

2009-2010

MASTER STVE
Sciences et Technologies du Vivant et de
l'Environnement

Mention
Espaces, Ressources, Milieux

Spécialité FGE
Fonctionnement et Gestion des Ecosystèmes

EVALUATION D'UN MODELE DE SIMULATION
DE DYNAMIQUE FORESTIERE EN
SAPINIERE-PESSIERE IRRÉGULIERE DE MONTAGNE.

VALENTINE LAFOND

Mémoire de stage, soutenu à Nancy le 06/09/2010

Benoît Courbaud, ingénieur-chercheur.

Cemagref, centre de Grenoble.
2, rue de la papeterie.
38402 St Martin d'Hères.

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVE

Master STVE d'AgroParisTech Nancy Spécialité « Fonctionnement et Gestion des Ecosystèmes »	TRAVAUX D'ÉLÈVES
TITRE : Evaluation d'un modèle de simulation de dynamique forestière en sapinière-pessière irrégulière de montagne.	Mots clés : Modèle de simulation ; Méthode d'évaluation ; Biais de prédiction ; Forêt hétérogène ; Forêt de montagne ; Caractéristiques globales; Distribution en diamètre.
AUTEUR(S) : Valentine Lafond	Année : 2009-2010
Caractéristiques : 1 volume ; 38 pages ; 17 figures ; 4 annexes ; 1 carte ; bibliographie.	

CADRE DU TRAVAIL		
ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT : Cemagref de Grenoble. Cemagref, centre de Grenoble. 2, rue de la papeterie. 38402 St Martin d'Hères.		
Nom du responsable : Benoît Courbaud. Fonction : Ingénieur-chercheur.		
Nom du correspondant AgroParisTech Nancy :		
Stage ☒	Autre ☐	Date de remise : 27/08/2010
Contrat avec Gref Services Nancy ☐ OUI ☒ NON		

SUITE À DONNER (réservé au service des études APT)
☐ Consultable et diffusable ☐ Confidentiel de façon permanente ☐ Confidentiel jusqu'au / / , puis diffusable

SOMMAIRE

TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	2
Liste des figures.....	2
Liste des tableaux.....	2
REMERCIEMENTS	3
I- INTRODUCTION.....	3
1. Présentation du Cemagref et de ses missions.....	3
2. Contexte, enjeux et état de l’art.....	3
2.1 Evolution du monde forestier et renforcement des attentes vis-à-vis de la gestion durable et multifonctionnelle des forêts	3
2.2 Vers un renouvellement des itinéraires sylvicoles.....	4
2.3 Utiliser les modèles de simulation comme support pour l’expérimentation.....	4
3. Cadre et objectifs de l’étude.....	5
3.1 Projet ONF-Cemagref & missions confiées.....	5
3.2 Développement d’une méthode d’évaluation pour le modèle Samsara2	5
3.3 Objectifs.....	6
3.4 Hypothèses.....	6
II- MATERIELS ET METHODES.....	7
1. Démarche générale.....	7
2. Matériels : données, modèle et algorithme.....	7
2.1 Zone d’étude et données	7
2.2 Présentation du modèle Samsara2.....	8
2.3 Développement d’un algorithme empirique d’éclaircie automatique	9
3. Méthodes utilisées.....	9
3.1 Sélection de méthodes de comparaison de distributions en diamètre	9
3.2 Validation de l’algorithme d’éclaircie automatique.....	10
3.3 Diagnostic des biais de Samsara2	11
III- RESULTATS	13
1. Validation de l’algorithme d’éclaircie automatique.....	13
1.1 Détermination de groupes de qualité de reproduction des éclaircies.....	13
1.2 Performance de l’algorithme d’éclaircie et lien avec la forme de la distribution	16
2. Diagnostic des biais de Samsara2	17
2.1 Mise en évidence de biais de prédiction pour les variables globales du peuplement	17
2.2 Prédiction de la distribution en diamètre	17
IV- DISCUSSION	22
1. Biais de Samsara2, fiabilité des prédictions et améliorations possibles.....	22
1.1 Fiabilité des prédictions, importance des biais et surestimation du diamètre.....	22
1.2 Hypothèse sur l’origine des biais mis en évidence.....	22
1.3 Qualité des prédictions, influence des changements d’échelles et des extrapolations.....	23
1.4 Evolution des biais dans le temps et durée maximale de simulation.....	23
2. Intérêt et améliorations possibles de la méthode d’évaluation de modèle.....	23
2.1 Originalité de la méthode.....	23
2.2 Intérêt de combiner plusieurs méthodes de comparaison de distributions en diamètre.....	23
2.3 Performances de l’algorithme d’éclaircie et améliorations envisageables.....	24
V- CONCLUSION ET PERSPECTIVES	25
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	26
ANNEXE 1 – Recherche de méthodes adaptées pour la comparaison des distributions en diamètre ..	29
ANNEXE 2 – Illustration du fonctionnement de l’algorithme empirique d’éclaircie automatique	31
ANNEXE 3 – Détail de la validation de l’algorithme.....	32
ANNEXE 4 – Fonctionnement de Capsis4 avec Samsara2	35
RESUME.....	38

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Liste des figures

Figure 1 : Carte des massifs des Alpes du Nord (Gauquelin et Courbaud 2006) et localisation des sites de Queige et Lanslebourg.....	7
Figure 2 : Fonctionnement du modèle Samsara2 (Courbaud et al. 2010b).....	8
Figure 3 : Comparaison graphique des distributions d'éclaircie prédites et observées.....	14
Figure 4 : Qualité de reproduction des éclaircies et identification de groupes par ACP.....	15
Figure 5 : Différences entre les distributions d'éclaircie prédites et observées, établies selon une méthode adaptée depuis KaDonna et Seaver (2007).....	16
Figure 6 : Comparaison graphique des valeurs simulées et prédites pour les caractéristiques globales du peuplement (N,G,V).....	18
Figure 7 : Comparaison des distributions finales simulées et observées pour Lanslebourg, après 60 années de croissance.....	20
Figure 8 : Comparaison des distributions finales simulées et observées pour Queige, après 50 années de croissance.....	20
Figure 9 : Fonctionnement schématique de l'algorithme d'éclaircie automatique (Courbaud et al. 2010a).....	31
Figure 10 : Exemple de résultats de l'application de l'algorithme d'éclaircie automatique.	31
Figure 11 : Détail de la comparaison des distributions de coupe simulées et observées (partie 1).....	33
Figure 12 : Détail de la comparaison des distributions de coupe simulées et observées (partie 2).....	34
Figure 13 : Architecture de Capsis4 (de Coligny 2005).....	35
Figure 14 : Création d'un nouveau projet sous Capsis4.	36
Figure 15 : Visualisation du peuplement initial sous Capsis4.....	36
Figure 16 : Evolution du peuplement et intervention sous Capsis4.	37
Figure 17 : Reproduction à de la dynamique observée (sur 60 ans) sur une parcelle de suivi et outils permettant de suivre l'évolution des caractéristiques du peuplement au cours du temps.	37

Liste des tableaux

Tableau 1: Synthèse des résultats de validation de l'algorithme d'éclaircie.....	15
Tableau 2 : Seuils définis empiriquement pour l'interprétation des résultats de chaque méthode.	15
Tableau 3 : Prédiction des caractéristiques globales du peuplement (N, G, V)	18
Tableau 4 : Synthèse des résultats obtenus pour les différentes méthodes de comparaison des distributions en diamètre.	19
Tableau 5 : Détail par classe de diamètre des écarts calculés pour les distributions en diamètre des trois parcelles de Lanslebourg.	20
Tableau 6 : Détail par classe de diamètre des écarts calculés pour les distributions en diamètre des trois parcelles de Queige.	21
Tableau 7 : Caractéristiques et variabilité des coupes observées sur le terrain et reproduites lors de la validation de l'algorithme d'éclaircie automatique.	32
Tableau 8 : Détail des résultats de la validation de l'algorithme.	32

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord Benoît Courbaud, mon encadrant de stage au Cemagref de Grenoble, pour la confiance et l'autonomie qu'il m'a accordé tout au long de ce stage. Cela m'a en effet permis d'avoir confiance en ma capacité à gérer un projet de recherche et m'a ainsi conforté dans l'idée de poursuivre mes études par un doctorat, possibilité qui m'est d'ailleurs offerte au Cemagref de Grenoble, dans la continuité de mon stage.

Je remercie ensuite Christine Deleuze, de la direction technique de l'ONF, qui est à l'origine du projet et qui a accepté de continuer l'aventure dans le cadre ma thèse. Je remercie aussi Thierry Sardin, pour sa participation active à la formalisation des règles sylvicoles sous forme d'algorithme de sylviculture.

Je tiens à remercier Thomas Cordonnier, toujours prêt à réfléchir et à discuter du projet, et dont le travail de thèse a permis de récolter les données utilisées dans cette étude.

Je remercie également Andréas Zingg, qui a fourni les données utilisées pour la validation de l'algorithme d'éclaircie automatique.

Je remercie enfin François de Coligny et Samuel Dufour, développeurs de Capsis, qui font un travail remarquable et sont toujours disponible pour répondre aux questions, régler les problèmes et développer de nouveaux outils en fonction des besoins.

Sans oublier les thésards et (nombreux) stagiaires du Cemagref, dont la sympathie et la bonne humeur ont fortement contribué à la bonne ambiance régnant au moment des diverses pauses, repas et autres moments de détente.

I- INTRODUCTION

1. Présentation du Cemagref et de ses missions

Ce stage a été effectué au Cemagref de Grenoble, au sein de l'Unité Ecosystèmes Montagnards (EM), et a été encadré par Benoît Courbaud. Le Cemagref est un organisme de recherche spécialisé en sciences et technologies pour l'environnement. Il regroupe plusieurs thèmes de recherches dont « Systèmes écologiques terrestres : dynamiques, vulnérabilités et ingénierie » (SEDYVIN), auquel est rattaché l'Unité Ecosystèmes Montagnards (EM). Les travaux de cette unité portent sur l'analyse de la dynamique des écosystèmes montagnards et de leur vulnérabilité dans un contexte de changements globaux (climat, usages). Ils visent à proposer des modalités de gestion de ces milieux associant des objectifs de conservation de la biodiversité et des fonctions économiques ou sociales (gestion forestière, gestion pastorale, protection contre les risques naturels, gestion de l'espace, des paysages, des territoires).

2. Contexte, enjeux et état de l'art

2.1 Evolution du monde forestier et renforcement des attentes vis-à-vis de la gestion durable et multifonctionnelle des forêts

Le monde forestier connaît une profonde évolution depuis la fin du XXème siècle, avec l'apparition de nouvelles attentes sociétales vis-à-vis de la forêt, en faveur d'une gestion durable et multifonctionnelle (Goreaud et al. 2005b; Peng 2000; Pretzsch et al. 2008).

En Europe, la forêt a longtemps été gérée pour sa seule fonction de production de bois, avec la recherche du rendement soutenu maximal et une prépondérance des peuplements monospécifiques et équiennes en plaine (Boutefeu 2005; Peterson 2005). Les autres fonctions de la forêt ne faisaient pas l'objet d'une gestion particulière, mis à part en montagne (Brang et al. 2006; Schütz 1997). L'importance du rôle de protection des forêts de montagne contre les risques naturels nécessite en effet une gestion en futaie irrégulière, afin d'assurer une continuité et un renouvellement permanent du couvert.

Plus récemment, la prise de conscience de l'importance de la biodiversité, le mouvement de « retour à la nature », l'attachement aux fonctions paysagères, la problématique du stockage du carbone et le potentiel développement du bois énergie ont souligné l'importance d'une gestion durable de la forêt, pour assurer une utilisation conjointe multifonctionnelle (Boutefeu 2005; Schütz 1997).

2.2 Vers un renouvellement des itinéraires sylvicoles

De nouvelles pratiques de gestion se développent ainsi dans le monde, telles que la « *Continuous Cover Forestry* » (von Gadow et al. 2002), fondée sur le renouvellement continu de la forêt afin d'assurer un rendement soutenu et de favoriser le rôle de protection de la forêt. Elle prône l'hétérogénéité des forêts (forêts mélangées et irrégulières), les récoltes sélectives, la priorité aux espèces localement adaptées et la régénération naturelle.

On retrouve certains de ces fondements dans la Sylviculture Irrégulière, Continue et Proche de la Nature (SICPN), soutenue par l'association Pro Silva (Bastien et de Turckheim 1999; de Turckheim 2005), bien que la démarche soit différente. C'est en effet une sylviculture d'arbre, visant à tirer le meilleur parti de chaque individu du peuplement, tout en s'appuyant sur les dynamiques naturelles pour limiter les coûts (automation biologique).

Une autre démarche, fondée sur des études scientifiques, consiste à s'inspirer des dynamiques de perturbations naturelles pour assurer une gestion durable. Il s'agit de l'aménagement écosystémique ou « *ecosystem management* », qui se développe beaucoup en Amérique du Nord (Bergeron 2000; Bergeron et Harvey 1997). Il se base sur l'hypothèse que la santé et la résilience de l'écosystème est maximale pour un régime de perturbation (anthropique) proche du régime naturel, auquel l'écosystème est adapté (Gauthier et al. 2008).

D'un autre côté, certains gestionnaires s'interrogent sur une éventuelle intensification de la sylviculture, y compris en forêt hétérogène. En effet, le contexte actuel de changements climatiques annoncés, l'importance donnée à la biodiversité et les objectifs d'augmentation de la productivité forestière ont abouti en France à la formulation d'un double objectif de *produire plus tout en préservant mieux la biodiversité* (Grenelle de l'environnement et Assises de la forêt, 2007). Cette combinaison d'objectifs qui peuvent sembler contradictoires constitue un réel défi, que certains gestionnaires envisagent de résoudre en dynamisant la sylviculture. Une intensification permettrait en effet de limiter le capital sur pieds et le vieillissement des peuplements, limitant ainsi la sensibilité à la sécheresse. Il serait alors possible de maintenir les peuplements dans de bonnes conditions sanitaires, malgré des conditions climatiques difficiles, et ainsi de diminuer le risque de pertes économiques liées aux catastrophes naturelles (Legay et al. 2007).

Si ces différents types de gestion peuvent sembler contradictoires, ils s'accordent néanmoins sur le fait qu'il est urgent de mettre au point de nouvelles pratiques sylvicoles. Dans un contexte de changements climatiques annoncés, face aux incertitudes de l'avenir et aux questions posées par l'évolution du monde forestier, le renouvellement des itinéraires sylvicoles apparaît plus que nécessaire et doit passer par l'expérimentation.

2.3 Utiliser les modèles de simulation comme support pour l'expérimentation.

Compte tenu de la longueur des expérimentations en forêt et des difficultés de mise en place et de suivi d'expériences, un nouvel enjeu consiste à utiliser les modèles de simulation comme support pour l'expérimentation (Goreaud et al. 2005b; Peng 2000; Pretzsch et al. 2008), afin d'évaluer et de comparer différentes stratégies de gestion (Andersson et al. 2005; Soderbergh et Ledermann 2003), et ainsi de préparer l'expérimentation de terrain. En forêt irrégulière, ces modèles de simulation doivent combiner au minimum des modèles de croissance, mortalité et régénération, afin de simuler la dynamique forestière à l'échelle de l'individu ou du peuplement. Leur combinaison avec des algorithmes de sylviculture (Soderbergh et Ledermann 2003) permet de tester différents scénarios sylvicoles.

Ainsi, que l'on cherche à analyser des sylvicultures passées, à comparer des scénarios sylvicoles (Andersson et al. 2005; Cordonnier et al. 2008; Courbaud et al. 2001) ou à les

optimiser (Pierrat 2004; Trasobares et Pukkala 2004), les modèles de simulation ont l'avantage de permettre un gain de temps considérable par rapport à l'expérimentation de terrain. Il est ainsi possible d'effectuer des simulations rétrospectives ou prospectives sur de longues durées, en testant plusieurs modalités et en autorisant un grand nombre de répétitions. Les expérimentations de terrain restent toutefois nécessaires dans un second temps et permettent d'évaluer, en conditions réelles, les scénarios jugés intéressants suite aux simulations.

Les variables de sortie analysées dépendent des modèles et des questions posées, bien que les analyses multivariées soient de plus en plus fréquentes, avec la prise de conscience de la multifonctionnalité des forêts. De plus en plus de modèles de simulations comprennent ainsi des modules économiques, nutritifs ou encore de biodiversité (Andersson et al. 2005). On assiste aussi au développement de plateformes de simulation, telles que Capsis4 (de Coligny 2005; de Coligny 2007) ou SIMO (Rasinmaki et al. 2009), capables d'héberger des modèles de simulation très différents, tout en proposant des modules et outils communs.

3. Cadre et objectifs de l'étude

3.1 Projet ONF-Cemagref & missions confiées

Les gestionnaires forestiers, tels que l'Office National des Forêts (ONF), sont donc de plus en plus intéressés par la réalisation d'expériences sylvicoles par simulation. Ce stage s'inscrit ainsi au sein du Projet Simulation d'itinéraires sylvicoles en futaie irrégulière résineuse de la Convention ONF-Cemagref 2009-2010. Ce projet a pour objectif d'évaluer la durabilité de l'intensification de la sylviculture en forêt hétérogène, en couplant expérimentations de terrain et expériences sylvicoles de simulation avec le modèle Samsara2.

Samsara2 est un modèle de dynamique forestière développé depuis plusieurs années par le Cemagref, pour les sapinières-pessières de montagne (Cordonnier et al. 2008; Courbaud 2004; Courbaud et al. 1993; Vieilledent et al. 2010b). Ce modèle individu-centré et spatialement explicite est hébergé par la plateforme Capsis4 (de Coligny 2005; de Coligny 2007), ce qui permet de combiner simulation de la dynamique naturelle et sylviculture (Courbaud et al. 2001; Goreaud et al. 2005b). Sachant que les différents processus ont été calibrés à l'échelle des individus, sur une période courte et un nombre limité de sites, *la dynamique simulée par ce modèle est-elle fiable à l'échelle du peuplement, sur des périodes plus longues et pour d'autres sites ? Quels sont les biais de simulation et comment en tenir compte ? Peut-on s'appuyer sur les résultats des simulations pour guider l'expérimentation et la gestion ?* Avant d'utiliser Samsara2 comme support pour l'expérimentation, il apparaît nécessaire de procéder à son évaluation.

Dans le cadre de ce stage, j'avais donc pour missions (1) d'effectuer le diagnostic des biais de Samsara2, avant de (2) conduire des expériences sylvicoles par analyse de sensibilité. Ce mémoire ne traite que de la première mission, plus finalisée, tandis que la deuxième mission sera poursuivie dans le cadre ma thèse au Cemagref de Grenoble.

3.2 Développement d'une méthode d'évaluation pour le modèle Samsara2

J'ai élaboré une méthode d'évaluation de la capacité de Samsara2 à reproduire la dynamique à moyen terme des peuplements de montagne gérés, afin de détecter les éventuels biais du modèle, de les quantifier et d'essayer d'en déterminer la cause. La comparaison entre dynamique simulée et dynamique observée s'appuie sur des peuplements irréguliers à sapin et épicéa gérés par l'ONF, pour lesquelles on dispose d'inventaires et d'un suivi de la gestion (Cordonnier 2004). Notre critère d'évaluation du modèle est sa capacité à reproduire, après une simulation de 50 à 60 ans, les caractéristiques de parcelles de terrain.

Ces peuplements étant gérés, il est nécessaire de reconstituer la sylviculture irrégulière passée, afin de la reproduire lors des simulations. Une reproduction fine nécessiterait de connaître, pour chaque intervention, la distribution par catégories de diamètre. Or nous ne disposons que d'informations synthétiques pour chaque intervention : le nombre de tiges

exploitées (N) et le volume total correspondant (V).

Dans une première étape, nous avons donc développé et testé un algorithme empirique simple visant à reproduire ces distributions, à partir de la distribution avant coupe et des informations synthétiques caractérisant l'éclaircie (N,V). Dans un second temps, nous comparons les caractéristiques globales des peuplements prédites en fin de simulation avec celles observées sur le terrain : densité (nombre de tiges), volume sur pieds, surface terrière. La distribution en diamètre est également prise en compte dans la comparaison, étant donné l'importance de la structure irrégulière en forêt de montagne, dont le rôle de protection est souvent essentiel.

3.3 Objectifs

Les objectifs de ce mémoire sont donc de :

- 1) Valider l'algorithme empirique d'éclaircie automatique développé dans le cadre de l'évaluation de Samsara2.
- 2) Réaliser le diagnostic des biais du modèle Samsara2, c'est-à-dire :
 - 2.1) Déterminer quelles sont les variables prédites de manière fiable.
 - 2.2) Quantifier les écarts entre variables simulée et observée, afin de tenir compte de ces biais dans les simulations futures.
 - 2.3) Si possible, déterminer l'origine de ces écarts et proposer des solutions pour améliorer les prédictions.

3.4 Hypothèses

Nos hypothèses sont les suivantes :

- 1) Il est possible de reproduire la sylviculture irrégulière grâce à un algorithme empirique simple reproduisant les distributions en diamètre des coupes, à partir de la distribution avant coupe, du nombre de tiges et du volume coupés (convergence de l'algorithme, similarité des répliques et proximité avec les distributions observées).
- 2) Samsara2 est capable de simuler la dynamique forestière à moyen terme, avec une marge d'erreur acceptable, d'ordre de grandeur comparable à celle observée pour les inventaires forestiers.
- 3) La qualité prédictive de Samsara2 dépend du niveau d'extrapolation et donc des parcelles considérées (meilleurs résultats attendus pour les parcelles ayant servi à calibrer le modèle).

Les données, le modèle et l'algorithme utilisés pour l'étude sont tout d'abord présentés, puis les méthodes de comparaison des caractéristiques prédites et observées sont présentées et justifiées. Les résultats présentés concernent dans un premier temps la validation de l'algorithme d'éclaircie automatique, puis le diagnostic des biais de Samsara2. L'importance et l'origine de ces biais sont discutées, ainsi que la méthode utilisée, pour laquelle quelques améliorations sont proposées. Enfin, la conclusion synthétise les idées principales et présente les perspectives de ce travail.

II- MATERIELS ET METHODES

1. Démarche générale

La démarche générale consiste à comparer la dynamique simulée par Samsara2 à la dynamique observée sur des parcelles de suivi, en partant d'un même peuplement initial. On s'intéresse à l'état final, en comparant les caractéristiques du peuplement final simulé à celles du peuplement final observé sur le terrain : densité, volume sur pieds, surface terrière, distribution en diamètre. Une première difficulté réside dans la comparaison des distributions en diamètre et a abouti à une sélection de plusieurs méthodes. Une seconde difficulté consiste à reproduire la sylviculture passée appliquée aux parcelles de suivi, à partir des informations disponibles (N et V). A cette fin, nous avons développé un algorithme empirique d'éclaircie automatique, qui peut être couplé à Samsara2 sous Capsis4, et qui a fait l'objet d'une évaluation avant d'être utilisé pour le diagnostic des biais du modèle.

2. Matériels : données, modèle et algorithme

2.1 *Zone d'étude et données*

La zone d'étude se situe dans les Alpes du Nord (cf. Figure 1) et concerne des sapinière-pessière irrégulières, soit des peuplements hétérogènes (mixtes et irréguliers) à sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) et épicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst.). L'étude s'appuie sur des parcelles de suivi ONF d'une dizaine d'hectares, situées dans les forêts communales de Queige (Beaufortain, Alpes externes) et Lanslebourg (Haute Maurienne, Alpes internes).



Figure 1 : Carte des massifs des Alpes du Nord (Gauquelin et Courbaud 2006) et localisation des sites de Queige et Lanslebourg.

Les données comprennent deux inventaires par parcelle (espèces et dimensions), effectués à cinquante ou soixante ans d'intervalle, ainsi que l'historique des coupes réalisées

entre ces deux inventaires. Les diamètres sont discrétisés en classes de 5cm, centrées (ex. classe 15cm = [12,5cm ; 17,5cm]), et les effectifs par classe sont recensés à partir de la classe 15cm (seuil de pré-comptage). Le premier inventaire a été réalisé en plein en 1921 à Lanslebourg et en 1931 à Queige. Le second est un inventaire statistique, effectué en 1980, qui permet d'estimer les caractéristiques de la parcelle. Les données de gestion sont issues des documents d'aménagement forestiers des deux forêts (Cordonnier 2004), et se présentent sous forme de données synthétiques : nombre de tiges et volume exploités par an.

L'évaluation de la capacité de l'algorithme à reproduire des éclaircies nécessite de connaître à la fois la distribution en diamètre du peuplement « avant coupe » et la distribution en diamètre de la coupe réalisée. Ces informations n'étant pas disponibles dans documents de gestion des parcelles utilisées pour l'évaluation de Samsara2, on utilise un jeu de données indépendant, pour lequel on dispose d'un suivi individuel des arbres. Ces données sont issues d'une placette permanente située en Suisse, dans la forêt de Rougemont, et utilisée par l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). Les inventaires forestiers, effectués avant et après coupe, permettent de reconstituer les distributions en diamètre de douze éclaircies passées, ainsi que les effectifs et volumes exploités. Bien que ces éclaircies concernent le même peuplement, leurs caractéristiques sont très différentes (cf. Annexe 3, tableau 7) et permettent d'évaluer l'algorithme sur différents types d'éclaircie.

2.2 Présentation du modèle Samsara2

Samsara2 est un modèle dépendant des distances, qui simule la dynamique à l'échelle de l'individu, pour les peuplements irréguliers de montagne des Alpes du Nord (cf. Figure 1). Développé depuis plusieurs années par le Cemagref de Grenoble, il a d'abord été calibré pour les pessières - peuplements purs d'épicéa – régulières puis irrégulières (Courbaud 2004; Courbaud et al. 2000; Courbaud et al. 2001; Goreaud et al. 2005a; Goreaud et al. 2005b), et a enfin été étendu aux sapinières-pessières – sapin et épicéa en mélange - (Cordonnier 2004; Cordonnier et al. 2008). Il combine des modèles de croissance (Courbaud 1995; Courbaud et al. 1993), mortalité (Vieilledent et al. 2010b; Vieilledent et al. 2009) et régénération (cf. Figure 2). Il comprend aussi un modèle de transmission de la lumière (Courbaud 2000; Courbaud et al. 2003; Vieilledent et al. 2010a), la compétition pour la lumière étant le moteur de la dynamique en futaie irrégulière gérée (Schütz 1997). Samsara2 est hébergé par la plateforme de simulation Capsis4 (de Coligny 2005; de Coligny 2007), qui permet de simuler dynamique forestière et opérations sylvicoles sur le long terme (Courbaud et al. 2001; Goreaud et al. 2005b) (cf. Annexe 4), à partir de peuplements initiaux réels ou virtuels.

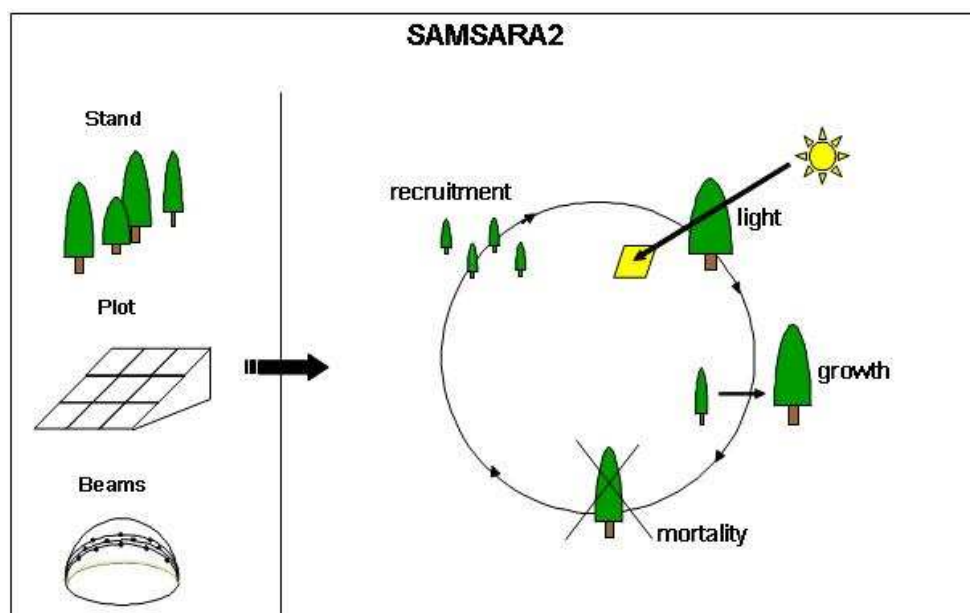


Figure 2 : Fonctionnement du modèle Samsara2 (Courbaud et al. 2010b)

2.3 Développement d'un algorithme empirique d'éclaircie automatique

Un algorithme empirique d'éclaircie automatique a été développé dans le cadre de cette étude, afin de reproduire la sylviculture appliquée aux parcelles de suivi. Une reproduction fine nécessiterait de connaître, pour chaque intervention, la distribution par catégories de diamètre. Or les informations disponibles dans les sommiers (historiques de gestion) des deux forêts sont très synthétiques : seul le nombre de tiges exploitées (N) et le volume total correspondant (V) sont disponibles pour chaque intervention.

Nous avons donc développé un algorithme capable de reconstituer la distribution en diamètre d'une éclaircie à partir de la distribution avant éclaircie, du nombre d'arbres coupés (N) et du volume total (V). L'algorithme sélectionne aléatoirement une liste « à couper » de N arbres dans le peuplement et calcule le volume correspondant V_0 . Il sélectionne ensuite aléatoirement un arbre dans chacune des deux populations d'arbres (« population à couper » et « population restante ») et calcule le nouveau volume V_1 obtenu en cas d'échange des deux arbres. L'échange est effectué si V_1 est plus proche de V que V_0 , donc si l'échange permet de converger vers V. L'opération est répétée i fois, jusqu'à ce que $V_i = V (1 \pm 0,01)$. Les arbres de la liste finale de la « population à couper » sont enfin retirés de la parcelle.

L'algorithme a été intégré dans la plateforme de simulation Capsis4 et peut être couplé à n'importe quel modèle individu-centré pour reproduire, à une date donnée, une coupe aux caractéristiques connues (N, V). Dans cette étude, les interventions passées sont nombreuses mais d'intensité variable et peuvent correspondre à des coupes importantes comme à des récupérations ponctuelles de chablis. Nous avons donc choisi de les regrouper par périodes de dix ans, chaque période comprenant en général une coupe importante et de petites interventions ponctuelles. L'algorithme est exécuté une seule fois par période, à partir de la distribution avant coupe simulée par le modèle et des caractéristiques de la coupe (N, V), et l'intervention est placée à mi-période.

3. Méthodes utilisées

Dans le cadre de l'évaluation de Samsara2 comme pour la validation de l'algorithme, une difficulté consistait à comparer distributions en diamètre simulées et observées, que l'on s'intéresse respectivement à la distribution en fin de simulation ou à la distribution de coupe. La sélection de méthodes adaptées a fait l'objet d'une recherche bibliographique, dont la synthèse est présentée dans l'Annexe 1. Les méthodes retenues sont tout d'abord présentées de façon synthétique, puis leur adaptation et leur utilisation sont précisées pour chacune des parties. L'évaluation de Samsara2 combine à la fois comparaison des distributions en diamètre et comparaison des caractéristiques du peuplement.

3.1 Sélection de méthodes de comparaison de distributions en diamètre

Les méthodes de comparaison de distributions les plus courantes sont celles dites de « Goodness-Of-Fit », utilisées pour comparer une distribution en diamètre donnée à une distribution théorique (cf. Annexe1). Parmi ces méthodes, les plus utilisées sont le test du Khi-deux de Pearson et celui de Kolmogorov-Smirnov (KaDonna et Seaver 2007; Reynolds et al. 1988; Steele et Chaseling 2006).

Dans notre cas, de nombreuses contraintes liées à la nature des données et aux techniques d'échantillonnage limitent le choix de méthodes utilisables (cf. Annexe 1). Les données étant discrétisées par classes de 5cm lors des inventaires, les diamètres réels ne sont pas connus, ce qui nécessite d'utiliser des tests adaptés aux données discrètes. De plus, la puissance de certains tests est réduite par la présence de classes à faible effectif en queue de distribution, ainsi que par celle d'ex-æquo. Le diamètre affecté à chaque arbre est en effet la valeur médiane de sa classe, par exemple 15cm pour la classe 15= [12,5 cm; 17,5 cm]. Si la classe 15 comporte trente arbres, on aura donc trente ex-æquo de 15cm.

Compte tenu de ces contraintes, seul le test du Khi-deux [E1] (Pearson 1900) a été retenu parmi les tests de « Goodness-Of-Fit » classiques. Ce test compare les effectifs prédits et espérés [E3] pour chaque classe de diamètre et calcule une distance totale (χ^2) qui, comparée à un seuil, permet de déterminer si les distributions sont identiques. Ce seuil est de 16,92 dans notre cas, c'est-à-dire pour 9 degrés de liberté (10 classes -1) et un risque $\alpha = 0,05$. Ce test a l'avantage d'être bien adapté aux données discrètes, même s'il est sensible à la définition des classes. Dans notre cas, la discrétisation en classes de 5cm est néanmoins intuitive et communément admise, ce qui limite le problème (Reynolds et al. 1988). De plus, sa sensibilité aux faibles effectifs est limitée par le regroupement des dernières classes de diamètre en une seule classe « $\geq 60\text{cm}$ ». Ce test montre enfin une bonne puissance pour les formes de distributions testées ici (Steele et Chaseling 2006).

Néanmoins, le test du Khi-deux a l'inconvénient de tester l'égalité entre distributions, ce qui peut être trop strict dans le cas de l'évaluation de modèles (Reynolds et al. 1988). Reynolds conseille donc d'utiliser dans ce cas la valeur du χ^2 comme mesure de la distance entre distributions. Il propose aussi une mesure alternative aux tests de « Goodness-Of-Fit », l'indice d'erreur e , qui calcule la somme des différences absolues entre effectifs prédits et observés pour chaque classe de diamètre [E2]. Contrairement au test de Pearson, cet indice s'intéresse aux différences absolues, ce qui évite les compensations entre classes. Nous avons décidé d'utiliser sa version simplifiée (Liu et al. 2009; Zhang et al. 2003), où toutes les classes de diamètre ont le même poids.

Face aux limites rencontrées par les méthodes de « Goodness-Of-Fit » dans des cas similaires au notre, KaDonna et Seaver (2007) proposent une méthode alternative, plus flexible, basée sur la comparaison bootstrap des fonctions de distribution empirique (EDF, Empirical Distribution Function). On échantillonne une distribution dans chacune des deux populations comparées et les EDF des deux échantillons sont comparées à différents quantiles. A chaque quantile, on calcule la différence entre les mesures (ici le diamètre) prédite et observée, et on obtient donc une distribution de la différence entre les deux échantillons. En répétant R_b ($R_b=5000$) fois ces opérations (méthode *bootstrap*), on obtient la distribution de la différence entre les deux populations, estimée par la moyenne et l'intervalle de confiance à 95% de la différence entre les échantillons, pour chaque quantile. Deux distributions sont considérées comme identiques si les intervalles de confiances de toutes les différences entre quantile prédit et observé contiennent zéro (cf. Figure 5, graphiques a et b).

Khi-deux de Pearson (1900)

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - E_i)^2}{E_i} \quad [E1]$$

Indice d'erreur e

Proposé par Reynolds (1988)

Simplifié par Zhang (2003)

$$e = \sum_{i=1}^n |P_i - E_i| \quad [E2]$$

Légende

n_p , effectif total prédit

n_o , effectif total observé

Pour chaque classe de $\emptyset i$:

P_i , effectif prédit (simulé)

O_i , effectif observé

E_i , effectif espéré* (= observé si $n_p=n_o$)

*Permet d'évaluer la prédiction de la distribution en classes indépendamment de celle de l'effectif total.

$$E_i = \frac{O_i}{n_o} \times n_p \quad [E3]$$

3.2 Validation de l'algorithme d'éclaircie automatique

Pour chaque intervention, l'algorithme est appliqué au peuplement avant éclaircie, avec pour paramètres le nombre de tiges et le volume exploités. On obtient ainsi une distribution « simulée » de la coupe. En répétant l'opération un grand nombre de fois ($R_a=5000$), on obtient une « distribution simulée moyenne » et un intervalle de confiance à

95% (cf. Figure 3). Cet intervalle de confiance constitue une enveloppe contenant 95% des simulations et permet ainsi de visualiser la variabilité des distributions de coupe simulées.

Pour chacune des douze interventions reproduites, les méthodes de comparaison sélectionnées ci-dessus permettent de comparer chaque distribution simulée à la distribution observée, en testant l'hypothèse nulle (H_0) de l'égalité des distributions. On a donc deux niveaux de validation:

- un premier niveau avec les 12 interventions reproduites, afin de tester la validité de l'algorithme pour différentes caractéristiques de coupes.
- un second niveau avec les Ra (=5000) répétitions de l'algorithme par intervention reproduite, qui permettent d'estimer une distance moyenne entre les distributions prédites (simulées) et la distribution observée.

L'application stricte du test du Khi-deux de Pearson (1900) permet de déterminer, pour chacune des Ra répétitions, si la distribution simulée est identique à la distribution observée. L'ensemble des Ra comparaisons permet donc d'obtenir le pourcentage de distributions simulées identiques à la distribution observée, pour chaque intervention (cf. Tableau 1). De même, la distance entre distributions simulée et observée est estimée, pour chaque répétition, par le calcul du χ^2 (Pearson 1900) et de l'indice d'erreur e (Reynolds et al. 1988). On obtient donc deux mesures de la distance moyenne pour chaque intervention, calculées grâce aux Ra répétitions.

Au contraire, la méthode de KaDonna et Seaver (2007) n'est pas appliquée à chaque répétition mais une seule fois par intervention, en considérant que les Ra (=5000) répétitions remplacent l'échantillonnage *bootstrap* (5000 échantillons). En effet, l'intérêt de l'échantillonnage *bootstrap* étant d'estimer la variabilité des distributions, nous avons choisi d'adapter la méthode en considérant que la variabilité de la distribution simulée est déjà estimée par les Ra répétitions de l'algorithme. De plus, on ne cherche pas à estimer la variabilité de la distribution observée, celle-ci étant considérée comme la distribution de référence, qu'on veut reproduire grâce à l'algorithme. La distribution de la différence entre les distributions est donc établie, pour chaque intervention, à partir des Ra distributions simulées et de la distribution observée. On considère que les coupes simulées et observée ont une distribution identique si zéro (traduisant une différence nulle) est compris dans tous les intervalles de confiance de la différence entre quantiles prédits et observés.

3.3 Diagnostic des biais de Samsara2

La capacité de Samsara2 à reproduire la dynamique en sapinière-pressière gérée est évaluée à moyen terme (après 50 ou 60 ans de simulation), pour six parcelles de suivi. On s'intéresse à l'état final de chaque parcelle, en comparant les caractéristiques prédites pour le peuplement simulé à celles observées sur le terrain : densité (N), volume (V), surface terrière (G), distributions en diamètre.

Pour chaque parcelle, la dynamique est simulée à partir d'une placette initiale de 1 ha, recrée sous Samsara2 à partir de la distribution en diamètre (par hectare) de la parcelle originale (de 10 ha). Aucune information spatiale n'étant disponible dans l'inventaire initial, on affecte des coordonnées aléatoires aux arbres. La placette est toutefois considérée comme représentative de la parcelle originale.

La dynamique de chaque placette est simulée (sous Samsara2) par succession de séquences de croissance (de 10 ans), entrecoupées par l'exécution de l'algorithme d'éclaircie automatique, qui reproduit la sylviculture appliquée à la parcelle pendant chaque période (nombre de tiges et volume prélevés). Cette succession d'étapes est sauvegardée dans Capsis4 sous forme d'une « automation » (propre à chaque placette), ce qui permet de relancer directement la séquence et facilite les répétitions. Le temps de simulation étant relativement long (20 à 30 minutes par simulation), le nombre de répétitions pour chaque placette sera limité à Rs=30.

Les caractéristiques observées ne sont pas les caractéristiques réelles de la parcelle, mais une estimation par inventaire statistique, réalisé sur 10 à 20 placeaux de 5 ares. Toutefois, on considère que les caractéristiques moyennes, obtenues sur l'ensemble des placeaux, sont représentatives de la parcelle et on compare donc, pour chaque simulation, les caractéristiques simulées aux caractéristiques moyennes observées. L'incertitude sur ces valeurs moyennes observées est toutefois prise en compte et estimée par l'erreur type de la moyenne (*SE, standard error of the mean*). Pour chaque placette, l'ensemble des Rs simulations permettent de calculer les écarts moyens entre prédictions et observations.

Erreur type de la moyenne :

(*SE, standard error of the mean*)

σ , écart-type (*standard deviation*)

n, taille de l'échantillon (nombre de placeaux)

$$SE \bar{x} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad [E4]$$

Contrairement aux parcelles de Lanslebourg, les trois parcelles de Queige ont participé à la calibration de Samsara2, mais sur une période et une durée différente (données de 1982 à 2002). Samsara2 devrait donc correctement simuler la dynamique de ces trois parcelles, bien qu'on l'évalue en extrapolation temporelle. Les parcelles de Lanslebourg permettent donc d'évaluer Samsara2 en extrapolation spatiale et temporelle.

L'évaluation repose donc aussi sur deux niveaux :

- Le premier, constitué par les 6 parcelles de suivi dont on cherche à reproduire la dynamique, et qui permettent d'évaluer Samsara2 sur des peuplements aux caractéristiques initiales différentes, soumis à des gestions différentes, en extrapolation spatiale et/ou temporelle.
- Le second, constitué par les Rs (=30) répétitions de simulation pour chaque parcelle, permet d'évaluer la variabilité de la dynamique simulée et de calculer la distance entre caractéristiques moyennes prédites et observées.

La prédiction des caractéristiques globales du peuplement, c'est-à-dire le nombre de tiges (N), le volume (V) et la surface terrière (G), est évaluée pour chaque variable [E5, E6]. Pour chaque simulation i , Δ_i [E5] calcule la différence entre la valeur prédite et la valeur moyenne observée, tandis que Δ'_i [E6] indique l'importance relative (en pourcentage de la valeur observée) de cette différence. Les Rs simulations permettent de calculer, pour chaque parcelle, les différences moyennes Δ_m et Δ'_m .

Calcul des différences entre caractéristiques prédite et observée pour N, G et V :

$$\Delta_i = P_i - O \quad [E5]$$

P_i , valeur prédite pour la simulation i
O, valeur moyenne observée

$$\Delta'_i = \frac{P_i - O}{O} \times 100 \quad [E6]$$

En ce qui concerne la comparaison des distributions en diamètre, les Rs répétitions permettent d'obtenir une « distribution simulée moyenne » et un intervalle de confiance à 95% (cf. Figures 7 et 8), qui constitue une enveloppe contenant 95% des simulations et permet ainsi de visualiser la variabilité des distributions simulées. Ces comparaisons graphiques sont complétées par le calcul de $\Delta_m N$ [E5] et de l'erreur type sur l'effectif moyen observé [E4] pour chaque classe de diamètre (cf. Tableaux 5 et 6). Les méthodes sélectionnées ne sont pas appliquées de la même manière que pour la validation de l'algorithme d'éclaircie, mais sont adaptées au diagnostic des biais du modèle.

Ainsi, contrairement à la validation de l'algorithme, le test du Khi-deux n'est pas appliqué de façon stricte ici, étant donné que la validation de Samsara2 repose sur la reproduction d'une dynamique sur le long terme, entrecoupée de plusieurs interventions. Un modèle étant par définition une simplification de la réalité, la probabilité que les distributions finales soient exactement identiques est donc, en toute logique, très faible. Dans ce cas, les

tests de « Goodness-Of-Fit » indiquent que les distributions ne sont pas égales, mais ils permettent toutefois d'obtenir une estimation de la distance entre les distributions, via la valeur de la statistique calculée (Reynolds et al. 1988). On s'intéressera donc uniquement à la distance entre distributions simulée et observée, estimée pour chaque simulation à la fois par le calcul du χ^2 (Pearson 1900) et celui de l'indice d'erreur e (Reynolds et al. 1988), puis moyennée sur les Rs répétitions. Dans l'optique de l'identification et de la quantification des biais de Samsara2, on s'intéresse en plus au détail du calcul du χ^2 et de l'indice d'erreur e , ces deux méthodes étant basées sur le calcul d'une distance pour chaque classe.

La méthode de KaDonna et Seaver (2007) est ici appliquée dans sa version originale, sans adaptation de notre part. En effet, contrairement à la validation de l'algorithme, où la distribution observée était la distribution de référence, la distribution observée ici en fin de simulation est une estimation (par inventaire statistique) de la distribution réelle. On applique donc aussi la méthode d'échantillonnage par *bootstrap* à la distribution observée, comme prévu par la méthode originale. La distribution de la différence entre distributions observée et simulée est donc estimée, pour chacune des Rs répétitions, par comparaison deux à deux des 5000 échantillons de chacune des deux distributions, à différents quantiles. On peut ainsi déterminer si chacune des distributions simulées est identique à la distribution observée et obtenir le pourcentage de distributions identiques, sur l'ensemble des Rs répétitions. Toutefois, l'interprétation stricte des résultats, avec le rejet de l'hypothèse H_0 d'égalité des distributions si zéro est exclu d'au moins un des intervalles de confiance de la différence, ne montre que peu d'intérêt ici. En effet, de même que pour le test du Khi-deux, peu de distributions peuvent être considérées comme identiques. On s'intéresse alors au nombre de différences significatives et à leur localisation dans la distribution.

III- RESULTATS

1. Validation de l'algorithme d'éclaircie automatique

1.1 Détermination de groupes de qualité de reproduction des éclaircies

Distinction de différentes qualités de reproduction de la distribution de coupe.

La comparaison graphique distributions de coupes simulées et observées (cf. Figure 3 ; cf. Annexe 3, Figures 9 et 10) montre que la capacité de l'algorithme à reproduire les distributions d'éclaircie varie entre interventions et que différentes « qualités de reproduction » sont distinguables. Plus de la moitié des interventions semblent bien reproduites, avec une distribution moyenne proche de la distribution observée et un intervalle de confiance à 95% contenant l'intégralité des effectifs observés par classe de diamètre (cf. Figure 3, a et b). Un quart des distributions (1942, 1978 et 1987) présentent un écart « significatif », c'est-à-dire une classe de diamètre pour laquelle l'intervalle de confiance de l'effectif simulé ne comprend pas l'effectif observé (cf. Figure 3, c et d). Enfin, la reproduction des distributions de coupe semble beaucoup moins bonne pour les interventions de 1969 et 1995, avec de nombreux écarts significatifs (cf. Figure 3, e et f).

Identification de ces groupes et détermination de seuils empiriques.

Les résultats obtenus pour les trois méthodes statistiques de comparaison entre distributions prédites et observées permettent de quantifier ces écarts (cf. Tableau 1) et l'application d'une ACP (Analyse en Composantes Principale) a permis de retrouver trois groupes parmi les distributions de coupe, traduisant aussi trois qualités de reproduction par l'algorithme (cf. Figure 4). Des seuils ont ensuite été fixés empiriquement pour chaque méthode (cf. Tableau 2), afin de départager les distributions en trois groupes et de donner une interprétation qualitative aux résultats obtenus. Selon les méthodes, 50 à 75% des interventions sont « bien reproduites », tandis que 16,7 à 33,3 % des reproductions sont qualifiées de « moyennes » et que les « mauvaises reproductions » concernent 8,3 à 25 % des coupes. La synthèse des différentes méthodes aboutit aux mêmes groupes que l'ACP.

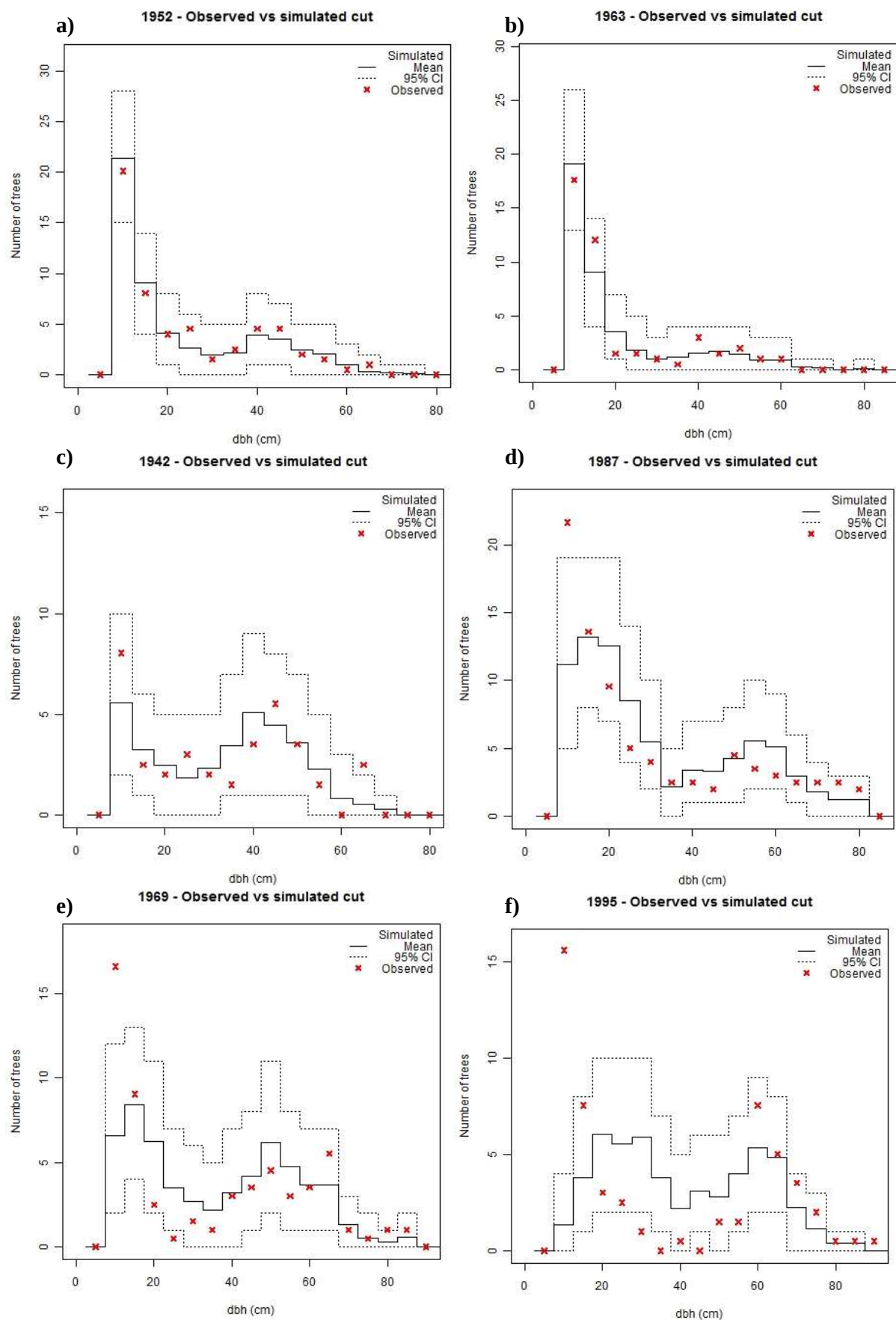


Figure 3 : Comparaison graphique des distributions d'éclaircie prédites et observées.

Les distributions prédites apparaissent sous forme d'un intervalle de confiance à 95%, établi à partir des Ra (=5000) répliques de l'algorithme.

L'intégralité des graphiques est disponible dans l'Annexe 3 (cf. Figures 11 et 12).

Méthode	Comparaison graphique	Khi-deux de Pearson (1900)	Indice d'erreur de Reynolds (1988)	KaDonna & Seaver (2007)	Bilan qualité de la reproduction	
Critère	Ecart significatifs*	% distribution identiques	χ^2 moyen	e moyen	Ecart significatifs**	
1932	0	83	10.8	20.23	0	bonne
1937	0	76.48	11.74	16.81	0	bonne
1942	1	70.62	12.95	19.26	0	bonne
1947	0	70.58	13.13	22.8	0	bonne
1952	0	95.14	8.11	18.2	0	bonne
1957	0	52.02	16.85	22.06	0	bonne
1963	0	63.82	14.75	16.67	0	bonne
1969	2	5.94	45.82	34.55	1	mauvaise
1978	1	33.12	27.48	26.6	0	moyenne
1987	1	43.72	17.91	37.23	1	moyenne
1995	5	0	NA***	49.5	8	mauvaise
2003	0	76.38	13.64	35.13	0	bonne
Total						
% bonnes	58.3	50.0	66.7	58.3	75.0	66.7
% moyennes	25.0	33.3	16.7	16.7	16.7	16.7
% mauvaises	16.7	16.7	16.7	25.0	8.3	16.7

Tableau 1: Synthèse des résultats de validation de l'algorithme d'éclaircie.

* effectif observé exclu de l'intervalle de confiance à 95% de l'effectif prédit pour la classe.

** Zéro exclu de l'intervalle de confiance (de la différence entre distributions) pour au moins un quantile.

***effectifs observés très faibles pour plusieurs classes, entraînant des divisions par 0 [E1].

Méthode	Comparaison graphique	Khi-deux de Pearson (1900)		Indice d'erreur de Reynolds (1988)	KaDonna & Seaver (2007)	
Critère	Nb d'écarts significatifs*	% distributions égales	χ^2 moyen	Indice d'erreur e	Nb d'écarts significatifs**	
Qualité de la reproduction	bonne	0	>67%	<16.9	<25	0
	moyenne	1	67%≥...≥33%	16.9≤...≤33.8	25≤...≤35	1
	mauvaise	>1	<33%	>33.8	>35	>1

Tableau 2 : Seuils définis empiriquement pour l'interprétation des résultats de chaque méthode.

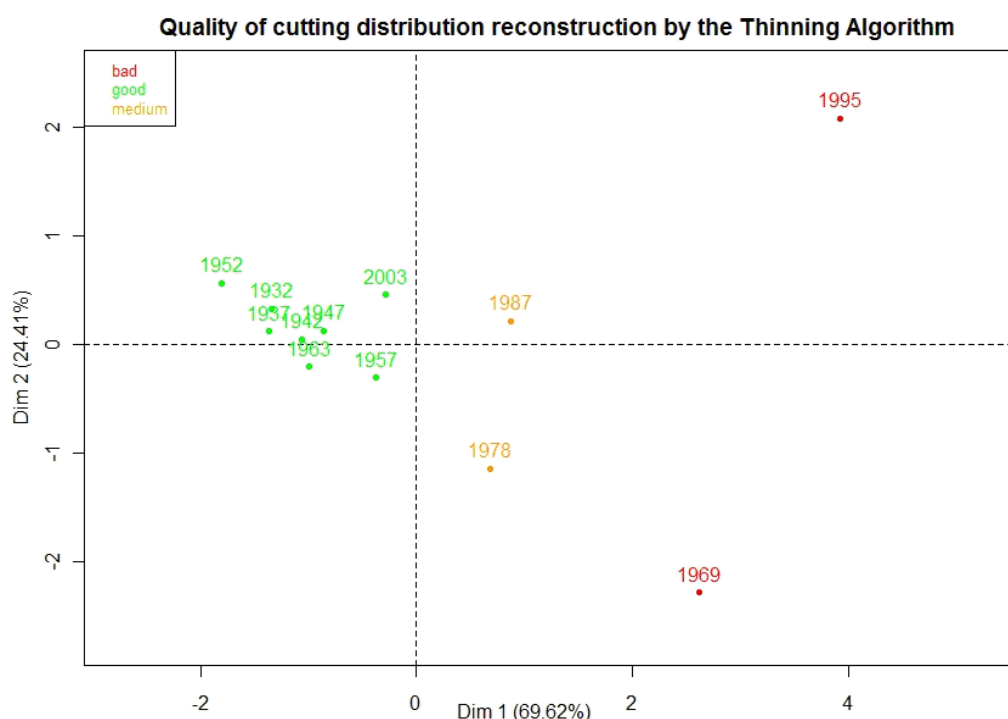


Figure 4 : Qualité de reproduction des éclaircies et identification de groupes par ACP.

Application d'une ACP aux résultats obtenus pour les trois méthodes statistiques (cf. Tableau 1) et distinction de trois groupes de qualité de reproduction de l'éclaircie : bonne, moyenne et mauvaise.

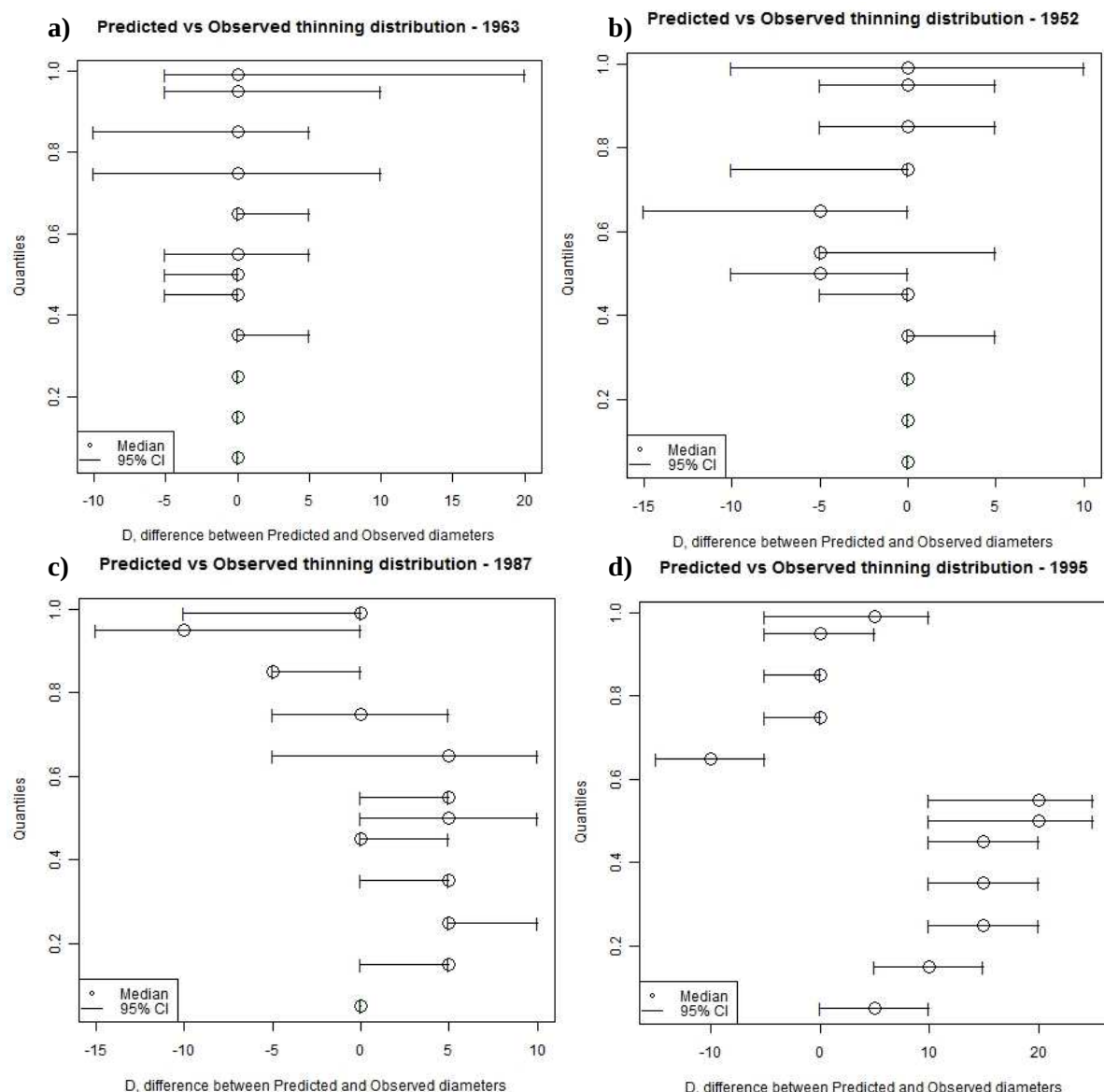


Figure 5 : Différences entre les distributions d'éclaircie prédites et observées, établies selon une méthode adaptée depuis KaDonna et Seaver (2007).

Pour chaque quantile, on calcule la médiane et l'intervalle de confiance à 95% des différences entre les diamètres prédits ($R_a=5000$) et le diamètre observé. L'hypothèse H_0 d'égalité des distributions est rejetée si « zéro » est exclu de l'intervalle de confiance d'au moins un quantiles.

1.2 Performance de l'algorithme d'éclaircie et lien avec la forme de la distribution

La synthèse des résultats montre que la capacité de l'algorithme à reproduire les éclaircies est relativement bonne, avec près des deux tiers des distributions des coupes simulées considérées comme semblables à celles observées (cf. Tableau 1).

La mauvaise reproduction de certaines interventions, notamment celles de 1969 et 1995, semble liée à la forme de la distribution en diamètre de la coupe observée. En effet, l'observation des graphiques de la Figure 3 montre que les distributions simulées (moyenne et intervalle de confiance à 95%) sont plus « lisses » que les distributions observées, surtout quand ces dernières sont très « accidentées ». Les distributions présentant des variations brutales entre classes de diamètre successives et/ou des effectifs exceptionnellement grands ou faibles dans certaines classes sont ainsi moins bien reproduites par l'algorithme. On observe alors un écart significatif pour une classe de diamètre (cf. Figure 3, c et d) ou plus (cf. Figure 3, e et f). La méthode de KaDonna et Seaver (2007) est particulièrement sensible aux différences observées en début de distribution, entraînant un cumul des différences se traduisant par des intervalles de confiance larges et des décalages importants par rapport à zéro (exemple pour l'éclaircie de 1995 : cf. Figure 3, f et Figure 5, d).

Les distributions bimodales « accidentées » sont donc moins bien reproduites par l'algorithme d'éclaircie (cf. Figure 3, c à f), tandis que les distributions de type « J-shape », qui sont peu « accidentées », sont plutôt bien reproduites, à condition que les effectifs des premières classes de diamètre soient inférieurs à 20 tiges (cf. Figure 3, a et b).

2. Diagnostic des biais de Samsara2

2.1 Mise en évidence de biais de prédiction pour les variables globales du peuplement

Samsara2 sous-estime la densité et surestime la surface terrière et le volume.

La densité (N) est légèrement sous-estimée, avec un $\Delta'_m N$ moyen de -12,8% (cf. Tableau 3). On remarque toutefois que les résultats sont meilleurs pour Queige que pour Lanslebourg, avec un biais faible de l'ordre de +/- 5%, tandis que la sous-estimation du nombre de tiges est très importante pour L19, avec $\Delta'_m N = -48\%$. En ce qui concerne la surface terrière (G), Samsara2 donne des prédictions en moyenne supérieures à 17,7% des valeurs observées. L19 est toutefois la seule parcelle pour laquelle on observe une sous-estimation de G ($\Delta'_m N = -16\%$), les autres parcelles présentant des $\Delta'_m N$ allant de +16,2 à +31,7% de la surface terrière observée). Enfin, on observe une importante surestimation du volume (V), avec des $\Delta'_m V$ allant de +17,2 à +68,1%, pour une moyenne de +39,4%. Ainsi, mis à part le cas de L19, les résultats sont cohérents entre eux et montrent qu'on observe une surestimation de G et V, malgré une légère sous-estimation de N.

Des biais de prédiction toutefois comparables aux biais des mesures de terrain.

Pour l'ensemble des variables, la comparaison de Δ_m [E5] avec l'erreur type sur la moyenne observée [E4] montre que les biais de Samsara2 sont du même ordre de grandeur que l'incertitude sur les valeurs observées (cf. Tableau 3). Ils sont même inférieurs dans de nombreux cas, en particulier pour N et G, variables pour lesquelles les comparaisons graphiques (cf. Figure 6) montrent même une juxtaposition des valeurs simulées (*boxplots*) avec les barres d'erreur de la moyenne (à l'exception du nombre de tiges prédit pour L19). L'importance des biais mis en évidence pour ces variables est donc finalement diminuée par l'importance de l'incertitude sur les valeurs observées. On ne peut en dire autant de V, pour lequel la moitié des parcelles présente un biais supérieur à l'erreur type de la moyenne, le volume prédit moyen étant même exclu des barres d'erreur sur le volume moyen observé.

La qualité des prédictions semble identique pour les deux sites.

En effet, bien que les parcelles de Lanslebourg servent à évaluer Samsara2 en extrapolation temporelle et spatiale, les biais de prédiction sont de sens et d'importance semblable pour la plupart des parcelles des deux sites (cf. Tableau 3). On remarque toutefois que les biais sur la prédiction du nombre de tiges sont inférieurs pour Queige, tandis qu'ils sont identiques pour les deux autres variables. La parcelle L19 est néanmoins un cas à part, avec des résultats différents de ceux observés pour les autres parcelles des deux sites. En effet, tandis que L19 présente le biais prédictif le plus élevé pour N, elle présente les biais les plus faibles pour G et V. La forte sous-estimation de N semble ainsi compenser la surestimation de G et V, ce qui réduit artificiellement les biais de prédiction pour ces dernières variables.

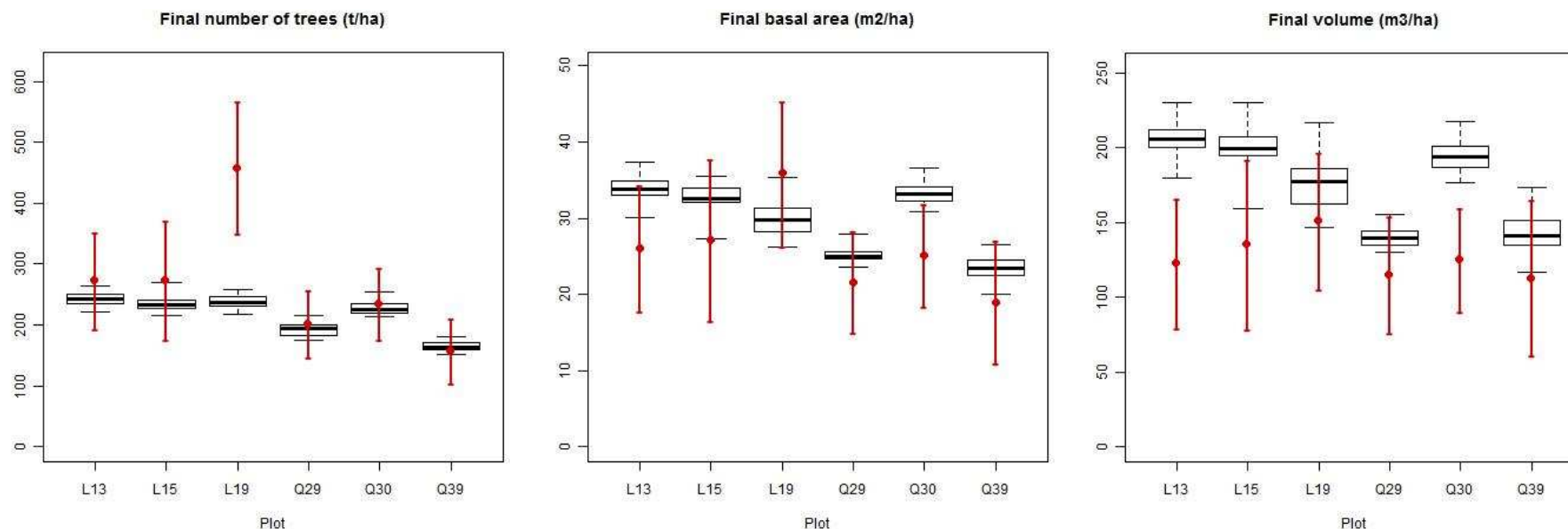
2.2 Prédiction de la distribution en diamètre

Les différences entre distributions simulées et observées sont importantes, avec toutefois de meilleures prédictions pour Queige, notamment pour Q29 et Q39.

Les résultats des mesures du χ^2 [E1] et de l'indice d'erreur e [E2] montrent d'importantes différences entre les distributions finales prédites et observées, avec des valeurs moyennes respectivement de 283,03 et 113,06 (cf. Tableau 4). On remarque que ces mesures varient fortement entre parcelles, notamment pour le χ^2 (écart-type de 68,88), et que la prédiction de la distribution en diamètre est meilleure pour Queige, en particulier pour Q29 et Q39.

Figure 6 : Comparaison graphique des valeurs simulées et prédites pour les caractéristiques globales du peuplement (N,G,V).

Les *boxplots* représentent la distribution des valeurs des caractéristiques simulées pour les différentes parcelles, les valeurs moyennes observées sont symbolisées par des cercles rouges, couplés à des barres d'erreur représentant l'erreur type (SE, *standard error*) de la moyenne [E4].



Plot	Final number of trees (t/ha)								Final basal area (m ² /ha)								Final volume (m ³ /ha)							
	Predicted			Observed		Difference*			Predicted			Observed		Difference*			Predicted			Observed		Difference*		
	mean (P _m)	infL CI	supL CI	mean (O _m)	SE	Δ _m N	Δ _m N (%)		mean (P _m)	infL CI	supL CI	mean (O _m)	SE	Δ _m G	Δ _m G (%)		mean (P _m)	infL CI	supL CI	mean (O _m)	SE	Δ _m V	Δ _m V (%)	
L13	242.0	222.0	258.9	272.9	79.7	-30.9	-11.3		33.9	31.0	37.1	26.1	8.3	7.9	30.2		206.3	183.1	228.1	122.7	43.1	83.5	68.1	
L15	234.5	215.0	260.3	274.0	97.7	-39.5	-14.4		32.7	27.6	34.9	27.1	10.6	5.5	20.3		200.5	161.9	221.9	135.4	56.7	65.1	48.1	
L19	238.3	220.9	258.3	458.2	108.6	-219.9	-48.0		30.1	26.7	34.5	35.8	9.5	-5.7	-16.0		177.0	153.3	209.4	151.1	45.7	25.9	17.2	
Q29	191.8	175.0	208.5	202.1	55.2	-10.3	-5.1		25.2	23.6	27.7	21.6	6.7	3.5	16.2		140.2	130.4	154.8	115.4	39.0	24.9	21.5	
Q30	228.1	214.7	251.1	235.0	59.3	-6.9	-2.9		33.1	30.9	36.0	25.2	6.7	8.0	31.7		194.7	178.4	216.0	125.0	35.0	69.6	55.7	
Q39	165.1	152.0	178.1	156.9	53.7	8.1	5.2		23.5	20.9	26.1	19.0	8.1	4.5	23.9		142.4	123.8	164.3	113.2	51.7	29.2	25.8	
Mean	216.6	199.9	235.9	266.5	75.7	-49.9	-12.8		29.7	26.8	32.7	25.8	8.3	3.9	17.7		176.8	155.1	199.1	127.1	45.2	49.7	39.4	

Tableau 3 : Prédiction des caractéristiques globales du peuplement (N, G, V)

* Différences moyennes, calculées pour chaque parcelle à partir des Rs simulations (cf. [E5] et [E6]).

SE (*standard error*), erreur type sur la moyenne [E4] ; infL CI et supL CI, limites inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 95%.

La méthode de KaDonna et Seaver (2007) montre des résultats similaires, avec seulement 5,6% de distributions prédites considérées comme identiques à la distribution observée (aucune différence significative) et 69,4% de cas où on observe plus de trois différences significatives, ce taux s’approchant de 100% pour Lanslebourg. Les résultats sont toutefois meilleurs pour les parcelles de Queige, et notamment pour Q29 et Q39, pour avec des taux respectifs de 20% et 13,3%. De plus, 16,7% des cas ne présentent qu’une seule différence significative et on observe même 30% de distributions identiques pour Q39.

On observe ainsi d’importants biais de prédiction de la distribution en diamètre, bien que les prédictions soient meilleures pour Queige, en particulier pour Q29 et Q39. Il est dès lors nécessaire de préciser ces biais, en identifiant les classes de diamètre présentant des écarts importants. On s’intéresse donc désormais au détail des calculs du χ^2 , de l’indice d’erreur e et de $\Delta_m N$ (cf. Tableaux 5 et 6), en complément des comparaisons graphiques (cf. Figures 7 et 8).

Parcelle	Nombre de différences significatives observées par la méthode de KaDonna et Seaver (2007) (en % de l'ensemble des répétitions)					Khi-deux de Pearson (1900)		Indice d’erreur de Reynolds et al. (2007)	
	0	1	2	3	>3	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
L13	0.00	0.00	3.33	3.33	93.33	347.95	82.92	132.92	14.18
L15	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	573.42	147.94	155.02	16.54
L19	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	537.99	115.94	134.44	15.24
Q29	3.33	16.67	23.33	36.67	20.00	54.68	15.33	81.58	11.02
Q30	0.00	0.00	0.00	10.00	90.00	134.25	35.05	106.70	11.09
Q39	30.00	16.67	10.00	30.00	13.33	49.90	16.09	67.69	10.05
Moyenne	5.56	5.56	6.11	13.33	69.44	283.03	68.88	113.06	13.02

Tableau 4 : Synthèse des résultats obtenus pour les différentes méthodes de comparaison des distributions en diamètre.

Surestimation des GB et sous-estimation de certains PB et BM pour Lanslebourg et Q30.
 Dans le cas des parcelles L13, L15, L19 et Q30, les principaux écarts sont localisés au niveau des classes de diamètres 25 à 35 cm, ainsi que pour les classes supérieures à 50cm, correspondant à la catégorie des Gros Bois (GB) (cf. Tableaux 5 et 6). On remarque que le calcul du χ^2 donne plus d’importance aux écarts observés pour les GB, les effectifs espérés étant plus faibles pour les classes de diamètre concernées [E1]. De plus, les écarts entre effectifs prédits et observés sont importants (cf. Figures 7 et 8) et supérieurs à l’incertitude sur les observations, tel que le montre la comparaison de $\Delta_m N$ et $SE(O_m)$. On observe donc, pour les trois parcelles de Lanslebourg et Q30, des biais importants traduisant une surestimation des effectifs de Gros Bois, couplée à une sous-estimation pour certaines classes de Petits Bois (PB) et Bois Moyens (BM) (cf. Figures 7 et 8).

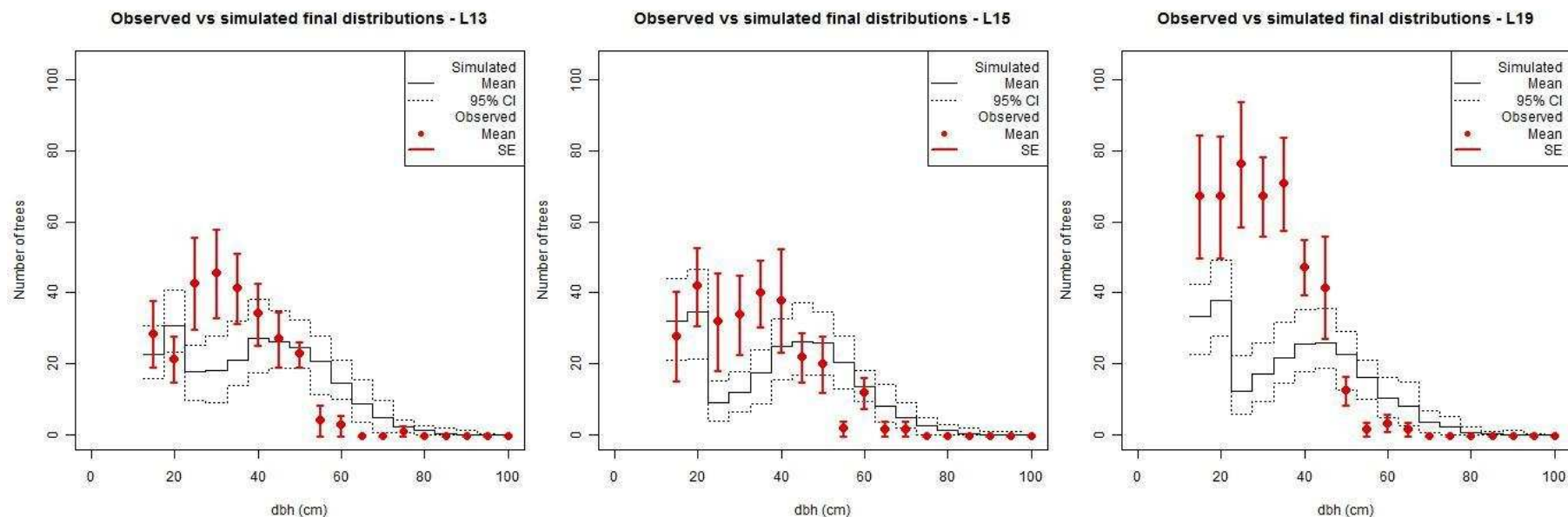
Particularités concernant les écarts observés pour L19.

En ce qui concerne L19, on observe des différences importantes entre effectifs prédits et observés pour les Petits Bois et Bois Moyens, ce qui expliquerait en partie la sous-estimation de l’effectif total, l’importance de ces écarts étant toutefois minimisée dans le cas du χ^2 et de l’indice e . Ceci vient du fait que ces deux indices évaluent la prédiction de la distribution indépendamment de celle de l’effectif total, en fondant les calculs sur les effectifs espérés au lieu des effectifs observés [E3]. L’effectif total étant fortement sous-estimé pour L19 ($\Delta_m N = -48\%$, cf. Tableau 3), les effectifs espérés (par classe) sont deux fois plus faibles que les effectifs observés, et les écarts calculés sont donc plus faibles.

De meilleurs résultats pour Q29 et Q39, avec une bonne prédiction des GB, malgré une sous-estimation des PB et quelques surestimations des effectifs de BM.

Les parcelles Q29 et Q39 présentent des écarts très faibles pour les Gros Bois (cf. Tableau 6), ainsi que pour la majorité des Bois Moyens. On note toutefois une légère surestimation des effectifs pour la classe 25cm de Q29 et les classes 30 et 35 cm de Q39. Au contraire, la sous-estimation des effectifs de Petits Bois n’est pas négligeable, en particulier la classe 15 cm.

Figure 7 : Comparaison des distributions finales simulées et observées pour Lanslebourg, après 60 années de croissance.
(95% CI : intervalle de confiance à 95%, SE : *standard error*, erreur type sur la moyenne [E4])



Size class	DBH class (cm)	PLOT : L13							PLOT : L15							PLOT : L19						
		mean χ^2	SD χ^2	mean e	SD e	$\Delta_m N$	SE(O _m)		mean χ^2	SD χ^2	mean e	SD e	$\Delta_m N$	SE(O _m)		mean χ^2	SD χ^2	mean e	SD e	$\Delta_m N$	SE(O _m)	
Small	15	1.0	1.3	4.0	3.0	-6.0	9.3		2.3	3.2	6.3	4.8	4.0	12.7		1.1	1.1	5.2	3.2	-34.1	17.3	
	20	8.4	6.8	11.8	4.8	9.4	6.4		1.9	2.1	7.6	4.4	-7.5	10.9		1.3	1.7	5.3	4.2	-29.4	17.1	
	25	11.1	4.6	20.1	4.3	-25.0	12.9		16.1	4.4	22.2	3.1	-23.0	13.7		19.6	5.9	27.5	4.8	-64.2	17.6	
Medium	30	13.0	5.3	22.4	5.2	-27.5	12.5		18.8	4.3	26.9	3.2	-21.8	11.2		9.6	4.4	17.8	4.5	-50.1	11.2	
	35	7.0	3.3	15.5	4.1	-20.2	9.9		10.7	4.9	19.5	4.6	-22.3	9.4		6.8	3.7	15.1	4.9	-49.1	13.0	
	40	1.3	1.7	5.0	3.7	-7.0	8.8		1.6	1.9	4.8	3.3	-13.1	14.4		1.1	1.3	4.3	3.0	-21.8	7.8	
	45	0.9	1.3	3.7	2.8	-0.9	7.7		3.9	4.2	7.4	4.8	4.3	7.0		1.8	2.1	5.1	3.7	-15.9	14.4	
Large	50	1.7	1.9	4.7	3.5	1.6	3.5		310.3	124.2	24.1	5.2	6.1	7.9		41.8	21.3	16.0	4.9	9.8	4.1	
	55	81.8	38.4	17.1	4.4	16.6	4.3		8.0	6.4	8.8	4.1	18.5	2.0		260.8	98.9	15.4	3.2	14.5	1.8	
	60+	221.7	74.4	28.6	4.7	28.1	4.3		199.8	78.4	27.4	5.2	15.3	5.8		194.7	86.6	23.0	5.3	20.3	3.9	
Total value		347.9	82.8	132.9	14.2	-30.9	79.7		573.2	147.7	155.0	16.5	-39.5	97.7		538.4	116.1	134.4	15.2	-219.9	108.6	

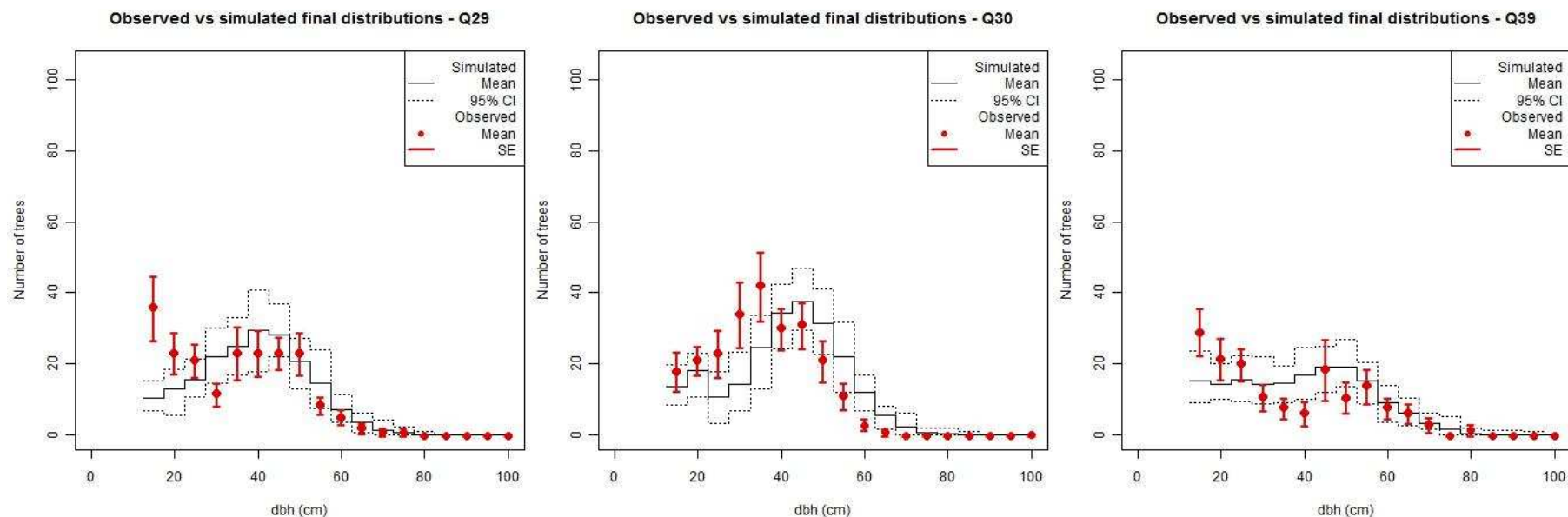
Tableau 5 : Détail par classe de diamètre des écarts calculés pour les distributions en diamètre des trois parcelles de Lanslebourg.

Regroupement des classes de diamètre en catégories de taille : Petits Bois (PB, *Small*), Bois Moyens (BM, *Medium*) et Gros Bois (GB, *Large*).

Le χ^2 de Pearson [E1] et l'indice e de Reynolds [E2] sont fondés sur les effectifs espérés [E3] ; $\Delta_m N$ [E5] et SE(O_m) [E4] concernent les effectifs observés.

Figure 8 : Comparaison des distributions finales simulées et observées pour Queige, après 50 années de croissance.

(95% CI : intervalle de confiance à 95%, SE : *standard error*, erreur type sur la moyenne [E4])



Size class	DBH class (cm)	PLOT : Q29							PLOT : Q30							PLOT : Q39						
		mean χ^2	SD χ^2	mean e	SD e	Δ mN	SE(O _m)	mean χ^2	SD χ^2	mean e	SD e	Δ mN	SE(O _m)	mean χ^2	SD χ^2	mean e	SD e	Δ mN	SE(O _m)			
Small	15	16.5	3.8	23.6	2.9	-25.4	9.0	1.3	1.3	4.1	2.5	-4.2	5.4	8.0	3.1	15.4	3.1	-13.8	6.6			
	20	4.3	3.2	9.0	3.4	-10.2	5.8	0.8	1.3	3.1	2.6	-2.8	4.0	3.5	2.1	8.4	2.9	-7.3	5.8			
	25	1.3	1.1	4.6	2.4	-5.5	4.7	6.6	3.8	11.5	3.6	-12.2	6.5	2.1	1.9	5.9	2.9	-4.6	4.5			
Medium	30	12.9	10.2	11.0	4.6	10.4	3.2	11.0	4.3	18.6	3.7	-19.6	9.2	1.8	2.6	3.5	3.0	3.5	3.7			
	35	1.3	1.6	4.4	3.1	1.8	7.4	7.2	5.1	16.1	6.0	-17.3	9.7	6.3	4.9	6.5	3.0	6.9	2.8			
	40	4.4	4.9	8.2	5.4	6.3	6.5	1.8	2.1	6.0	4.2	4.2	5.9	19.0	13.7	10.3	4.2	10.6	3.5			
	45	2.7	2.8	6.6	4.1	5.1	4.7	2.7	2.9	7.8	4.6	6.5	6.4	0.7	0.8	3.1	1.9	0.6	8.6			
Large	50	0.9	1.4	3.4	2.9	-2.5	6.0	7.3	6.2	11.0	5.3	10.4	5.9	6.6	6.2	7.9	3.4	8.4	4.3			
	55	7.9	8.9	6.8	4.3	6.2	2.3	15.1	12.8	11.3	5.9	11.0	3.7	0.9	1.1	2.9	2.1	1.3	4.7			
	60+	2.5	2.6	4.1	2.4	3.4	3.2	80.5	34.3	17.3	3.7	17.2	2.3	1.1	1.9	3.9	2.6	2.6	4.8			
Total value		54.7	15.3	81.6	11.0	-10.3	55.2	134.2	35.1	106.7	11.1	-6.9	59.3	49.9	16.1	67.7	10.1	8.1	53.7			

Tableau 6 : Détail par classe de diamètre des écarts calculés pour les distributions en diamètre des trois parcelles de Queige.

Regroupement des classes de diamètre en catégories de taille : Petits Bois (PB, *Small*), Bois Moyens (BM, *Medium*) et Gros Bois (GB, *Large*).

Le χ^2 de Pearson [E1] et l'indice e de Reynolds [E2] sont fondés sur les effectifs espérés [E3] ; $\Delta_m N$ [E5] et SE(O_m) [E4] concernent les effectifs observés.

IV- DISCUSSION

1. Biais de Samsara2, fiabilité des prédictions et améliorations possibles.

1.1 Fiabilité des prédictions, importance des biais et surestimation du diamètre.

Des prédictions plutôt fiables pour les variables globales de peuplement.

L'évaluation de Samsara2 a montré l'existence de biais de prédiction des variables globales caractérisant les peuplements. Ces biais sont toutefois d'ordre semblable –voire inférieur- à celui des incertitudes sur les mesures effectuées lors d'inventaires forestiers, pourtant utilisées par les gestionnaires pour estimer les caractéristiques des peuplements et guider les décisions de gestion. De ce fait, la fiabilité des prédictions des variables globales de peuplement semble acceptable, bien qu'il reste nécessaire de tenir compte des biais lors de l'interprétation de résultats de simulation, en particulier pour le volume.

De nombreux biais de prédiction de la distribution en diamètre.

Le diagnostic a montré que les trois parcelles de Lanslebourg et la parcelle Q30 de Queige présentent une importante surestimation des effectifs de Gros Bois, couplée à une sous-estimation des effectifs de Bois Moyens. Bien que les prédictions des effectifs de ces classes soient meilleures pour Q29 et Q39, on observe toutefois une surestimation de certaines classes de Bois Moyens, ainsi qu'une sous-estimation des Petits Bois.

Ces biais mettent en évidence une surestimation du diamètre moyen.

En effet, bien que la densité soit bien prédite pour Queige et légèrement sous-estimée pour Lanslebourg, on observe une surestimation de la surface terrière et du volume. Ces observations semblent ainsi mettre en évidence une surestimation de la section et du volume moyens, donc du diamètre moyen, qui est cohérente avec la surestimation des Gros Bois et la sous-estimation des autres classes observées pour Lanslebourg et Q30. Des vérifications ont par la suite confirmé cette supposition, avec un diamètre moyen prédit supérieur de 17% au diamètre moyen observé, la surestimation étant plus importante à Lanslebourg (+19,4%) qu'à Queige (+14,17%).

1.2 Hypothèse sur l'origine des biais mis en évidence.

Hypothèse concernant la surestimation du diamètre des arbres.

Deux hypothèses sont proposées pour expliquer l'origine des biais mis en évidence pour Lanslebourg et Q30, et qui semblent indiquer une surestimation du diamètre des arbres :

(1) Surestimation de la croissance des arbres.

Lanslebourg n'ayant pas servi à la calibration de Samsara2, il est probable que la surestimation de la croissance soit simplement liée à une productivité réelle plus faible sur les parcelles. On observe néanmoins une surestimation du diamètre à Queige, qui a pourtant servi à calibrer le modèle. Il est toutefois possible que la productivité ait augmenté avec le temps, comme dans le cas des changements de productivité observés dans les hêtraies du nord de la France (Bontemps et al. 2009; Dhôte et al. 2007). La croissance, calibrée sur la période récente (1980-2000), serait alors surestimée sur la période d'évaluation (1931-1981).

(2) Surestimation de la réactivité du peuplement après coupe.

Après une éclaircie, les arbres mettent quelques années à profiter de l'ouverture du couvert, le temps de développer leur houppier. La première version de Samsara possédait ainsi un module de développement du houppier, mais qui n'a pas été retenu pour Samsara2, par soucis de simplification. Samsara2 simule donc une réactivité immédiate des arbres et risque ainsi de surestimer la croissance après éclaircie, d'autant plus lorsque les éclaircies sont de forte intensité, comme c'est le cas à Queige et Lanslebourg, dont la sylviculture passée se caractérise par des « coupes de rattrapage », avec des prélèvements importants mais peu fréquents. Des expériences sylvicoles menées par simulation ont par la suite montré des résultats cohérents avec cette hypothèse, avec une augmentation brutale de la croissance individuelle des arbres dans les cinq années suivant une coupe de forte intensité.

Sous-estimation des Petits Bois et lien avec la régénération.

La sous-estimation des effectifs de PB et BM observée pour L19 est probablement liée à une sous-estimation de la régénération, d'autant plus que celle-ci est très abondante sur le terrain et que le modèle n'a pas été calibré sur Lanslebourg. On observe cependant une sous-estimation des PB pour Q29 et Q39, malgré de bonnes prédictions pour les autres classes. De plus, des expériences d'intensification de la sylviculture, menées par simulation sur le long terme pour Q29, ont montré un important déficit de régénération, qui remet en question la simulation de ce processus. En effet, seule la production de graines interne au peuplement est prise en compte, sans apports extérieurs. Une voie possible d'amélioration de Samsara2 serait donc d'autoriser un apport extérieur, sous forme de pluie de graines, comme c'était le cas dans la première version de Samsara.

1.3 Qualité des prédictions, influence des changements d'échelles et des extrapolations.

L'évaluation de Samsara2 a ainsi montré de nombreux biais, qu'il faut toutefois relativiser en tenant compte des différents changements d'échelle opérés. Samsara2 est en effet évalué sur sa capacité à prédire les caractéristiques globales du peuplement alors que les différents processus modélisés ont été calibrés à l'échelle des individus (Courbaud 2004). De plus, alors que ces processus ont été calibrés sur une période courte et récente, on évalue Samsara2 sur une période beaucoup plus longue et différente de celle de calibration.

Le fait que les biais de prédiction de la distribution en diamètre soient plus importants pour Lanslebourg que pour Queige est cohérent avec l'hypothèse selon laquelle la qualité des prédictions dépend du niveau d'extrapolation. Au contraire, il est intéressant de souligner que, mise à part une prédiction de la densité légèrement meilleure pour Queige, les biais de prédiction des variables globales sont d'ordre identique pour les deux sites. La synthèse des deux critères montre cependant que prédictions sont plus fiables pour Queige, qui sera à utiliser en priorité pour les expériences sylvicoles par simulation.

1.4 Evolution des biais dans le temps et durée maximale de simulation.

Le diagnostic qui a été effectué a permis de détecter et de quantifier les biais de Samsara2 sur le moyen terme, pour une période antérieure à 1981, date du dernier inventaire. La nouvelle campagne d'inventaire permettra de poursuivre son évaluation sur une période plus longue et d'étudier l'évolution des biais sur la période récente.

Néanmoins, malgré cette future prolongation de la période d'évaluation, les prédictions ne seront toujours évaluées qu'à moyen terme, tandis que l'intérêt des modèles de simulation est justement de pouvoir tester des scénarios sylvicoles sur le long terme. La question de la durée maximale de simulation permettant de maintenir une certaine fiabilité des prédictions, ou du moins d'en contrôler les biais, reste donc en suspens.

2. Intérêt et améliorations possibles de la méthode d'évaluation de modèle.

2.1 Originalité de la méthode.

L'originalité de la méthode proposée pour l'évaluation de modèles de simulation réside dans l'évaluation combinée de variables globales du peuplement (densité, surface terrière et volume) et de la distribution en diamètre, ainsi que dans la recherche de quantification des biais prédictifs sur le moyen terme.

2.2 Intérêt de combiner plusieurs méthodes de comparaison de distributions en diamètre.

Assurer la bonne détection des biais en associant des approches différentes.

Ces méthodes de comparaison des distributions en diamètre sont fondées sur des approches différentes, présentant chacune leurs avantages et inconvénients (cf. Annexe 1). Ainsi, l'intérêt de la méthode de KaDonna et Seaver (2007) consiste à s'appuyer sur les

fonctions de distributions empiriques et donc à s'affranchir de la discrétisation en classes, qui a une forte influence sur le résultat du χ^2 (Pearson 1900) et de l'indice e (Reynolds 1988). Ces deux dernières méthodes permettent d'identifier aisément les classes de diamètre présentant les écarts les plus importants entre distributions, en décomposant le calcul du χ^2 et de l'indice e par classe de diamètre (cf. Tableaux 5 et 6).

Comparaison des différentes méthodes et évaluation de leurs intérêts respectifs.

L'intérêt de la méthode de KaDonna et Seaver est finalement assez limité dans notre cas, puisque la définition en classes de 5cm est intuitive et communément admise, et constitue d'ailleurs une aide pour l'interprétation des résultats. Elle n'affecte donc pas les résultats du Khi-deux, à condition de grouper les dernières classes de diamètre pour limiter la présence de classes à trop faible effectif. De plus, l'analyse par quantiles n'est pas intuitive et complique l'interprétation des résultats et la localisation des écarts, contrairement au χ^2 et à l'indice e . Enfin, le cumul des écarts donne trop d'importances aux écarts observés en début de distribution (cf. Figure 5, d). Cette méthode de comparaison, qui est la plus complexe à mettre en place, apparaît donc finalement comme celle donnant les résultats les moins informatifs. En ce qui concerne l'indice e de Reynolds, sa version simplifiée (Zhang et al. 2003) n'est pas plus informative que le χ^2 de Pearson. Sa version originale (Reynolds et al. 1988) permettrait au contraire d'affecter un poids aux différentes classes de diamètre, par exemple en fonction de leur valeur marchande, la bonne prédiction des effectifs de Gros Bois pouvant être considérée comme prioritaire. Or le χ^2 donne « naturellement » plus de poids aux écarts observés dans les classes de Gros Bois, qui présentent des effectifs faibles. Ainsi, s'il fallait choisir, je recommanderais la méthode du Khi-deux de Pearson (1900), plus connue, plus riche en information et plus facile d'utilisation.

2.3 Performances de l'algorithme d'éclaircie et améliorations envisageables.

Performance et intérêt de l'algorithme d'éclaircie.

Les résultats de validation de l'algorithme (cf. Tableau 1) ont montré que sa capacité à reproduire la distribution en diamètre des éclaircies est plutôt bonne, bien que dépendant de la forme de la distribution reproduite. Les trois paramètres de l'algorithme, à savoir la distribution avant éclaircie, le nombre de tiges et le volume à couper, sont donc suffisants pour établir la distribution en diamètre du prélèvement. Reconstituer la sylviculture passée appliquée à un peuplement nécessite toutefois de connaître la distribution avant chaque coupe et donc de coupler l'algorithme avec un modèle de dynamique. L'algorithme a ainsi été intégré à la plateforme de simulation Capsis4 et peut être couplé avec tous les modèles individu-centrés qui y sont hébergés.

Diminuer la variabilité liée à la sylviculture en modifiant l'application de l'algorithme

Bien que les distributions de coupe simulées par l'algorithme soient globalement proches des distributions observées, on remarque qu'elles présentent une forte variabilité (cf. Figure 3 ; cf. Annexe 3). Or cette forte variabilité s'ajoute à la variabilité de simulation de la dynamique forestière, sans que ces deux sources de variabilité ne puissent être dissociées lors de l'analyse des résultats de simulation. Une voie d'amélioration du diagnostic des biais des modèles de simulation serait donc de réduire au maximum la variabilité liée à la sylviculture.

A cette fin, on pourrait appliquer une éclaircie dont la distribution correspondrait non pas à l'histogramme de coupe obtenu par une unique exécution de l'algorithme (comme c'est le cas actuellement), mais à l'histogramme moyen obtenu par un grand nombre de répliques de l'algorithme. Ainsi, lors de l'évaluation d'un modèle de simulation sur une parcelle, les distributions de coupe appliquées à une date donnée seraient identiques entre les différentes répétitions de simulation. Cette procédure permettrait de réduire la variabilité liée à la sylviculture et donc d'améliorer la précision du diagnostic des biais du modèle.

Combinaison avec un algorithme de sélection individuelle des arbres à exploiter.

Si l'algorithme développé ici permet de reproduire la distribution en diamètre des éclaircies à partir de variables synthétiques (N et V), il n'effectue cependant aucune sélection

des arbres, qui sont tirés au hasard dans le peuplement. Or de nombreux algorithmes d'éclaircie automatique ont été développés pour les modèles de simulation individu-centrés (Arii et al. 2008; Daume et Robertson 2000; Soderbergh et Ledermann 2003). Ces algorithmes permettent d'effectuer une sélection individuelle des arbres au sein d'un peuplement, en s'appuyant sur la distribution spatiale des arbres, bien qu'ayant des critères de décisions différents. On citera par exemple le détournement systématique des arbres d'avenir, le respect d'une distance minimale entre arbres (« A-value »), l'identification d'arbres élites et d'arbres compétiteurs (Soderbergh et Ledermann 2003), ou encore l'identification de la coupe à un processus spatial contagieux mettant en jeu des probabilités de coupe (Arii et al. 2008). Une seconde amélioration de la reproduction de la sylviculture pourrait donc consister à appliquer, à la suite de l'algorithme reproduisant la distribution en diamètre de l'éclaircie, un second algorithme visant à sélectionner individuellement les arbres à exploiter parmi les effectifs fixés par classe de diamètre, en s'appuyant sur une approche heuristique visant à formaliser la stratégie et le processus de décision des gestionnaires (Daume et Robertson 2000). Une autre possibilité consisterait à combiner deux contraintes dans le même algorithme (Pierrat 2004), la première concernant la distribution en diamètre de la coupe à effectuer, la seconde étant définie par un ordre de priorité pour l'exploitation, établi en fonction des caractéristiques des arbres (ex : diamètre et essence) et de la stratégie choisie (ex : favoriser le maintien d'une essence minoritaire). Néanmoins, développer un nouvel algorithme étant très coûteux en temps, une dernière possibilité consisterait à choisir, parmi les algorithmes existants, celui qui correspond le mieux aux caractéristiques du modèle utilisé et de la sylviculture reproduite. C'est ce que proposent Soderbergh et Ledermann (2003), en présentant et en comparant une sélection d'algorithmes d'éclaircie.

V- CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'utilisation de modèles de simulation comme support pour l'expérimentation nécessite de connaître la fiabilité des prédictions et d'en quantifier les éventuels biais. La méthode d'évaluation proposée ici est applicable à tous les modèles de simulation, son originalité résidant dans l'évaluation combinée de variables globales du peuplement et de la distribution en diamètre. La reproduction de la sylviculture passée, étape délicate lorsque les informations sont limitées à des variables synthétiques (N et V), est rendue possible par le développement d'un algorithme d'éclaircie automatique, intégré sous Capsis4 et compatible avec tous les modèles individu-centrés qui y sont hébergés. Bien que cet algorithme ait été validé, la reproduction de la sylviculture pourrait être améliorée.

L'évaluation de Samsara2 a montré que sa capacité prédictive sur le moyen terme est plutôt bonne, les biais mis en évidence pour la prédiction des variables globales du peuplement étant acceptables compte tenu de l'incertitude sur les valeurs mesurées. La prédiction de la distribution en diamètre est plus délicate, notamment pour Lanslebourg et Q30, et a mis en évidence l'existence de biais dans la simulation des différents processus de la dynamique forestière, qui proviennent en partie de simplifications de certains processus depuis la première version de Samsara, qui mériteraient d'être reconsidérées.

L'utilisation de Samsara2 comme support pour l'expérimentation est toutefois possible, en attendant d'éventuelles modifications du modèle, à condition de se limiter dans un premier temps aux parcelles Q29 et Q39 et de tenir compte, lors de l'interprétation des résultats, des biais mis en évidence par le diagnostic. Le projet d'expériences sylvicoles par simulation, qui a pour objectif de tester les effets de l'intensification de la sylviculture sur la durabilité de la gestion, a ainsi débuté pendant le stage en s'appuyant dans un premier temps sur Q29. Ces expériences, menées par analyse de sensibilité, seront poursuivies dans le cadre de ma thèse au Cemagref de Grenoble, avec comme objectif de définir les conditions assurant une compatibilité entre intensification de la sylviculture et préservation de l'hétérogénéité du peuplement et de la biodiversité. Un objectif plus large consistera à définir des itinéraires sylvicoles permettant d'assurer un compromis production-diversité sur le long terme.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ancelin, P., B. Courbaud et T. Fourcaud 2004. Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands. *Forest ecology and management*:101-121.
- Andersson, M., B. Dahlin et M. Mossberg 2005. The Forest Time Machine - a multi-purpose forest management decision-support system. *Computers and Electronics in Agriculture*. 49:114-128.
- Arii, K., J.P. Caspersen, A.J. Trevor et C.T. Sean 2008. A selection harvesting algorithm for use in spatially explicit individual-based forest simulation models. *Ecological Modelling*. 211:251-266.
- Bastien, Y. et B. de Turckheim 1999. Points de vue sur l'aménagement en futaie irrégulière. *Revue forestière française*. 51:65-86.
- Bergeron, Y. 2000. Species and stand dynamics in the mixed woods of Quebec's southern boreal forest. *Ecology*. 81:1500-1516.
- Bergeron, Y. et B. Harvey 1997. Basing silviculture on natural ecosystem dynamics: An approach applied to the southern boreal mixedwood forest of Quebec. *Forest Ecology and Management*. 92:235-242.
- Bontemps, J.D., J.C. Herve et J.F. Dhôte 2009. Long-Term Changes in Forest Productivity: A Consistent Assessment in Even-Aged Stands. *Forest Science*. 55:549-564.
- Boutefeu, B. 2005. Forest management in France: the search for sustainable management throughout history. *VertigO - La Revue Electronique en Sciences de l'Environnement*. 6:216-223.
- Brang, P., W. Schonenberger, M. Frehner, R. Schwitter, J.J. Thormann et B. Wasser 2006. Management of protection forests in the European Alps: an overview. *In Forest Snow and Landscape Research*. Paul Haupt Verlag, Berne Switzerland, pp. 23-44.
- Cordonnier, T. 2004. Perturbations, diversité et permanences des structures dans les écosystèmes forestiers. *In Sciences forestières*. ENGREF, p. 256.
- Cordonnier, T., B. Courbaud, F. Berger et A. Franc 2008. Permanence of resilience and protection efficiency in mountain Norway spruce forest stands: a simulation study. *Forest Ecology and Management*. 256:8.
- Courbaud, B. 1995. Modélisation de la croissance en forêt irrégulière. Perspectives pour les pessières irrégulières de montagne. *Revue forestière française*:173-182.
- Courbaud, B. 2000. Comparing light interception with stand basal area for predicting tree growth. *Tree physiology*:407-414.
- Courbaud, B. 2004. Intérêt des modèles pour l'ingénierie écologique : exemples à partir du modèle de dynamique des peuplements forestiers SAMSARA. *Ingénieries - E A T*:49-56.
- Courbaud, B., F. De Coligny et T. Cordonnier 2003. Simulating radiation distribution in a heterogeneous Norway spruce forest on a slope. *Agricultural and forest meteorology*:1-18.
- Courbaud, B., F. Goreaud, P. Dreyfus et F. Bonnet 2000. Sylviculture et modèle de croissance dépendant des distances : mise en oeuvre du logiciel CAPSIS 3.0 sur des pessières irrégulières de montagne. *Revue forestière française*. 5:425-440.
- Courbaud, B., F. Goreaud, P. Dreyfus et F. Bonnet 2001. Evaluating thinning strategies using a tree distance dependent growth model: some examples based on the CAPSIS software "uneven-aged spruce forests" module. *Forest ecology and management*:15-28.
- Courbaud, B., F. Houiller et C. Rupe 1993. Un modèle de croissance en hauteur des arbres en pessière pure irrégulière de montagne. *Annales des sciences forestières*. 50:337-351.
- Courbaud, B., V. Lafond, T. Sardin et F. De Coligny 2010a. Algorithmes d'éclaircie en forêt irrégulière : évaluation de modèle et sylviculture. *In 13ème réunion CAQ, Croissance, Amélioration, Qualité des Bois*, Grenoble, 15-16 mars 2010.
- Courbaud, B., V. Lafond, T. Sardin, F. De Coligny et S. Dufour 2010b. Evaluation de modèles et analyse de sensibilité avec Samsara. *In 12ème Journée Capsis*, Montpellier, 22 juin 2010.
- Daume, S. et D. Robertson 2000. A heuristic approach to modelling thinnings. *Silva Fennica*. 34:237-249.
- de Coligny, F. 2005. CAPSIS: Computer-Aided Projection for Strategies in Silviculture, a software platform for forestry modellers. *In Workshop on Information Science for Agriculture and Environment (ISAE)*, Guizhou Normal University, GuiYang, P.R. China.
- de Coligny, F. 2007. Efficient building of forestry modelling software with the Capsis methodology. *In Pma 2006: Second International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications*, Proceedings Eds. T. Fourcaud et X.P. Zhang. Ieee Computer Soc, Los Alamitos, pp. 216-222.
- de Turckheim, B., Bruciamacchie, M. 2005. La futaie irrégulière. Théorie et pratique de la sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature Ed. Edisud. 286 p.
- Dhôte, J.F., J.D. Bontemps, J.C. Herve, D. Rittie et P. Vallet 2007. Long-term changes in productivity in the beech forests of northern France. *RenDez-Vous Techniques*:74-80.
- Gauquelin, X. et B. Courbaud 2006. Guide des sylvicultures de montagne - Alpes du Nord françaises. Cemagref, CRPF Rhône-Alpes, ONF.
- Gauthier, S., M.A. Vaillancourt, A. Leduc, L. De Grandpré, D.D. Kneeshaw, H. Morin, P. Drapeau et Y. Bergeron 2008. Aménagement écosystémique en forêt boréale. Presses de l'Université du Québec. 672 p.

- Goreaud, F., B. Courbaud et F. De Coligny 2005a. How long does the spatial structure of an initial state influence the dynamics of a forest growth model ? A simulation study using the Capsis platform. *In* Proceedings of the Open International Conference on Modeling and Simulation - OICMS 2005, Clermont Ferrand , 13-15 june 2005, pp. 217-230.
- Goreaud, F., F. De Coligny, B. Courbaud, J.F. Dhote, P. Dreyfus et T. Perot 2005b. La modélisation : un outil pour la gestion et l'aménagement en forêt. *Vertigo*. 6:12.
- KaDonna, C.R. et B. Seaver 2007. An Alternative to Traditional Goodness-of-Fit Tests for Discretely Measured Continuous Data *Forest Science*. 53:590-599.
- Legay, M., F. Mortier et P. Mengin-Lecreulx 2007. La gestion forestière face aux changements climatiques : tirons les premiers enseignements. *Rendez-vous techniques de l'ONF*:95-102.
- Little, S.N. 1983. Weibull diameter distributions for mixed stands of western conifers. *Canadian Journal of Forest Research*. 13:85-88.
- Liu, C., J. Beaulieu, G. Prigent et S.Y. Zhang 2009. Applications and comparison of six methods for predicting parameters of the Weibull function in unthinned *Picea glauca* plantations. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 24:67-75.
- Pearson, K. 1900. On the criterion that a given system of deviation from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling. *Philosophical Magazine Series 5*. 50:157-175.
- Peng, C. 2000. Understanding the role of forest simulation models in sustainable forest management. *Environmental Impact Assessment Review*. 20:481-501.
- Peterson, G.D. 2005. Ecological management: control, uncertainty, and understanding. *In* Ecological paradigms lost. Routes of theory change Ed. C.K.B. B. Elsevier Academic Press, pp. 371-395.
- Pettit, A.N. et M.A. Stephens 1977. The Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit statistic with discrete and grouped data. *Technometrics*. 19:205-210.
- Pierrat, J.C. 2004. Local rules optimization in a mixed stand. *Annals of Forest Science*. 61:179-190.
- Pretzsch, H., R. Grote, B. Reineking, T. Rotzer et S. Seifert 2008. Models for forest ecosystem management: A European perspective. *Annals of Botany*. 101:1065-1087.
- Rasinmaki, J., A. Makinen et J. Kalliovirta 2009. SIMO: An adaptable simulation framework for multiscale forest resource data. *Computers and Electronics in Agriculture*. 66:76-84.
- Reynolds, M.R., T.E. Burk et W.C. Huang 1988. Goodness-of-Fit tests and Model Selection Procedures for Diameter Distribution Models *Forest Science*. 34:373-399.
- Schütz, J.P. 1997. *Silviculture 2. Management of irregular and mixed stands. Silviculture 2. La gestion des forêts irrégulières et mélangées*.:xii + 178 pp.
- Soderbergh, I. et T. Ledermann 2003. Algorithms for simulating thinning and harvesting in five European individual-tree growth simulators: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 39:115-140.
- Steele, M. et J. Chaseling 2006. A comparison of the powers of the Chi-square test statistic with the discrete Kolmogorov-Smirnov and Cramér-von Mises test statistics. *In* COMPSTAT Proceedings in Computational Statistics, pp. 615-621.
- Steele, M.C. 2002. The power of categorical goodness-of-fit test statistics. *In* Australian School of Environmental Studies -Faculty of Environmental Sciences. Griffith University, p. 182.
- Trasobares, A. et T. Pukkala 2004. Optimising the management of uneven-aged *Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* Arn. mixed stands in Catalonia, north-east Spain. *Annals of Forest Science*. 61:747-758.
- Vieilledent, G., B. Courbaud, G. Kunstler, J.-F. Dhote et J.S. Clark 2010a. Individual variability in tree allometry determines light resource allocation in forest ecosystems: a hierarchical Bayesian approach. *Oecologia*. 163:759-73.
- Vieilledent, G., B. Courbaud, G. Kunstler et J.F. Dhote 2010b. Mortality of silver fir and Norway Spruce in the Western Alps - a semi-parametric approach combining size-dependent and growth-dependent mortality. *Annals of Forest Science*. 67
- Vieilledent, G., B. Courbaud, G. Kunstler, J.F. Dhôte et J.S. Clark 2009. Biases in the estimation of size-dependent mortality models: advantages of a semiparametric approach. *Canadian Journal of Forest Research*. 39:1430-1443.
- von Gadow, K., J. Nagel et J. Saborowski 2002. Continuous Cover Forestry : Assesment, Analysis, Scenarios. *In* Managing Forest Ecosystems Eds. K. von Gadow, T. Pukkala et M. Tomé. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London. 348 p.
- Zhang, L.J., K.C. Packard et C.M. Liu 2003. A comparison of estimation methods for fitting Weibull and Johnson's S-B distributions to mixed spruce-fir stands in northeastern North America. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*. 33:1340-1347.

ANNEXES

ANNEXE 1 – Recherche de méthodes adaptées pour la comparaison des distributions en diamètre

Les tests dits de « Goodness-Of-Fit » sont les méthodes classiques utilisées pour comparer une distribution en diamètre donnée à une distribution théorique. Cette distribution théorique est en général une loi de distribution telle que la loi de Weibull, qui est couramment utilisée pour ajuster des modèles de distribution en diamètre (Zhang et al. 2003). On cherche alors à déterminer si le jeu de données suit cette loi de probabilité. Dans notre cas, la distribution théorique est en fait la distribution observée sur le terrain, qu'il s'agisse de la distribution de coupe (pour la validation de l'algorithme) ou de la distribution observée lors de l'inventaire final (pour l'évaluation de Samsara2). On veut donc déterminer si la distribution simulée (distribution de coupe ou distribution finale) est identique à la distribution observée sur le terrain.

Le tests de « Goodness-Of-Fit » le plus connu est sans doute le test du Khi-deux [E1] (Pearson 1900), qui compare les effectifs prédits et observés pour chaque classe de diamètre. Il a l'avantage d'être bien adapté aux données discrètes mais est sensible à la définition des classes, qui a une forte influence sur le résultat du test. Néanmoins, dans notre cas, la discrétisation en classes de 5cm soit intuitive et communément admise, et ne pose donc pas de problème (Reynolds et al. 1988). Ce test est aussi sensible aux faibles effectifs, ce qui nécessite parfois un regroupement de plusieurs classes en une. Ce test montre néanmoins une bonne puissance pour les formes de distributions étudiées ici (Steele et Chaseling 2006).

D'autres tests permettent de s'affranchir de la distribution en classes, en se basant sur la comparaison des fonctions de distribution empirique cumulée. Le plus couramment utilisé pour la comparaison de distributions en diamètre est probablement le test de Kolmogorov-Smirnov (Little 1983; Liu et al. 2009), qui recherche la plus grande distance entre les fonctions de répartition empirique cumulée [E7]. Ce test n'est toutefois valable que pour des données continues, et son utilisation avec des données discrètes n'est possible qu'avec une version modifiée (Pettit et Stephens 1977) [E8]. Malgré tout, ce test reste très sensible aux ex-æquo (Steele 2002).

Dans notre cas, de nombreuses contraintes liées à la nature des données et aux techniques d'échantillonnage limitent le choix de méthodes de « Goodness-Of-Fit » utilisables. Les données sont en effet discrétisées par classes de 5cm lors des inventaires et les diamètres réels ne sont pas connus, ce qui nécessite d'utiliser des tests adaptés aux données discrètes et écarte le test de Kolmogorov-Smirnov classique. Le diamètre affecté à chaque arbre est la valeur médiane de sa classe, par exemple 15cm pour la classe 15= [12,5 cm; 17,5 cm]. De fait, si la classe 15 comporte trente arbres, on aura trente arbres de diamètre 15cm, ce qui crée des ex-æquo. Or de nombreux tests sont sensibles aux ex-æquo, notamment celui de Kolmogorov-Smirnov, y compris dans sa version adaptée aux données discrètes (Steele 2002). De plus, les effectifs par classe sont parfois faibles, notamment en queue de distribution, ce qui réduit la puissance du test du Khi-deux (Steele 2002).

Compte tenu de ces contraintes, seul le test du Khi-deux [E1] (Pearson 1900) a été retenu parmi les tests de « Goodness-Of-Fit » classiques. Sa sensibilité aux faibles effectifs est limitée par le regroupement des classes de diamètre élevé en une seule classe « >60cm ».

Néanmoins, ces tests de « Goodness-Of-Fit » ont l'inconvénient de tester l'égalité entre distributions, ce qui peut être trop strict dans le cas de l'évaluation de modèles (Reynolds et al. 1988). Reynolds conseille donc d'utiliser dans ce cas la valeur des statistiques calculées par ces test (par exemple le χ^2 dans le cas du test de Pearson) comme mesure de la distance entre distributions. Il propose ensuite une mesure alternative aux tests de « Goodness-Of-Fit », l'indice d'erreur e , qui calcule la somme des différences absolues entre

effectifs prédits et observés pour chaque classe de diamètre. Contrairement au test de Pearson, cet indice s'intéresse aux différences absolues, ce qui évite les compensations entre classes. La version originale de cet indice prévoit que des poids puissent être affectés à aux différentes classes de diamètre. Il est ainsi possible de donner plus d'importance aux bois de gros diamètre, à plus forte valeur marchande, pour lesquels l'enjeu de prédiction est plus fort. La version utilisée [E2] ici est toutefois celle simplifiée par Zhang *et al.* (2003), qui donne le même poids aux différentes classes, et qui est fréquemment utilisée (Liu et al. 2009; Zhang et al. 2003).

Face aux limites rencontrées par les méthodes de « Goodness-Of-Fit » dans des cas similaires au notre, KaDonna et Seaver (2007) proposent une méthode alternative plus flexible, basée sur la comparaison *bootstrap* des fonctions de distribution empirique (EDF, *Empirical Distributions Function*). On échantillonne une distribution dans chacune des deux populations comparées et les EDF des deux échantillons sont comparées à différents quantiles. Les quantiles sont définis de façon à balayer l'ensemble de la distribution, tout en limitant les répétitions de valeurs. A chaque quantile, on calcule la différence entre les mesures (ici le diamètre) prédite et observée, et on obtient donc une distribution de la différence entre les deux échantillons. En répétant Rb (Rb=5000) fois ces opérations (méthode *bootstrap*), on obtient la distribution de la différence entre les deux populations, estimée par la moyenne et l'intervalle de confiance à 95% de la différence entre les échantillons, pour chaque quantile. L'hypothèse H0 de l'égalité des distributions est rejetée si zéro est exclu de l'intervalle de confiance pour au moins un des quantiles. Deux distributions sont donc considérées comme identiques si les intervalles de confiances de toutes les différences entre quantile prédit et observé contiennent zéro.

Khi-deux de Pearson (1900)

Pour chaque classe de Ø i :
Pi, effectif prédit (simulation)
Ei, effectif espéré*

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - E_i)^2}{E_i} \quad [\text{E1}]$$

Indice d'erreur e

(Reynolds et al. 1988; Zhang et al. 2003)
Pour chaque classe de Ø i :
Pi, effectif prédit (simulé)
Ei, effectif espéré*

$$e = \sum_{i=1}^n |P_i - E_i| \quad [\text{E2}]$$

Kolmogorov-Smirnov

Version classique, pour données continues
F_P et F_E, fonctions de répartition empirique
des distributions Prédites et Espérée*.

$$T_{KS} = \sup_x \left| F_P(x) - F_E(x) \right| \quad [\text{E7}]$$

Version modifiée (Pettit et Stephens 1977),
pour données discrètes

Pour chaque classe de Ø i :
Pi, effectif prédit (simulation)
Ei, effectif espéré*

$$T_{OrdKS} = \max_{1 \leq j \leq k} \left| \sum_{i=1}^j (P_i - E_i) \right| \quad [\text{E8}]$$

* effectif espéré = effectif observé si égalité des effectifs totaux

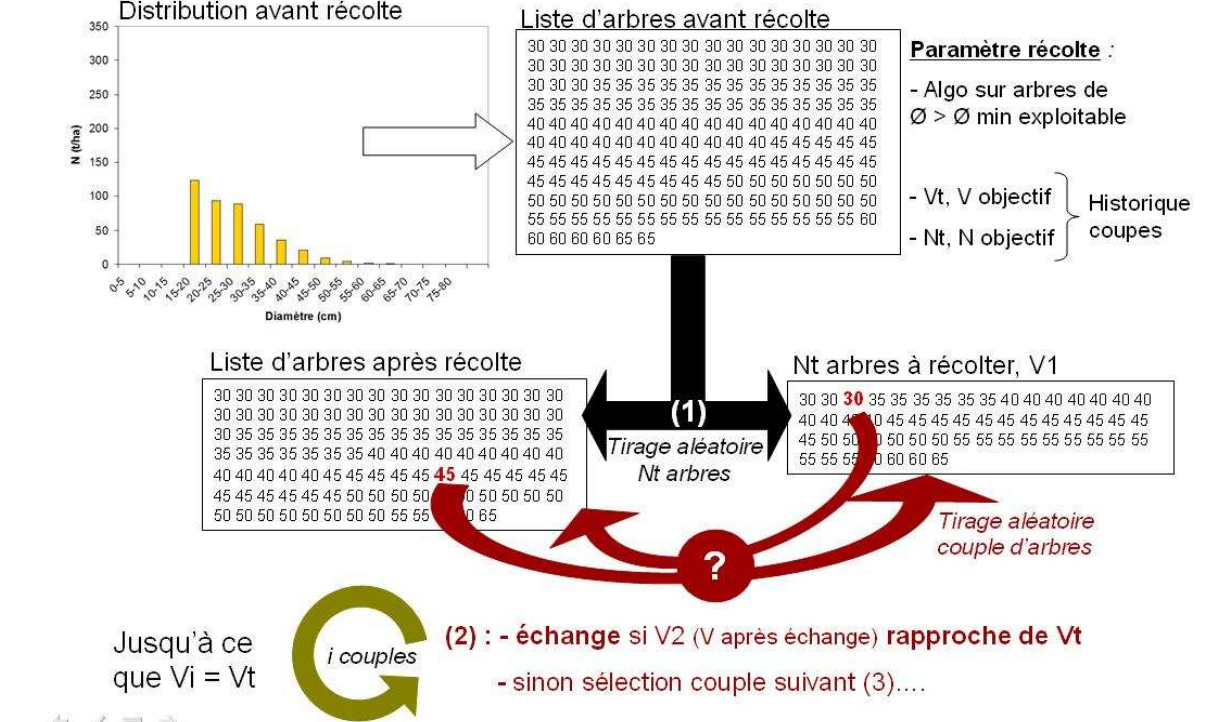


Figure 9 : Fonctionnement schématique de l'algorithme d'éclaircie automatique (Courbaud et al. 2010a)

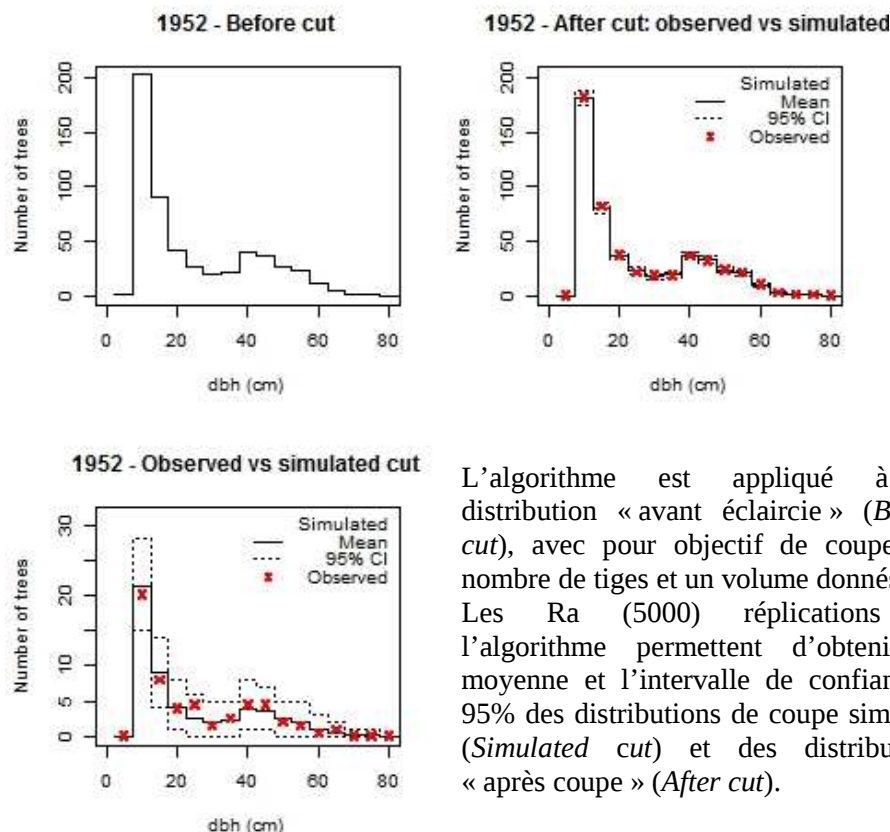


Figure 10 : Exemple de résultats de l'application de l'algorithme d'éclaircie automatique.

ANNEXE 3 – Détail de la validation de l'algorithme

Date de l'intervention	V total (m3/ha)	N total (t/ha)	Effectifs (t/ha) par classe de diamètre (cm)																			
			5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1932	34.05	54.82	0.00	10.56	9.56	8.55	4.02	5.03	3.52	4.02	6.04	2.01	1.01	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1937	34.49	35.21	0.00	5.03	3.52	3.02	3.02	3.02	2.51	2.51	5.53	5.03	1.51	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1942	38.79	35.71	0.00	8.05	2.51	2.01	3.02	2.01	1.51	3.52	5.53	3.52	1.51	0.00	2.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1947	41.30	56.33	0.00	17.10	7.04	2.01	4.53	4.53	4.02	6.04	7.04	0.50	0.50	2.01	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1952	33.91	54.82	0.00	20.12	8.05	4.02	4.53	1.51	2.51	4.53	4.53	2.01	1.51	0.50	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1957	39.48	50.29	0.00	18.61	5.53	5.03	1.01	2.51	1.01	4.53	2.51	4.53	2.51	1.51	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1963	20.29	42.75	0.00	17.60	12.07	1.51	1.51	1.01	0.50	3.02	1.51	2.01	1.01	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1969	83.26	57.84	0.00	16.60	9.05	2.51	0.50	1.51	1.01	3.02	3.52	4.53	3.02	3.52	5.53	1.01	0.50	1.01	1.01	0.00	0.00	0.00
1978	78.99	69.41	0.00	14.59	11.57	9.56	5.03	4.02	2.01	3.52	0.50	4.02	3.52	3.02	4.53	1.51	0.50	1.01	0.00	0.50	0.00	0.00
1987	95.64	81.98	0.00	21.63	13.58	9.56	5.03	4.02	2.51	2.51	2.01	4.53	3.52	3.02	2.51	2.51	2.51	2.01	0.00	0.50	0.00	0.00
1995	91.38	52.81	0.00	15.59	7.54	3.02	2.51	1.01	0.00	0.50	0.00	1.51	1.51	7.54	5.03	3.52	2.01	0.50	0.50	0.50	0.00	0.00
2003	96.70	114.17	3.02	20.12	21.63	12.57	10.56	9.56	9.05	7.04	3.02	4.53	2.51	4.53	2.51	1.01	1.51	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00
Moyenne	57.36	58.85	0.25	15.47	9.30	5.28	3.77	3.31	2.51	3.73	3.48	3.23	1.97	2.31	2.14	0.80	0.59	0.38	0.21	0.13	0.00	0.00
Ecart-type	28.95	21.76	0.87	5.12	5.11	3.76	2.64	2.41	2.38	1.71	2.27	1.53	1.02	2.18	1.99	1.18	0.90	0.65	0.40	0.23	0.00	0.00

Tableau 7 : Caractéristiques et variabilité des coupes observées sur le terrain et reproduites lors de la validation de l'algorithme d'éclaircie automatique.

Intervention	Pearson's Chi-square test (1900)				Reynolds' Error Index (1988)			
	mean X ² statistic	mean p_value	% rejected H0	% equal distributions	mean EI	EI_SD	EI_ClinfL	EI_CIsupL
1932	10.8	0.337722	17	83	20.23	5.09	10.66	30.62
1937	11.74	0.320858	23.52	76.48	16.81	4.07	9.16	25.12
1942	12.95	0.278937	29.38	70.62	19.26	4.15	11.56	27.6
1947	13.13	0.251183	29.42	70.58	22.8	5.04	14.05	33.19
1952	8.11	0.489469	4.86	95.14	18.2	4.46	10.43	27.57
1957	16.85	0.176317	47.98	52.02	22.06	5.46	12.88	34.08
1963	14.75	0.24357	36.18	63.82	16.67	4.52	8.7	26.5
1969	45.82	0.013499	94.06	5.94	34.55	6.12	22.61	46.65
1978	27.48	0.125861	66.88	33.12	26.6	5.67	16.23	38.23
1987	17.91	0.133599	56.28	43.72	37.23	7.75	22.56	53.42
1995	NA	0	100	3.82	49.5	5.69	38.49	60.61
2003	13.64	0.237393	23.62	76.38	35.13	7.23	22.4	50.56

Tableau 8 : Détail des résultats de la validation de l'algorithme.

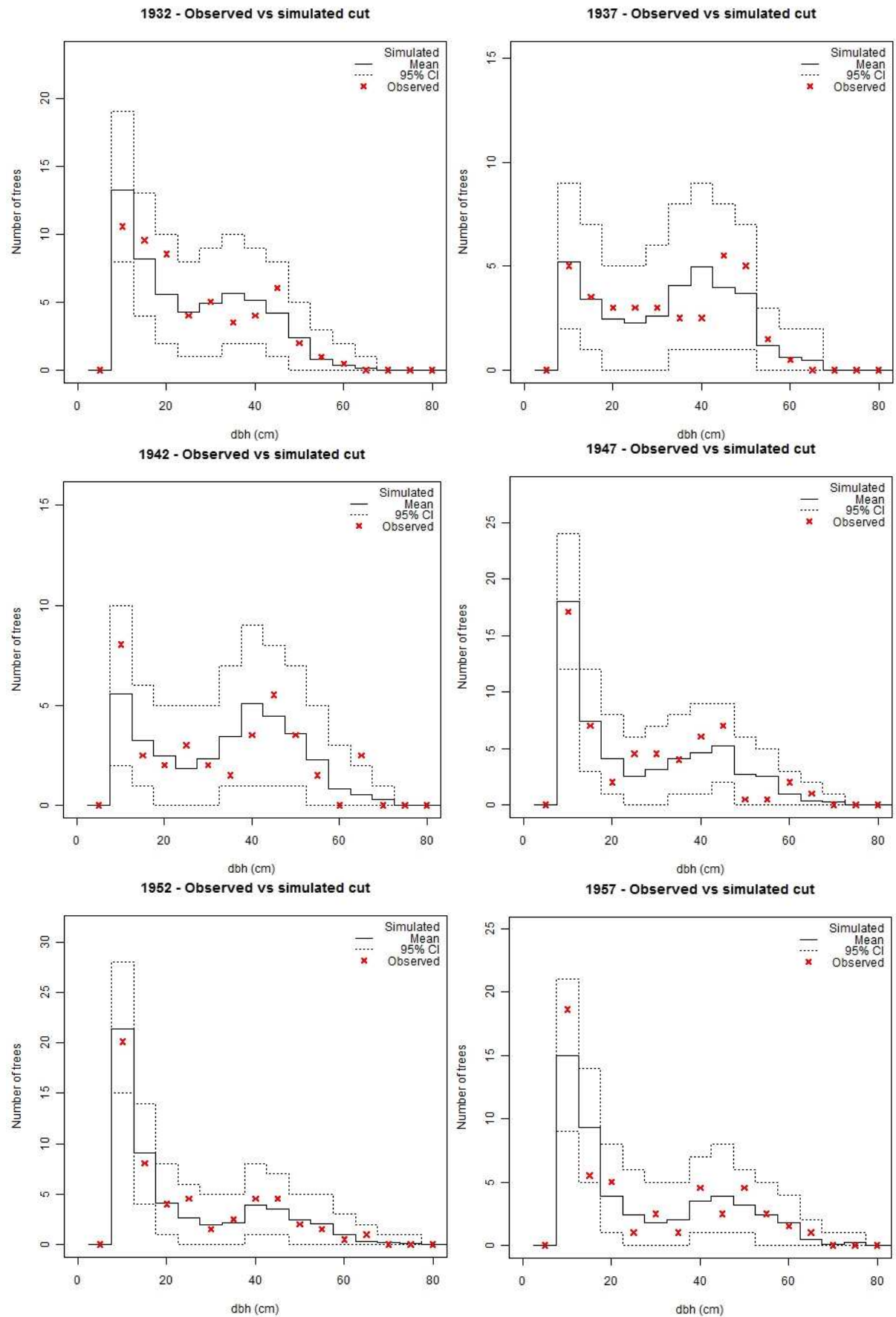


Figure 11 : Détail de la comparaison des distributions de coupe simulées et observées (partie 1)

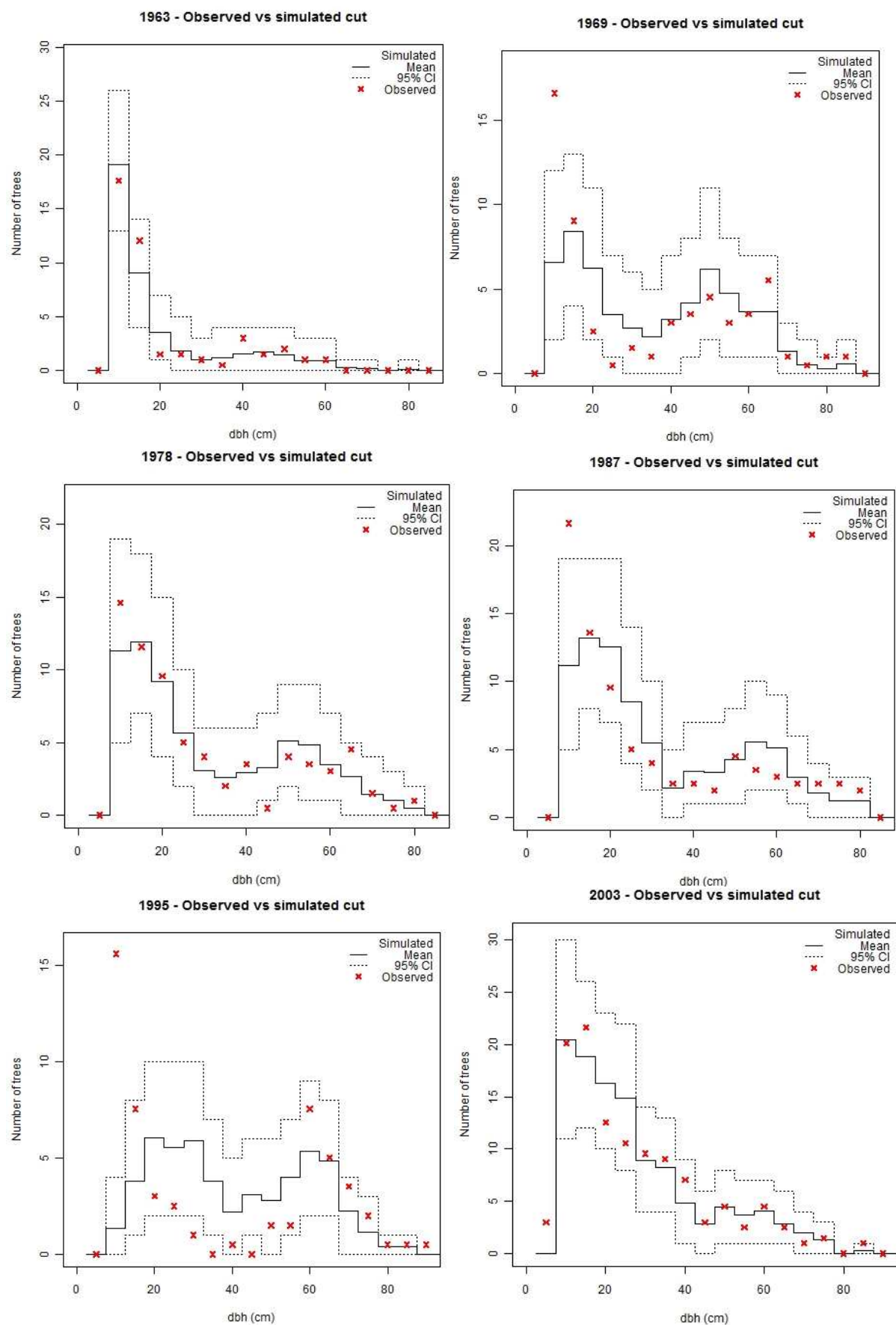


Figure 12 : Détail de la comparaison des distributions de coupe simulées et observées (partie 2)

ANNEXE 4 – Fonctionnement de Capsis4 avec Samsara2

Structure de Capsis4 et positionnement de Samsara2

Capsis4 est une plateforme de simulation capable d'héberger des modèles de simulation aux caractéristiques très différentes, conçus pour des espèces et contextes variés. Cohabitent ainsi modèles dépendants et indépendants des distances, modèles de peuplement et modèles de croissance individuelle, conçus pour des forêts régulières ou irrégulières, pour peuplements mixtes ou purs. Ces modèles de simulation sont intégrés à Capsis4 sous forme de modules, développables et modifiables indépendamment de la structure générique (cf. Figure 13). Chacun de ses modules comporte ses propres modèles de croissance, régénération et mortalité, plus des modèles spécifiques si nécessaire. Samsara2 comporte ainsi un modèle d'interception de la lumière par les houppiers des arbres. Les outils sont développés de manière à être compatibles avec l'ensemble des modèles et sont régulièrement ajoutés, sous forme d'extension, par les développeurs ou modélisateurs, en fonction des besoins. La plateforme est donc générique, interactive et extensible.

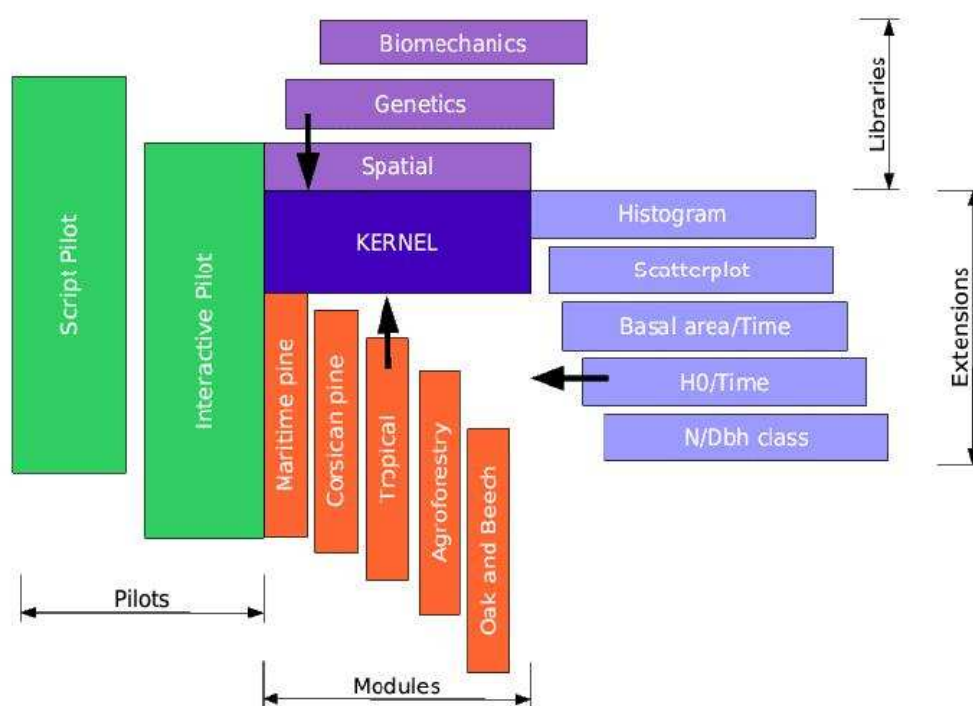


Figure 13 : Architecture de Capsis4 (de Coligny 2005)

Fonctionnement de Capsis4 avec Samsara2

Capsis4 permet de simuler la dynamique forestière à partir d'un modèle de simulation et d'un peuplement initial virtuel (créé sous Capsis4) ou réel (chargé depuis un fichier d'inventaire, (cf. Figures 14 et 15)). Une fois le peuplement chargé, il est possible de simuler la dynamique forestière sur une période définie, grâce à l'option évolution, qui demande de définir le temps de simulation (année cible) et le pas de temps (en général 5 ans). Il est aussi possible d'effectuer une intervention sur le peuplement (cf. Figure 16), qui peut être une éclaircie sélective (plusieurs méthodes et algorithmes possibles) ou une perturbation naturelle, grâce à un couplage avec le modèle FOREOLE (Ancelin et al. 2004). Plusieurs outils permettent de suivre l'évolution des caractéristiques du peuplement au cours du temps (cf. Figure 17).

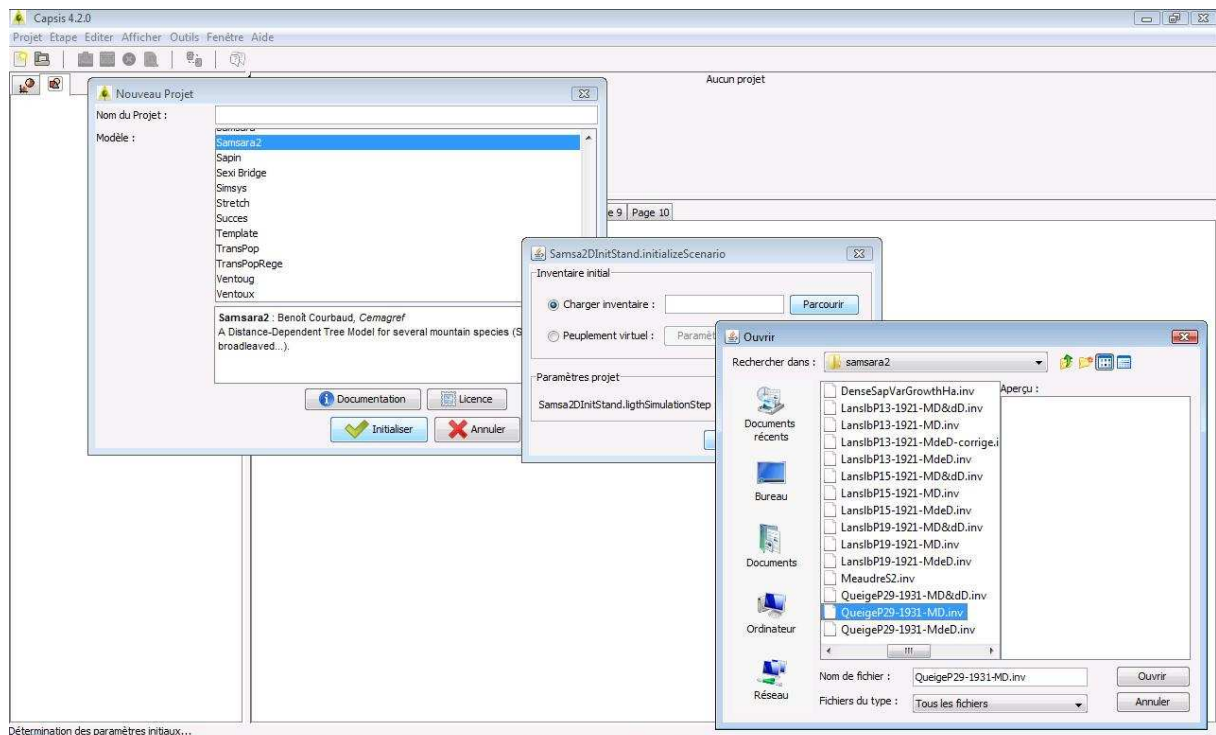


Figure 14 : Création d'un nouveau projet sous Capsis4.
Choix du modèle de simulation et chargement du peuplement initial.

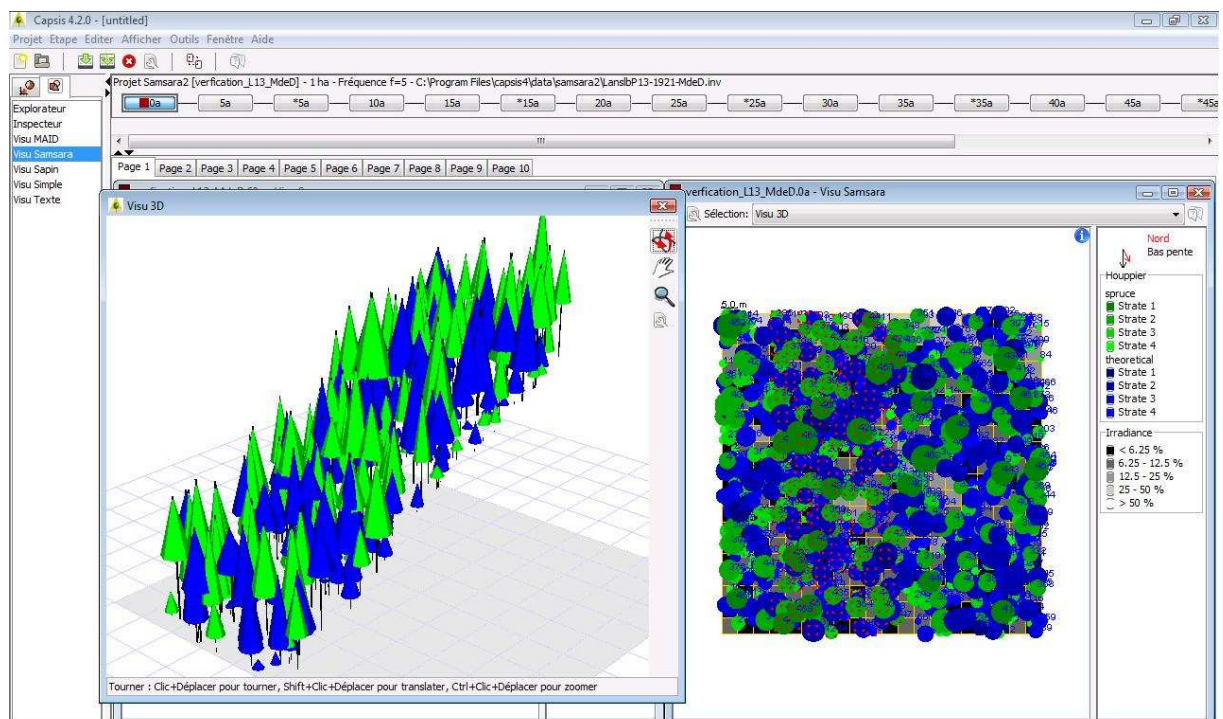


Figure 15 : Visualisation du peuplement initial sous Capsis4.
Vue aérienne et vue 3D. Les épicéas (*spruce*) apparaissent en vert, les sapins (*fir*) en bleu.

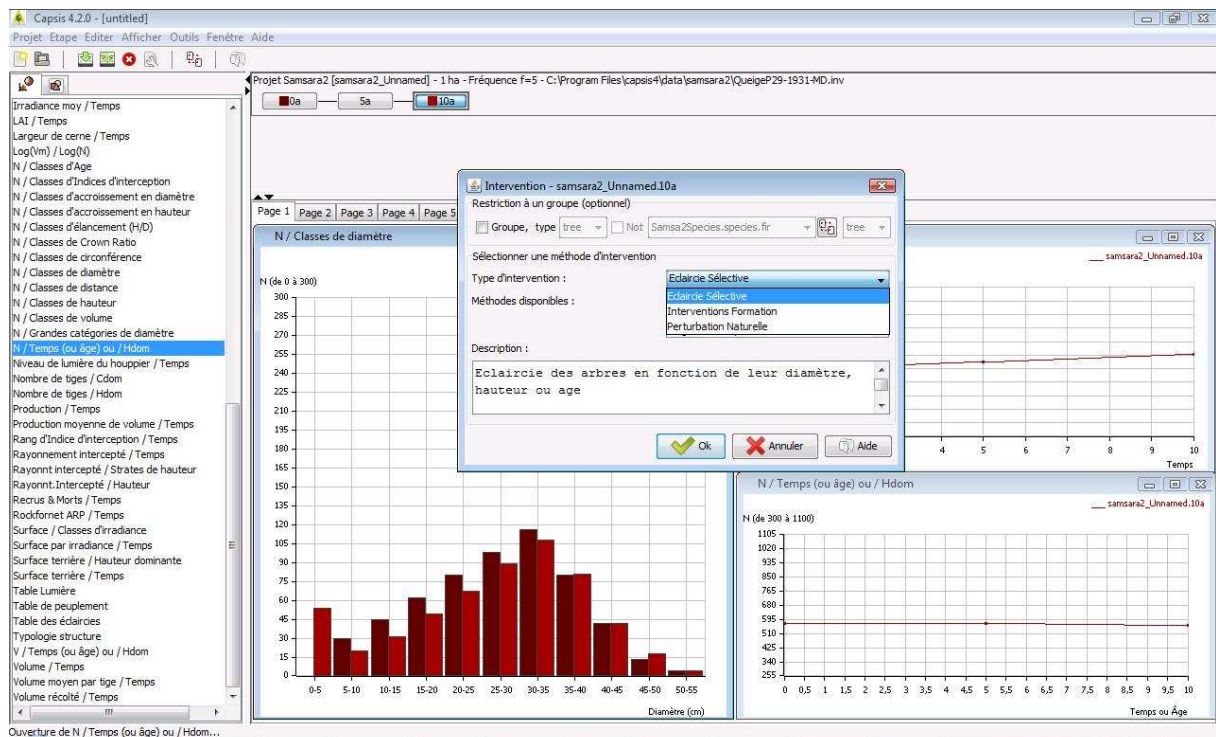


Figure 16 : Evolution du peuplement et intervention sous Capsis4.

La chaîne représente l'évolution du peuplement, chaque brique correspondant à une étape. La dynamique est simulée sur un pas de temps de 5 ans. Il est possible d'observer les caractéristiques du peuplement à chaque étape (Ex : 0a, 5a, 10a...). A partir d'une étape, il est possible de redémarrer une période de simulation (évolution) ou de réaliser une intervention.

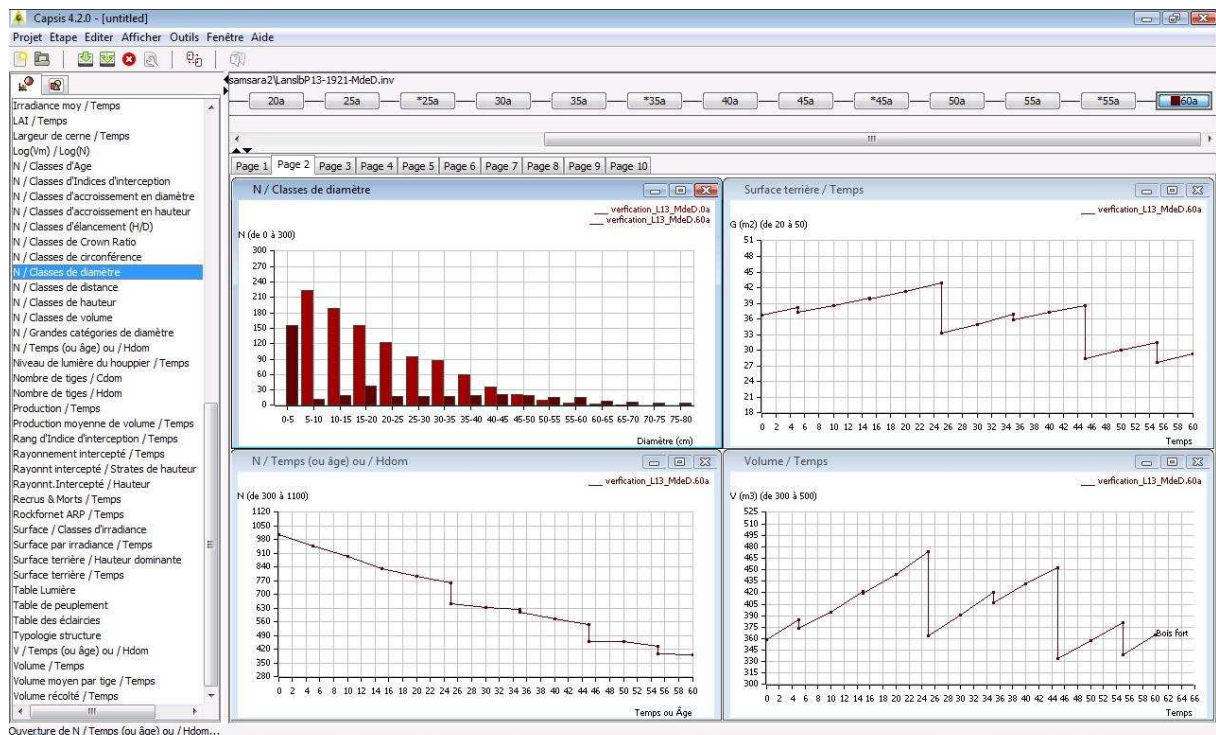


Figure 17 : Reproduction de la dynamique observée (sur 60 ans) sur une parcelle de suivi et outils permettant de suivre l'évolution des caractéristiques du peuplement au cours du temps.

Exemple avec le nombre de tiges par classe de diamètre (en haut à gauche : histogramme initial en rouge clair, histogramme final en rouge sombre), la surface terrière (m²/ha, en haut à droite), la densité (tiges/ha, en bas à gauche) et le volume (m³/ha, en bas à droite).

RESUME

Face à l'évolution du monde forestier, un nouvel enjeu consiste à utiliser les modèles de simulation comme support pour l'expérimentation pour l'évaluation de stratégies de gestion sur le long terme, mais nécessite de connaître la fiabilité de leurs prédictions.

Une méthode d'évaluation est proposée pour les modèles de simulation et appliquée à un modèle de dynamique pour sapinières-pessières irrégulières de montagne, afin d'effectuer le diagnostic de ses biais avant son utilisation comme support pour l'expérimentation.

Le modèle est évalué sur le moyen terme pour deux sites des Alpes, en comparant les caractéristiques prédites aux caractéristiques observées lors d'inventaires. La reproduction de la sylviculture a nécessité le développement d'un algorithme d'éclaircie automatique reproduisant la distribution en diamètre des coupes à partir de leurs caractéristiques synthétiques (nombre de tiges, volume), et qui a été évalué indépendamment.

L'algorithme a été validé et l'évaluation a montré de nombreux biais de prédiction, dont l'importance varie en fonction des variables et des parcelles considérées.

L'utilisation de Samsara2 comme support pour l'expérimentation est possible, à condition d'utiliser certaines parcelles et de tenir compte des biais mis en évidence.