $d_{max}$  sont eux-mêmes calculés par siwawa 2.0.

Arbres de place : tests statistiques (sur DHP et  $g_i * n_i$ )

Les tests  $D^+$ ,  $D^-$ ,  $D$ , et  $AD$  ci-dessous portent tous sur l'hypothèse nulle suivante : *la distribution réelle observée est un échantillon aléatoire tirée à partir de la distribution de Weibull estimée.*

Les tests  $D^+$ ,  $D^-$  et  $D$  sont des tests de type *extremum*, ils sont basés sur des statistiques qui mesurent respectivement l'écart positif maximum entre les distributions réelle et estimée ( $D^+$ ), l'écart négatif maximum ( $D^-$ ) et l'écart absolu maximum ( $D$ ) (ce dernier étant aussi appelé statistique de Kolmogorov-Smirnov).

Le test  $AD$  est le test d'Anderson Darling qui prend en compte l'écart cumulé entre les distributions réelle et estimée sur tout leur ensemble de définition. A ce titre, ce test prend les écarts dans les queues de distribution et pas seulement les écarts maximum (cf. Rinne, 2009), en l'occurrence souvent observés vers le centre de la distribution.

Les tests sont effectués sur les trois types distributions estimées pour ces tests : i) la distribution estimée par le maximum de vraisemblance sur toute l'information disponible ("mle modèle"), ii) la distribution estimée par SiWaWa lorsque les  $d_{min}$  et  $d_{max}$  réels sont connus ("siw 2.0"), iii) la distribution estimée par SiWaWa lorsque les  $d_{min}$  et  $d_{max}$  réels sont inconnus et eux-mêmes estimés par SiWaWa ("siw 2.0 dmin/dmax").

La table 1 présente les tests réalisés sur la distribution des diamètres exprimée en nombre de tiges.

Table 1: Résultat des analyses statistiques (distribution DHP)

Modèle	Test	Résultats
<b>mle modèle</b>	$D^+$	success
<b>mle modèle</b>	$D^-$	success
<b>mle modèle</b>	$D$	success
<b>mle modèle</b>	$AD$	success
<b>siw 2.0</b>	$D^+$	failed (p=0.05)
<b>siw 2.0</b>	$D^-$	success
<b>siw 2.0</b>	$D$	failed (p=0.05)
<b>siw 2.0</b>	$AD$	failed (p=0.05)
<b>siw 2.0 dmin/dmax</b>	$D^+$	failed (p=0.05)
<b>siw 2.0 dmin/dmax</b>	$D^-$	success
<b>siw 2.0 dmin/dmax</b>	$D$	failed (p=0.05)
<b>siw 2.0 dmin/dmax</b>	$AD$	failed (p=0.05)

La table 2 présente les tests réalisés sur la distribution des diamètres exprimée par la surface terrière. Dans SiWaWa, cette distribution est calculée directement à partir de la distribution des diamètres par le nombre de tiges. Les tests ne sont pas donc pas refaits pour les valeurs données par SiWaWa, les résultats du tableau 1 ci-dessus restant pertinents.

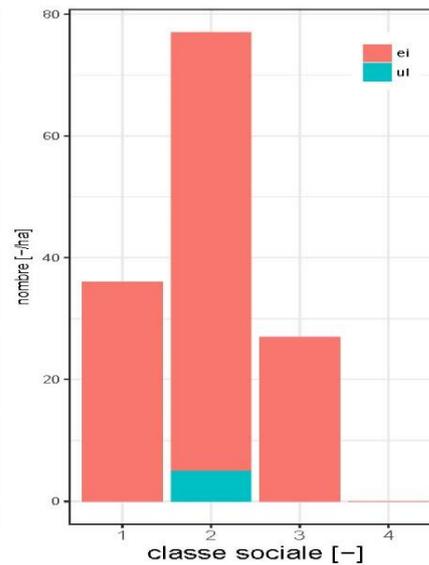
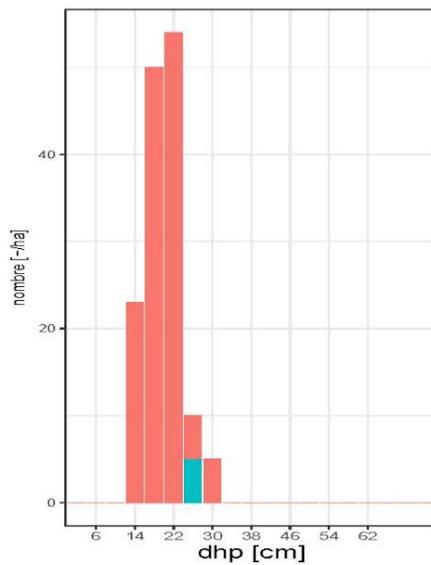
Table 2: Résultat des analyses statistiques (distribution  $g_i * n_i$ )

Modèle	Test	Résultats
<b>mle</b>	$D^+$	success
<b>mle</b>	$D^-$	success
<b>mle</b>	$D$	success
<b>mle</b>	$AD$	failed (p=0.05)

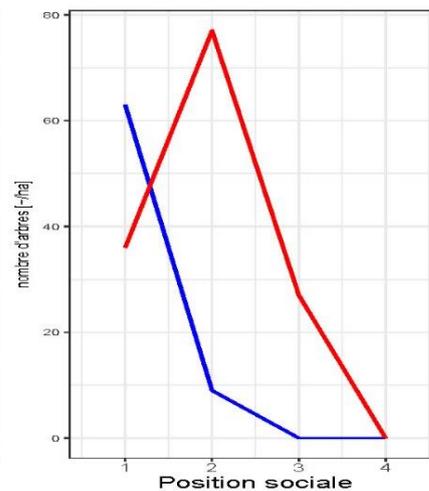
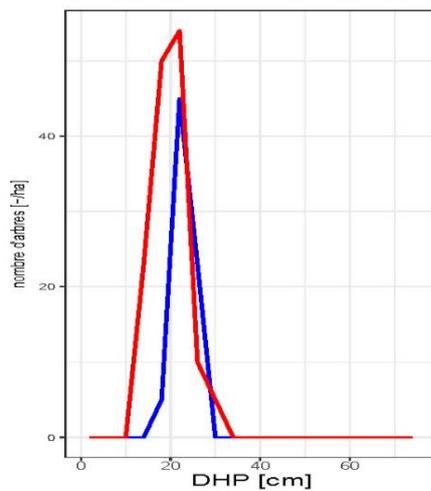
# PPSS 08 - Martelage 1 : Arbres concurrents

surface: 0.22 ha  
 coord.: 597'405 / 200'369  
 essence principale: ei (96.8 % )  
 nombre d'arbres relevés: 31  
 seuil d'inventaire : 8 cm  
 martelage : Groupe 1 (04.09.2017)

- N : 140 /ha
- G : 4.23 m<sup>2</sup>/ha dg : 19.6 cm
- dmax : 28 cm dmin : 12 cm
- Gécl : 21%  $\frac{dg_{conc}}{dg_{tot}}$  : 113%
- #Concurrents/arb de place : 1.9



Description des concurrents : Nombre de tiges par classe de DHP et par position sociale



Comparaison des distributions pour les concurrents (en rouge) et les arbres de place (en bleu)

Arbres concurrents : distribution des DHP et des G (distribution de Weibull)

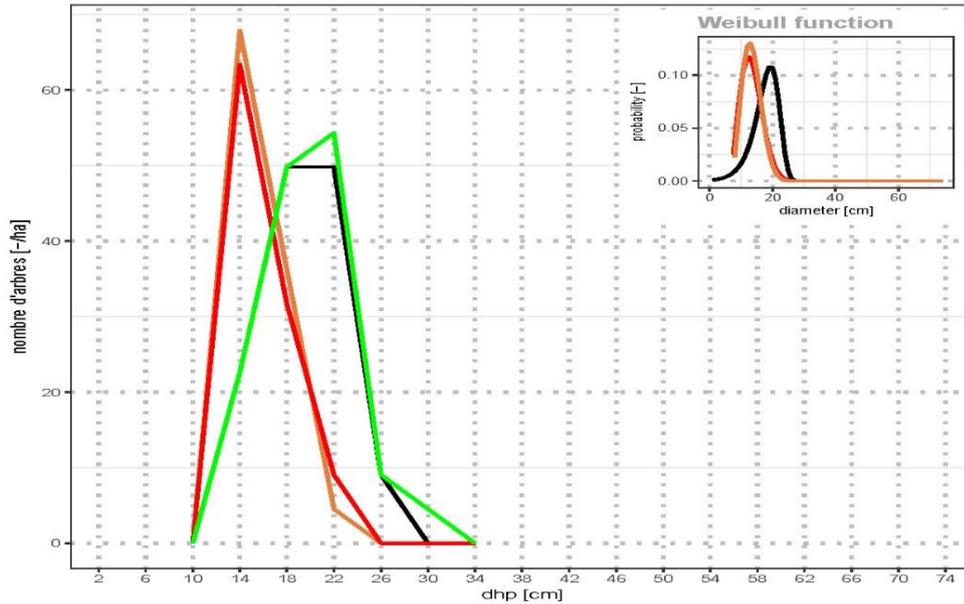


Figure 3: Distribution des DHP des arbres concurrents en fonction du nombre de tiges : données originales en vert, calculée par l'algorithme du maximum de vraisemblance (en anglais "Maximum Likelihood") en noir, et calculée par Siwawa 2.0 respectivement en orange lorsque  $d_{min}$  et  $d_{max}$  proviennent des données et en rouge lorsque  $d_{min}$  et  $d_{max}$  sont eux-mêmes calculés par siwawa 2.0. Les solutions analytiques exactes des courbes de Weibull sont aussi montrées dans l'encart.

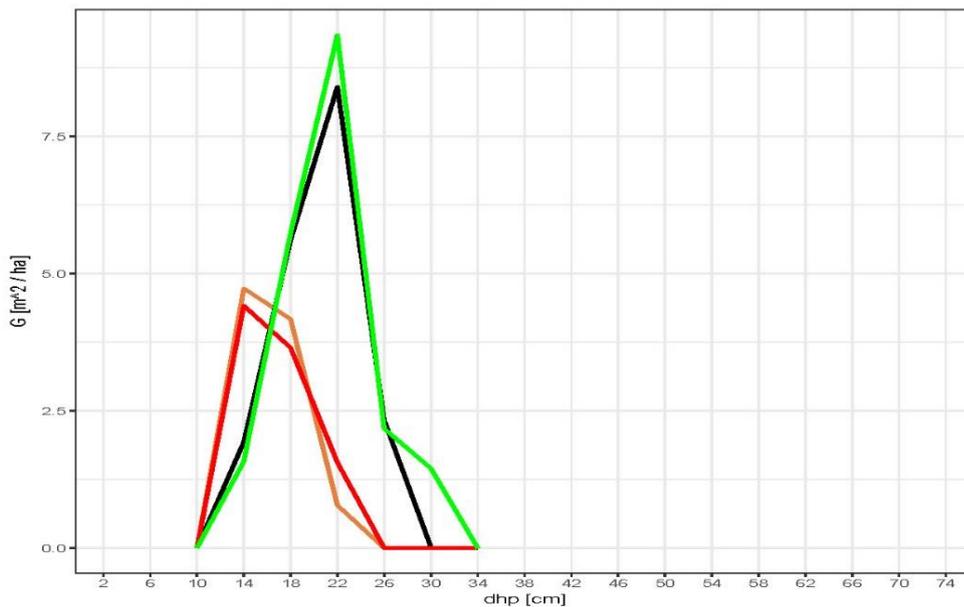


Figure 4: Distribution des DHP des arbres concurrents en fonction de la surface terrière : données originales en vert, calculée par l'algorithme du maximum de vraisemblance à partir de la distribution de G en noir, et calculée par Siwawa 2.0 à partir de la distribution des tiges respectivement en orange lorsque  $d_{min}$  et  $d_{max}$  proviennent des données et en rouge lorsque  $d_{min}$  et  $d_{max}$  sont eux-mêmes calculés par siwawa 2.0.

Concurrents : tests statistiques (sur DHP et  $g_i * n_i$ )

Les tests  $D^+$ ,  $D^-$ ,  $D$ , et  $AD$  ci-dessous portent tous sur l'hypothèse nulle suivante : *la distribution réelle observée est un échantillon aléatoire tirée à partir de la distribution de Weibull estimée.*

Les tests  $D^+$ ,  $D^-$  et  $D$  sont des tests de type *extremum*, ils sont basés sur des statistiques qui mesurent respectivement l'écart positif maximum entre les distributions réelle et estimée ( $D^+$ ), l'écart négatif maximum ( $D^-$ ) et l'écart absolu maximum ( $D$ ) (ce dernier étant aussi appelé statistique de Kolmogorov-Smirnov).

Le test  $AD$  est le test d'Anderson Darling qui prend en compte l'écart cumulé entre les distributions réelle et estimée sur tout leur ensemble de définition. A ce titre, ce test prend les écarts dans les queues de distribution et pas seulement les écarts maximum (cf. Rinne, 2009), en l'occurrence souvent observés vers le centre de la distribution.

Les tests sont effectués sur les trois types distributions estimées pour ces tests : i) la distribution estimée par le maximum de vraisemblance sur toute l'information disponible ("mle modèle"), ii) la distribution estimée par SiWaWa lorsque les  $d_{min}$  et  $d_{max}$  réels sont connus ("siw 2.0"), iii) la distribution estimée par SiWaWa lorsque les  $d_{min}$  et  $d_{max}$  réels sont inconnus et eux-mêmes estimés par SiWaWa ("siw 2.0 dmin/dmax").

La table 3 présente les tests réalisés sur la distribution des diamètres exprimée en nombre de tiges.

Table 3: Résultat des analyses statistiques (distribution DHP)

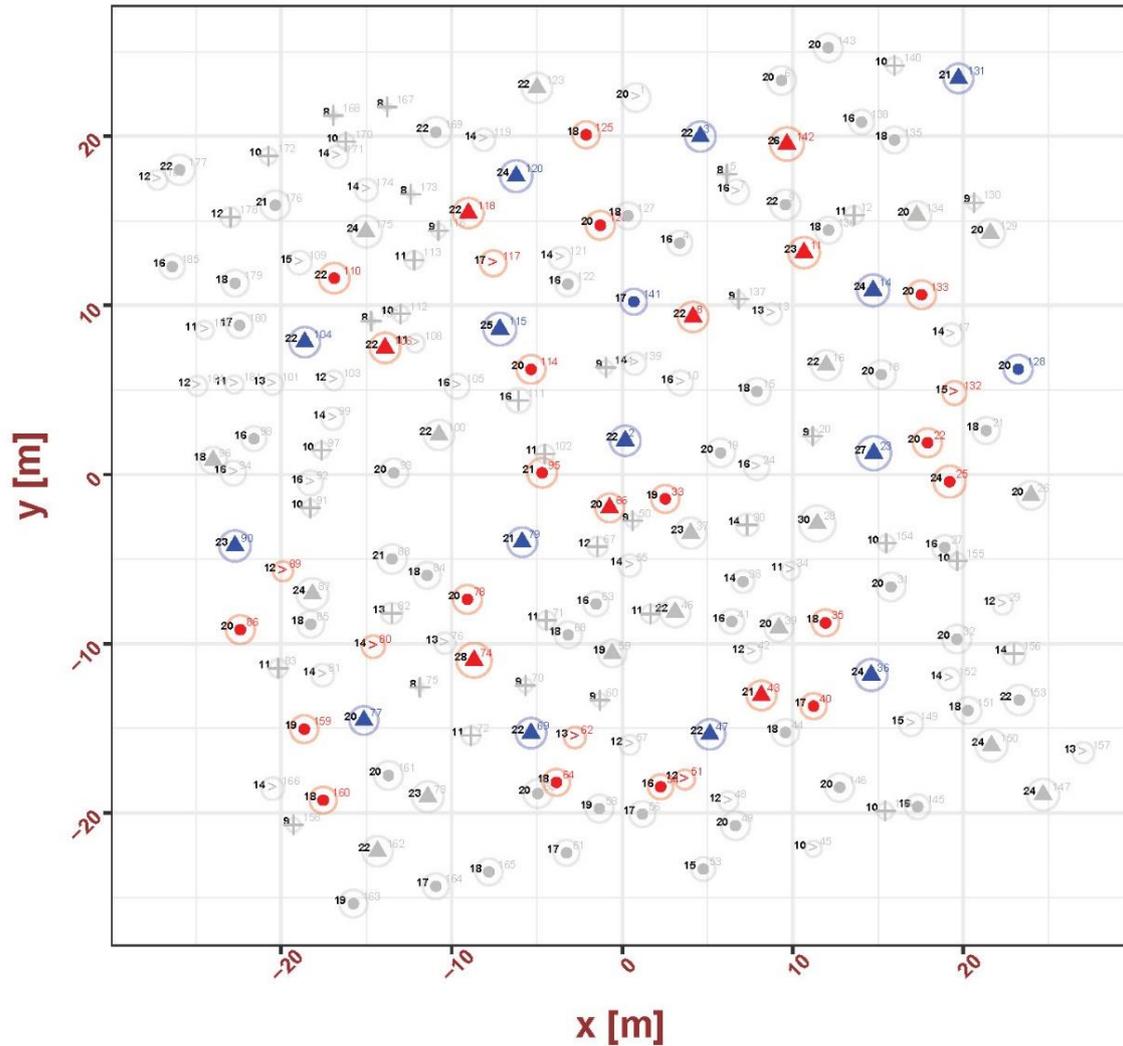
Modèle	Test	Résultats
<b>mle modèle</b>	$D^+$	success
<b>mle modèle</b>	$D^-$	success
<b>mle modèle</b>	$D$	success
<b>mle modèle</b>	$AD$	success
<b>siw 2.0</b>	$D^+$	success
<b>siw 2.0</b>	$D^-$	success
<b>siw 2.0</b>	$D$	success
<b>siw 2.0</b>	$AD$	failed (p=0.05)
<b>siw 2.0 dmin/dmax</b>	$D^+$	success
<b>siw 2.0 dmin/dmax</b>	$D^-$	success
<b>siw 2.0 dmin/dmax</b>	$D$	success
<b>siw 2.0 dmin/dmax</b>	$AD$	failed (p=0.05)

La table 4 présente les tests réalisés sur la distribution des diamètres exprimée par la surface terrière. Dans SiWaWa, cette distribution est calculée directement à partir de la distribution des diamètres par le nombre de tiges. Les tests ne sont pas donc pas refaits pour les valeurs données par SiWaWa, les résultats du tableau 1 ci-dessus restant pertinents.

Table 4: Résultat des analyses statistiques (distribution  $g_i * n_i$ )

Modèle	Test	Résultats
<b>mle</b>	$D^+$	success
<b>mle</b>	$D^-$	success
<b>mle</b>	$D$	success
<b>mle</b>	$AD$	failed (p=0.05)

PPSS 08 : Carte des arbres. Nombre noir : DHP en cm, nombre en couleur : identifiant de l'arbre, rayon du cercle selon le DHP, couleur du figuré selon le statut de martelage (arbre de place, concurrent), forme du figuré selon la position sociale de l'arbre



Position sociale	DHP	Statut de martelage
▲ 1	○ 20	● Autres
● 2	○ 30	● Concurrents
> 3		● Arbres de place
+ 4		

PPSS 08 : Données brutes. La colonne "Decision" correspond au statut de l'arbre (arbre de place=2, concurrents=1) à la suite du martelage. Les arbres ayant une position sociale supérieure ou égale à 5 sont reportés dans la table ci-dessous mais ne sont pas pris en compte dans les graphes et tests précédents. Autrement dit, seuls les arbres vivants de la strate principale (position sociale strictement inférieure à 5), pertinents dans l'utilisation de SiWaWa, sont pris en compte dans les analyses précédentes.

Nr Arb	Essence	PosSoc	DHP	Coor_X	Coor_Y	Decision
2	ei	1	22.50	0.18	2.00	2
3	ei	1	22.00	4.58	19.98	2
14	ei	1	24.50	14.71	10.89	2
23	ei	1	27.00	14.75	1.26	2
36	ei	1	24.50	14.60	-11.85	2
47	ei	1	22.50	5.14	-15.36	2
69	ei	1	22.50	-5.35	-15.29	2
77	ei	1	20.00	-15.15	-14.54	2
79	ei	1	21.00	-5.87	-4.00	2
90	ei	1	23.00	-22.71	-4.22	2
104	ei	1	21.50	-18.62	7.83	2
115	ei	1	25.00	-7.18	8.60	2
120	ei	1	24.00	-6.22	17.64	2
128	ei	2	20.00	23.22	6.23	2
131	ei	1	21.00	19.72	23.42	2
141	ei	2	17.00	0.68	10.22	2
8	ei	1	22.00	4.15	9.32	1
11	ei	1	23.00	10.66	13.12	1
22	ei	2	19.50	17.90	1.88	1
25	ul	2	24.50	19.20	-0.42	1
33	ei	2	19.00	2.52	-1.44	1
35	ei	2	17.50	11.92	-8.77	1
40	ei	2	17.00	11.22	-13.69	1
43	ei	1	21.00	8.16	-13.06	1
51	ei	3	12.00	3.67	-18.03	1
54	ei	2	16.00	2.25	-18.46	1
62	ei	3	13.00	-2.78	-15.55	1
64	ei	2	17.50	-3.86	-18.20	1
66	ei	1	20.00	-0.74	-1.97	1
74	ei	1	28.00	-8.69	-10.98	1
78	ei	2	20.50	-9.08	-7.38	1
80	ei	3	14.50	-14.60	-10.18	1
86	ei	2	20.50	-22.40	-9.17	1
89	ei	3	12.00	-19.89	-5.72	1
95	ei	2	21.00	-4.70	0.10	1
106	ei	1	21.50	-13.91	7.49	1
110	ei	2	21.50	-16.89	11.61	1
114	ei	2	19.50	-5.35	6.22	1
117	ei	3	17.00	-7.56	12.49	1
118	ei	1	22.00	-9.02	15.46	1
125	ei	2	18.50	-2.12	20.09	1
126	ei	2	20.00	-1.29	14.74	1
132	ei	3	15.00	19.48	4.82	1
133	ei	2	20.50	17.55	10.63	1
142	ei	1	25.50	9.66	19.54	1
159	ei	2	19.00	-18.65	-15.05	1
160	ei	2	18.00	-17.54	-19.25	1
1	ei	3	19.50	0.80	22.29	
4	ei	2	16.50	3.37	13.69	
5	ei	4	8.50	6.13	17.77	
6	ei	2	20.50	9.34	23.30	
7	ei	3	16.50	6.70	16.71	
9	ei	2	22.50	9.57	15.95	
10	ei	3	16.50	3.41	5.41	
12	ei	4	11.00	13.60	15.34	
13	ei	3	13.00	8.73	9.50	
15	ei	2	18.00	7.90	4.91	
16	ei	1	22.00	11.97	6.46	
17	ei	3	14.50	19.30	8.27	
18	ei	2	19.50	15.19	5.91	
19	ei	2	20.00	5.76	1.28	
20	ei	4	9.00	11.17	2.27	
21	ei	2	18.50	21.34	2.60	
24	ei	3	16.50	7.89	0.41	

Continued on next page

Nr	Arb	Essence	PosSoc	DHP	Coor X	Coor Y	Decision
26		ei	1	20.00	23.97	-1.23	
27		ei	2	16.50	18.91	-4.31	
28		ei	1	29.50	11.44	-2.90	
29		ei	3	12.00	22.31	-7.70	
30		ei	4	14.00	7.32	-2.97	
31		ei	2	20.00	15.76	-6.64	
32		ei	2	20.50	19.62	-9.73	
34		ei	3	11.00	9.88	-5.70	
37		ei	1	23.00	4.01	-3.47	
38		ei	2	13.50	7.08	-6.33	
39		ei	1	20.00	9.19	-9.05	
41		ei	2	16.50	6.42	-8.69	
42		ei	3	12.00	7.59	-10.55	
44		ei	2	18.00	9.57	-15.25	
45		ei	3	10.00	11.21	-22.12	
46		ei	1	21.50	3.10	-8.13	
48		ei	3	11.50	6.22	-19.32	
49		ei	2	20.00	6.64	-20.76	
50		ei	4	9.00	0.61	-2.73	
52		ei	4	11.00	1.65	-8.24	
53		ei	2	15.00	4.75	-23.32	
55		ei	3	14.50	0.44	-5.38	
56		ei	2	17.00	1.18	-20.07	
57		ei	3	12.50	0.44	-15.99	
58		ei	2	19.00	-1.34	-19.75	
59		ei	1	19.00	-0.59	-10.58	
60		bu	4	9.00	-1.31	-13.34	
61		ei	2	17.00	-3.27	-22.36	
63		ei	2	16.50	-1.54	-7.65	
65		ei	2	20.00	-4.95	-18.86	
67		ei	4	11.50	-1.45	-4.26	
68		ei	2	17.50	-3.17	-9.48	
70		ei	4	9.00	-5.68	-12.47	
71		ei	4	11.00	-4.45	-8.62	
72		ei	4	11.00	-8.87	-15.43	
73		ei	1	23.00	-11.40	-19.05	
75		ei	4	8.00	-11.87	-12.58	
76		ei	3	13.00	-10.39	-9.97	
81		ei	3	13.50	-17.57	-11.86	
82		ei	4	13.00	-13.51	-8.20	
83		ei	4	11.00	-20.18	-11.45	
84		ei	2	18.00	-11.44	-5.96	
85		ei	2	17.50	-18.27	-8.85	
87		ei	1	23.50	-18.17	-7.07	
88		ei	2	21.00	-13.51	-4.99	
91		ei	4	10.00	-18.29	-1.97	
92		ei	3	16.50	-18.29	-0.49	
93		ei	2	20.00	-13.40	0.10	
94		ei	3	15.50	-22.80	0.08	
96		ei	1	17.50	-23.99	0.84	
97		ei	4	10.00	-17.64	1.44	
98		ei	2	16.50	-21.60	2.12	
99		ei	3	13.50	-16.98	3.31	
100		ei	1	22.00	-10.75	2.34	
101		ei	3	13.00	-20.52	5.34	
102		ei	4	11.00	-4.54	1.22	
103		ei	3	12.50	-16.91	5.56	
105		ei	3	15.50	-9.69	5.22	
107		ei	4	8.00	-14.73	9.07	
108		ei	3	11.00	-12.13	7.76	
109		ei	3	15.00	-18.93	12.53	
111		ei	4	16.50	-6.09	4.38	
112		ei	4	10.00	-13.00	9.50	
113		ei	4	11.00	-12.21	12.68	
116		ei	4	9.00	-10.77	14.42	
119		ei	3	14.50	-8.12	19.80	

Continued on next page

Nr	Arb	Essence	PosSoc	DHP	Coor X	Coor Y	Decision
121	ei		3	14.00	-3.64	12.79	
122	ei		2	16.00	-3.19	11.26	
123	ei		1	22.00	-5.00	22.86	
124	ei		4	9.00	-0.96	6.33	
127	ei		2	18.00	0.33	15.30	
129	ei		1	20.50	21.59	14.27	
130	ei		4	9.00	20.62	16.07	
134	ei		1	20.00	17.27	15.32	
135	ei		2	18.00	15.97	19.78	
136	ei		2	18.00	12.10	14.45	
137	ei		4	9.00	6.82	10.37	
138	ei		2	16.50	14.03	20.84	
139	ei		3	13.50	0.72	6.56	
140	ei		4	10.50	15.96	24.19	
143	ei		2	19.50	12.08	25.23	
144	ei		4	10.00	15.42	-19.89	
145	ei		2	16.00	17.32	-19.64	
146	ei		2	20.00	12.75	-18.50	
147	ei		1	24.00	24.68	-18.93	
149	ei		3	15.00	16.93	-14.76	
150	ei		1	24.00	21.65	-16.02	
151	ei		2	18.00	20.27	-13.95	
152	ei		3	14.00	19.19	-12.09	
153	ei		2	22.50	23.28	-13.33	
154	ei		4	10.50	15.48	-4.06	
155	ei		4	10.00	19.64	-5.11	
156	ei		4	14.50	22.97	-10.58	
157	ei		3	13.00	27.04	-16.45	
158	ei		4	9.00	-19.28	-20.72	
161	ei		2	20.50	-13.71	-17.79	
162	ei		1	22.00	-14.35	-22.27	
163	ei		2	19.00	-15.77	-25.37	
164	ei		2	17.00	-10.93	-24.34	
165	ei		2	18.50	-7.82	-23.49	
166	ei		3	13.50	-20.50	-18.57	
167	ei		4	8.50	-13.79	21.73	
168	ei		4	8.50	-16.95	21.23	
169	ei		2	22.00	-10.93	20.24	
170	ei		4	9.50	-16.22	19.68	
171	ei		3	14.50	-16.74	18.78	
172	ei		4	10.00	-20.75	18.83	
173	ei		4	8.00	-12.40	16.57	
174	ei		3	13.50	-15.00	16.83	
175	ei		1	24.00	-15.03	14.36	
176	ei		2	21.00	-20.35	15.92	
177	ei		2	21.50	-25.96	18.02	
178	ei		4	12.00	-22.98	15.21	
179	ei		2	18.50	-22.70	11.31	
180	ei		2	17.00	-22.44	8.82	
181	ei		3	11.00	-22.75	5.32	
182	ei		3	11.00	-24.49	8.54	
183	ei		3	12.50	-27.26	17.42	
184	ei		3	12.00	-24.92	5.24	
185	ei		2	16.00	-26.39	12.29	