

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

\*\*\*\*\*

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE  
POLYTECHNIQUE

\*\*\*\*\*

DEPARTEMENT DE GENIE  
INFORMATIQUE



UNIVERSITY OF YAOUNDE I

\*\*\*\*\*

NATIONAL ADVANCED SCHOOL  
OF ENGINEERING

\*\*\*\*\*

DEPARTMENT OF COMPUTER  
ENGINEERING

---

UN LOGICIEL DE SIMULATION POUR L'AIDE À LA GESTION  
DES CONCESSIONS FORESTIÈRES : APPLICATION AUX  
FORÊTS DU BASSIN DU CONGO

---

**Mémoire de fin d'études/Master of Engineering**

**Présenté et soutenu par :**

TSEBO CHOUELA Mike Collins

**En vue de l'obtention du**

Diplôme d'ingénieur de conception en génie informatique

**Sous la direction de :**

Dr. Vivien ROSSI

Ing. Éric Nicolas Pierre TONYE LISSOUCK

**Devant le jury composé de :**

Président : Pr. Djotio Ndié Thomas, Maître de conférences UYI

Examineur : Pr. Kouamou Georges, Maître de conférences UYI

Rapporteur : Dr. Vivien ROSSI, HDR, cadre scientifique au CIRAD

Invité : Ing. Éric Nicolas Pierre TONYE LISSOUCK, TL Soft

Année académique 2018-2019

Mémoire soutenu le 08 juillet 2019



---

# UN LOGICIEL DE SIMULATION POUR L'AIDE À LA GESTION DES CONCESSIONS FORESTIÈRES : APPLICATION AUX FORÊTS DU BASSIN DU CONGO

---

**Mémoire de fin d'études/Master of Engineering**

Présenté et soutenu par :

**TSEBO CHOUELA MIKE COLLINS**

En vue de l'obtention du

**Diplôme d'ingénieur de conception en génie informatique**

Année académique 2018-2019  
Mémoire soutenu le 08 juillet 2019

# Dédicaces

*A ma grand mère **KENMOGNE Marie***

*A mes parents **CHOUELA ANDRE** et **NGUEMLEU HELENE***

*A ma fratrie*

# Remerciements

Mes sincères remerciements vont à l'endroit des personnes suivantes :

- Le **Pr Thomas DJOTIO NDIE** pour l'honneur qu'il me fait de présider ce jury;
- Le **Pr Georges Edouard KOUAMOU** pour avoir accepté d'examiner ce travail;
- Le **Dr Vivien Rossi**, qui a assuré mon encadrement académique et professionnel, pour ses conseils, sa disponibilité et l'attention qu'il a porté à la rédaction de ce mémoire;
- Mon co-encadreur professionnel l'ingénieur **TONYE LISSOUCK Pierre Nicolas Eric** pour ses conseils et son dévouement;
- Tous mes enseignants de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique et en particulier à ceux du département de Génie Informatique pour leur dévouement à la formation des ingénieurs;
- L'ingénieur **Guillaume CORNU** pour tous les compléments techniques apportés lors de ce stage;
- A mes parents : **CHOUELA André, NGUEMLEU Helène** pour tous les efforts, les conseils, l'éducation et l'encadrement qu'ils m'ont donné;
- A mes frères et soeurs : **TCHUENTE Stephane, DJIENSIE CHOUPE Yannick, TCHUINTE Patricia Estelle, KOM CHOUELA Kevin, KENMOGNE Junior** pour la compréhension, les encouragements, le soutien et les bons moments passés ensemble;
- A mon co-stagiaire **Charles Marie Ogolong** pour son soutien et ces bons moments passés ensemble;
- A mes parrains de la promotion 2018 : **Michel TCHOUATCHA** et **Danielle KANGBAH** pour les bons conseils, la disponibilité, le soutien infaillible;
- Tous mes amis du Labo : **Joseph JOTIO, Loic Kwrite, Aurélien SIMO, Daniel ZOULLA'A, Lauris TCHUENKAM, Adrien TCHOUNKEU, Alain BIYONG, Salomon NSSO, Alex MOUTOMBI, Charles OGOLONG, Paterne KOUAYEP, Kemsty MOYO** pour les moments agréables passés pendant toutes ces années;
- Tous mes camarades de promotion et de génie Informatique en particulier;
- A la merveilleuse équipe de football du département de génie Informatique pour les moments de joie et de détente;
- A mes camarades et amis de Terminale C **Rivel WASSA, Fabienne TCHOULI, Elisabeth NTSAMA, Paul NKONGO, Diane NOMBO, Christie CORETTA, Gilles YONGA, Abed OTTOU, Anne BANDOLO, Dylane THANGUE** pour leurs encouragements;

A tous ceux qui, de loin ou de près, ont participé à l'accomplissement de ce travail.

## Résumé

**L**ES forêts du bassin du Congo constituent le deuxième plus grand massif forestier tropical au monde. S'étendant sur plus de 2 millions de km<sup>2</sup>, et par la variété de ses espèces et de ses écosystèmes, elles jouent un rôle important pour 8 millions de populations qui y puisent l'essentiel de leurs ressources. Son importance pour la lutte contre les gaz à effet de serre en fait un instrument essentiel dans un contexte de réchauffement climatique. Sa préservation est alors capitale pour la prospérité de l'humanité. Pour lutter contre la déforestation, la commission des forêts d'Afrique centrale abrégée COMIFAC soutient le concept de l'aménagement forestier. Elle demande à tout exploitant forestier de faire un état de la ressource et présenter une stratégie d'exploitation durable de la forêt à travers un plan d'aménagement.

Le problème pour définir une stratégie d'exploitation durable est de comprendre le fonctionnement de la forêt et ses réponses à l'exploitation. La forêt est une ressource qui prend plus d'une vie humaine pour atteindre sa maturité. Comment apprécier le fonctionnement d'une ressource avec une croissance aussi lente [FGPOO]? Le centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le développement abrégé CIRAD propose, dans le cadre du projet Partenariat Public Privé pour gérer durablement les Forêts d'Afrique Centrale (P3FAC), son appui aux États pour la réalisation d'un logiciel capable de mimer le fonctionnement de la forêt soumise aux effets de l'exploitation forestière et permettre aux exploitants de définir des politiques d'exploitation durables du bois d'œuvre. Une première version DafSim développée dans le cadre du projet Dynamique des Forêts d'Afrique Centrale (DynAfFor) permet alors de simuler le fonctionnement d'une parcelle forestière mais ne prend en compte les besoins des concessionnaires forestiers.

L'objectif de ce mémoire est de présenter la réalisation d'un logiciel d'aide à la gestion des concessions forestières basé sur la simulation de la dynamique des forêts du bassin du Congo. Notre travail a consisté à étudier DafSim, à définir un type de modèle de la dynamique forestière adapté aux activités des exploitants forestiers. Nous avons opté pour un modèle de distribution de type sentier contrairement au type parcelle utilisé dans DafSim. Ensuite, nous avons conçu un algorithme de simulation basé sur la méthode de Monte Carlo et un logiciel pour simuler ce type de modèle. Dans l'objectif d'offrir aux exploitants la possibilité de contrôler l'évolution de leurs stocks dans le temps et ainsi planifier une exploitation durable de la ressource, le logiciel fournit en sortie des courbes d'évolutions d'indicateurs économiques et de gestion durable. Toutefois ce logiciel possède quelques limites, ce qui ouvre la voie à quelques perspectives.

**Mots clés :** Simulation, dynamique forestière, concession forestière, gestion durable, ressource forestière.

## Abstract

**C**ONGO Basin forests are the second largest tropical forest. Stretching over more than 2 million km<sup>2</sup>, and with the variety of its species and ecosystems, they play an important role for 8 million people who draw most of their resources from them. Covering more than 2 million km<sup>2</sup>, and with the variety of its species and ecosystems, they play an important role for 8 million people who draw most of their resources from them. Its importance for the fight against greenhouse gases makes it an essential instrument in a context of global warming. Its preservation is then crucial for the prosperity of humanity. To fight deforestation, the COMIFAC Central African Forestry Commission supports the concept of forest management. It requires any forest operator to assess the resource and present a sustainable forest management strategy through a management plan.

The problem in defining a sustainable forest management strategy is to understand how the forest works and how it responds to exploitation. The forest is a resource that takes more than one human life to reach maturity. How to appreciate the functioning of a resource with such slow growth [FGPOO]? The Centre de Cooperation Internationale en Recherche Agronomique pour le développement abrégé CIRAD proposes, within the framework of the Public Private Partnership for Sustainable Management of Central African Forests (P3FAC) project, its support to States for the development of software capable of mimicking the functioning of the forest subject to forest exploitation and enabling operators to define sustainable timber exploitation policies. A first DafSim version developed as part of the Dynamique des Forêts d'Afrique Centrale (DynAfFor) project then makes it possible to simulate the functioning of a forest plot but does not take into account the needs of forest concessionaires.

This dissertation focuses on the development of a software to assist in the management of forest concessions based on the simulation of the dynamics of forests in the Congo Basin. Our work consisted in studying DafSim, defining a type of forest dynamics model adapted to the activities of forest operators. We opted for a path type distribution model in contrast to the plot type used in DafSim. Then, we designed a simulation algorithm based on the Monte Carlo method and software to simulate this type of model. With the aim of allowing operators to control the evolution of their stocks over time and thus plan a sustainable exploitation of the resource, the software provides output curves of changes in economic indicators and sustainable management. However, this software has some limitations, which opens the way to some perspectives.

**Key words** : Simulation, forest dynamics, forest concession, sustainable management, forest resource.

# Abbreviations

- AAC** Assiette Annuelle de Coupe. viii, 6, 16, 24, 31, 32, 50, 61, 62, 71, 72
- AAM** Accroissement Annuel Moyen. 71
- AGB** Above Ground Biomass (biomasse aérienne ligneuse). 7
- BV** Biomass of inventoried volume en T. 7
- CAPSIS** Computer-Aided Projection of Strategies in Silviculture (Croissance d'Arbres en Peuplement avec Simulation d'Itinéraires Sylvicoles). xi, 13–16, 19
- CIRAD** Centre de Coopération Internationale pour la Recherche Agronomique et le Développement. v, 1, 13, 21, 22
- COMIFAC** Commission des Forêts d'Afrique centrale. v, 1
- DafMod** DynAfForMODel. xi, 16, 17, 21–23
- DHP** diamètre à hauteur de poitrine (à 1.3 mètre du sol). 6–8
- DMA** Diamètre Minimum d'Aménagement. 5, 9, 18, 24–26, 29, 32, 52, 58
- DME** Diamètre Minimum d'Exploitabilité. 9, 30, 32, 52, 58, 67, 70–72
- DynAfFor** Dynamique des Forêts d'Afrique Centrale. v, xi, 1, 2, 13, 16, 19, 21, 33, 63
- GNU/GPL** General Public License. 43
- IDE** Integrated Development Environment (environnement de développement intégré). 44
- INRA** Institut national de la recherche agronomique. 13, 19
- P3FAC** Partenariat Public Privé pour gérer durablement les Forêts d'Afrique Centrale. v, 1, 63
- RCA** République Centrafricaine. 22
- SIG** Système d'Information Géographique. xi, xii, 20, 33, 39, 44, 59–61
- SMA** Système Multi-Agents. 12
- UFE** Unité Forestière d'Exploitation. 72
- VEF** Volume Expansion Factor. 7
- WSG** Wood Specific Gravity. 7

# Glossaire

**assiette annuelle de coupe** portion de la concession exploitée pendant une année. 5, 51, 62

**concession** Territoire sur lequel s'exerce une convention d'exploitation forestière constituée d'une ou plusieurs UFA. 51, 62

**rotation** Temps qui sépare deux passages consécutifs à l'exploitation au même endroit (AAC) d'un massif forestier. D'une valeur minimale de 30 ans au Cameroun, elle peut être portée à plus ou en moins en fonction du pays tout en restant un multiple de 5 ans.. 5, 6, 9, 10, 18

**table de peuplement** Tableau représentant le nombre de tiges par classes de diamètre et par essence pour chacune des strates. 14, 71

**unité forestière d'aménagement** Portion du domaine forestier permanent faisant l'objet d'un aménagement. 5

# Table des matières

<b>Dedicaces</b>	<b>iii</b>
<b>Remerciements</b>	<b>iv</b>
<b>Résumé</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vi</b>
<b>Glossaire</b>	<b>vii</b>
<b>Table des matières</b>	<b>ix</b>
<b>Table des figures</b>	<b>xi</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xiii</b>
<b>Introduction Générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Etat de l'art</b>	<b>4</b>
1.1 Eléments généraux de la thématique de la gestion forestière . . . . .	5
1.1.1 Principes et concepts de l'aménagement forestier . . . . .	5
1.1.2 Les indicateurs de la gestion forestière . . . . .	6
1.2 Modélisation des forêts . . . . .	10
1.2.1 Les modèles de population . . . . .	10
1.2.2 Les modèles démographiques ou de distribution . . . . .	11
1.2.3 Les modèles individuels . . . . .	12
1.3 Etude de l'existant . . . . .	13
1.3.1 CAPSIS . . . . .	13
1.3.2 DAFSIM . . . . .	16
1.4 Positionnement . . . . .	19
1.5 Bilan du chapitre . . . . .	20
<b>2 Méthodologie</b>	<b>21</b>
2.1 Le modèle de dynamique . . . . .	22
2.1.1 Structure du modèle . . . . .	22
2.1.2 Description du peuplement forestier . . . . .	22

2.1.3	Description du modèle de dynamique de type sentier . . . . .	23
2.2	Quantification de la variabilité des estimations des indicateurs : la méthode de Monte Carlo . . . . .	24
2.2.1	L'exploitation (LoggM) . . . . .	26
2.2.2	Dynamique de post-exploitation(LogDM) . . . . .	26
2.2.3	Dynamique naturelle (DynM) . . . . .	27
2.3	Analyse . . . . .	29
2.3.1	Les Exigences . . . . .	29
2.3.2	Diagrammes d'analyse . . . . .	36
2.4	Conception de la solution . . . . .	40
2.4.1	Architecture logicielle de la solution . . . . .	40
2.5	Bilan du chapitre . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Implémentation et Résultats</b>	<b>42</b>
3.1	Implémentation . . . . .	43
3.1.1	Outils et technologies . . . . .	43
3.2	Résultats . . . . .	45
3.2.1	Scénario d'utilisation . . . . .	45
3.2.2	Prérequis d'utilisation . . . . .	46
3.2.3	Présentation du logiciel . . . . .	46
3.2.4	Module de visualisation . . . . .	54
3.3	Evaluation . . . . .	60
3.3.1	Apports de la solution . . . . .	60
3.3.2	Rappels des objectifs . . . . .	60
3.3.3	Critiques et perspectives . . . . .	61
3.4	Bilan du chapitre . . . . .	62
	<b>Conclusion Générale</b>	<b>63</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>64</b>
<b>A</b>	<b>L'aménagement forestier</b>	<b>66</b>
A.1	Travaux d'inventaire . . . . .	67
A.2	Les paramètres d'aménagement . . . . .	69

# Table des figures

1	Illustration d'une section d'arbre à 1,3 m du sol [LIS16] . . . . .	8
2	Exemple de table de peuplement [Was+15] . . . . .	11
3	Le logo de Capsis 4[CIR13] . . . . .	13
4	Simulations de modèles sous CAPSIS . . . . .	14
5	Etapas de simulation sous CAPSIS [Duf+11] . . . . .	15
6	logo du projet DynAfFor [LIS16] . . . . .	16
7	Le principe de fonctionnement du simulateur « <b>DafSim</b> » [CIR14a] . . . . .	17
8	Simulation sur le logiciel DafSim [PG08] . . . . .	18
9	Modèle de dynamique DafMod [CIR14a] . . . . .	22
10	Le représentation du peuplement forestier dans le modèle « DafMod» [CIR14a] . . . . .	23
11	Dispositifs d'étude de la dynamique forestière [PG08] . . . . .	24
12	Le principe de fonctionnement du simulateur « <b>DafSim</b> » [CIR14a] . . . . .	25
13	schéma de transitions des classes de diamètres . . . . .	27
14	Modèle conceptuel des données d'inventaire . . . . .	31
15	diagramme de cas d'utilisation « simuler la dynamique forestière » . . . . .	34
16	Diagramme de cas d'utilisation « Acquisition et validation des données » . . . . .	35
17	Diagramme de cas d'utilisation « calcul et visualisation des indicateurs » . . . . .	36
18	Diagramme d'activités « simuler la dynamique » . . . . .	37
19	Diagramme d'activités « visualiser un indicateur » . . . . .	38
20	Diagramme d'activités « visualiser SIG » . . . . .	39
21	Diagramme de classes . . . . .	40
22	Architecture logicielle . . . . .	41
23	Méthodologie de développement . . . . .	42
24	Interface principale de RStudio sous Windows . . . . .	45
25	Page d'accueil de DafSim-C . . . . .	46
26	Première page onglet de Simulation . . . . .	47
27	Choix des paramètres de dynamique . . . . .	47
28	Description du Site . . . . .	48
29	Choix du fichier d'inventaire . . . . .	49
30	Présentation fichier d'inventaire . . . . .	49
31	Onglet chargement des données cartographiques . . . . .	50

32	Choix fichier zip des données cartographiques de la concession . . . . .	51
33	Insertion de la carte de la concession . . . . .	51
34	Paramètres de simulation de dynamique . . . . .	52
35	Paramètres d'exploitation . . . . .	53
36	Exemple Remplissage Paramètres d'exploitation . . . . .	53
37	Simulation terminée . . . . .	54
38	Calcul du taux de reconstitution du stock selon la formule de l'API de DIMAKO . . . . .	54
39	Description Site de simulation . . . . .	55
40	Paramètres pour la calcul de l'indicateur . . . . .	55
41	Courbe de l'indicateur de biomasse . . . . .	56
42	Données de la courbe . . . . .	56
43	Courbe Structure diamétrique cumulé . . . . .	57
44	Données courbe Structure diamétrique cumulée . . . . .	57
45	Données courbe Structure diamétrique par répartition de classe . . . . .	58
46	Visualisation statique des résultats de la simulation sur SIG . . . . .	59
47	Animation temporelle du SIG . . . . .	60
48	Exemple de plan de sondage . . . . .	68
49	Classes de diamètres . . . . .	68
50	Exemple de parcelles des "grands arbres" . . . . .	69
51	Exemple des parcelles de "petits arbres" . . . . .	69
52	Exemple des parcelles de régénération . . . . .	69

# Liste des tableaux

1.1	Equations de cubage traditionnelles . . . . .	6
1.2	Quelques modèles implémentés dans Capsis . . . . .	15
2.1	Table des paramètres de simulation . . . . .	25
3.1	Table des bibliothèques R utilisées . . . . .	44
3.2	Table d'évaluation du travail . . . . .	61

# Introduction Générale

## Contexte

Conscients du risque encouru par les forêts denses du bassin du Congo, les organisations intergouvernementales, les compagnies forestières et les organismes de recherche et d'enseignement se sont regroupés autour d'un projet innovant appelé DynAfFor intervenant dans 5 pays de l'espace COMIFAC (Cameroun, Congo, Gabon, République centrafricaine, République Démocratique du Congo)[CIR14b]. Le projet s'intéressait principalement aux conditions dans lesquelles il est possible d'améliorer la production durable du bois dans les forêts tropicales du bassin du Congo. La gestion durable des forêts de production implique que les règles et pratiques d'exploitation puissent assurer la pérennité des ressources et des services fournis par les forêts tout en générant des bénéfices économiques. Cette gestion durable nécessite un équilibre entre les prélèvements réalisés par l'exploitation forestière et la croissance des peuplements. Cet équilibre est recherché à travers l'élaboration de plans d'aménagement forestiers. Ils permettent une planification de la gestion sur le long terme et le calcul d'une estimation de la reconstitution de la ressource basée sur le potentiel de bois d'œuvre initialement exploitable. Pour permettre aux exploitants forestiers de définir des plans d'aménagement durables, des chercheurs du CIRAD, se sont intéressés à l'étude de la dynamique des forêts tropicales du bassin du Congo soumises aux exploitations forestières. Aux termes de cette étude, ils ont conçu un modèle de dynamique forestière, en se basant sur les données recueillies sur des dispositifs de suivi installés dans les concessions. Ce modèle a ensuite été intégré dans un logiciel informatique connu aujourd'hui sous le nom de DafSim. Mais celui-ci ne correspond pas aux besoins d'aménagement de l'exploitant.

## Problématique

Définir un plan d'aménagement forestier revient à expliquer comment le bois d'œuvre sera exploité et les règles d'exploitations à utiliser pour s'assurer du renouvellement de la ressource. Pour cela, il faut savoir comment la forêt évolue aussi bien en période de perturbation qu'en période non perturbée afin de prévoir son comportement selon la stratégie d'exploitation envisagée. Des études ont été menées par le CIRAD et ses partenaires avant et pendant le projet DynAfFor, elles ont permis de récolter des données de dynamique forestière. Ces données ont servi à calibrer et réaliser un premier simulateur à la dynamique forestière : DafSim. Mais celui-ci ne répond pas entièrement aux préoccupations des exploitants forestiers. Le projet P3FAC poursuit le projet DynAfFor avec un objectif de mettre en place un logiciel d'aide à la décision adapté aux besoins des concessionnaires forestiers.

Le passage des connaissances à un logiciel utilisable par les gestionnaires requiert que ces connaissances soient synthétisées sous forme de modèle. Ce modèle doit ensuite être traduit en algorithme de croissance, puis associé à une interface conviviale permettant (1) d'entrer les caractéristiques initiales des peuplements et la sylviculture qu'on souhaite simuler et (2) de restituer en sortie l'évolution des caractéristiques principales des peuplements.

Pour y arriver, il faut répondre aux questions ci-après :

- Comment s'organise les activités du concessionnaire?
- Quel niveau de description atteindre lors du choix du modèle pour convenir aux activités du concessionnaire?
- Quels sont les indicateurs de gestion durable pertinents pour évaluer les effets de l'exploitation sur la forêt?
- Par quelle méthode peut-on quantifier la variabilité de la dynamique forestière?

## Objectif

L'objectif est de doter les concessionnaires forestiers d'un logiciel leur permettant d'évaluer les effets de leurs activités sur les forêts et sur l'évolution de leur stock commercial dans le temps. En d'autres termes, il est question de réaliser un logiciel d'aide à la gestion des concessions forestières encapsulant un modèle de dynamique des forêts du bassin du Congo et simulant dans le temps, l'évolution du bois d'œuvre. La première version de ce logiciel, DafSim, développée dans le projet DynAfFor [CIR14b] est limitée à la dynamique des parcelles forestières expérimentales. Il est donc question de l'étendre à l'échelle d'une concession entière et d'y intégrer les activités du concessionnaire.

## Enjeux et Intérêts

**Sur le plan économique** Ce logiciel permettra aux exploitants forestiers du Bassin du Congo d'évaluer sur le long terme l'évolution de leur stock commercial suivant la stratégie d'exploitation envisagée. Il leur permettra ainsi de planifier et d'évaluer l'effet de leurs activités sylvicoles sur des espèces forestières afin d'assurer leur pérennité.

Par ailleurs, il existe un écart considérable entre les revenus pouvant être tirés de la gestion durable des forêts par rapport à l'utilisation agricole des terres [Foa+19]. Le potentiel économique d'une grande partie de la superficie forestière est souvent négligé à cause de l'absence durable des forêts. Mieux exploité, ce potentiel permettrait de réduire les coûts d'opportunité des forêts et contribuerait à la croissance des économies locales et nationales en générant des revenus, des emplois et des recettes fiscales tout en stimulant le développement des infrastructures. La gestion durable des forêts a un rôle important à jouer dans le développement de l'économie verte.

**Sur le plan social** Les populations locales du bassin du Congo ont toujours tiré de la forêt une part importante de leur subsistance. Elles tirent des ressources de leurs forêts à travers des activités telles que la pharmacopée, la chasse villageoise de la faune commune, la récolte des fruits

et de rotin etc. . . pour compléter les revenus des ménages. Le logiciel de simulation entre dans le cadre d'une gestion durable des peuplements forestiers. Ainsi il contribuera à la préservation de ces ressources pour les générations actuelles et futures.

**Enjeu Scientifique** Le logiciel DafSim-C peut servir d'outil de recherche en foresterie pour évaluer les effets des activités anthropiques sur le peuplement forestier et prévoir l'état des forêts dans l'avenir. De plus, cet outil vise à développer la recherche forestière en matière de dynamique des écosystèmes forestiers et à intégrer ces résultats dans les pratiques de gestion et d'aménagement forestier, ainsi que dans les politiques publiques des pays d'Afrique Centrale.

## Plan du mémoire

La suite du document s'organisera en quatre principaux chapitres :

- Le chapitre 1 intitulé **Etat de l'art** constitue une revue de littérature sur les concepts et termes clés liés la modélisation et la gestion forestière. C'est dans cette partie aussi que nous décrirons l'existant et formulerons notre positionnement.
- Le chapitre 2, **Méthodologie** porte sur la démarche adoptée pour la réalisation de notre travail. Nous y retrouverons le modèle de dynamique ainsi que l'algorithme de simulation présents dans le logiciel.
- Le chapitre 3, **Implémentation et résultats** présente les différentes étapes et outils utilisés pour la réalisation de l'application et l'évaluation des résultats obtenus.
- la **Conclusion générale** termine le document en rappelant le problème étudié et la solution proposée pour sa résolution avant de présenter les résultats et les perspectives qui peuvent en découler.

## Etat de l'art

**Introduction** *Prévoir l'évolution de la dynamique forestière et évaluer les pratiques des gestionnaires forestiers requiert la maîtrise du fonctionnement de l'écosystème forestier aussi bien en situation perturbée qu'en période non perturbée. La modélisation est un outil nécessaire pour réaliser une telle projection. Une fois modélisée, la dynamique peut être simulée et l'impact des forestiers quantifié à travers l'évolution d'indicateurs de gestion durable. Dans cette partie, nous nous intéresserons à la modélisation de la dynamique forestière tout en présentant les modèles utilisées dans le bassin du Congo. Pour cela, nous aborderons en premier lieu les principes de gestion forestière sur lesquels ils s'appuient. Puis nous terminerons sur les logiciels existants de simulation de la dynamique forestière en décrivant leur approche et en formulant des réserves pour constituer plus tard notre positionnement. Ce chapitre a donc pour objectif d'apporter toute clairvoyance à notre travail.*

## 1.1 Éléments généraux de la thématique de la gestion forestière

L'idée de gestion durable est au centre de la foresterie depuis son origine. Toutefois, la signification de la notion de gestion durable appliquée à la foresterie a évolué de manière significative avec le temps. Cette notion a concerné dans un premier temps une seule ressource forestière qui est le bois, puis elle s'est élargie pour prendre en compte tout l'écosystème forestier et enfin intégrer le contexte socio-économique qui entoure la gestion des ressources forestières. L'aménagement forestier apparaît comme la discipline de la foresterie qui permet de garder en ligne de mire l'idéal de gestion durable [Foa+19]. L'aménagement forestier recherche un équilibre délicat entre la satisfaction de la demande humaine actuelle en produits forestiers divers et la pérennisation des ressources forestières afin de garantir la satisfaction de la demande future en ces mêmes produits.

### 1.1.1 Principes et concepts de l'aménagement forestier

L'aménagement forestier est un processus de planification dans l'espace et dans le temps de toutes les activités à réaliser à l'intérieur d'un massif forestier suivant sa vocation prioritaire. Il est lié à la préparation des décisions de gestion d'une forêt sur la base des analyses et des connaissances techniques et scientifiques disponibles[Foa+19]. Son but est d'assurer une gestion durable de la ressource en orientant l'évolution de la forêt de façon à ce qu'elle réponde toujours mieux aux multiples besoins humains.

L'aménagement forestier est un outil stratégique qui n'a pas de modèle universel et qui doit être continuellement mis à jour. Il est appliqué selon le contexte et l'histoire du massif en posant des hypothèses et en respectant certaines pratiques établies par les autorités locales et reconnues durables.

Dans la pratique, il se réalise en deux principales étapes qui sont :

- **La planification d'aménagement** qui prévoit la réalisation d'un inventaire complet des espèces présentes, une étude socio-économique et une cartographie de base de la concession ensuite l'élaboration d'un plan d'activités appelé plan d'aménagement.
- **La mise en application et le suivi du plan d'aménagement** par l'administration, les opérateurs économiques et populations locales.

Le processus d'aménagement forestier demande à l'exploitant de décrire les caractéristiques biophysiques et l'environnement socio-économique de sa concession ainsi que l'état de son écosystème forestier : c'est l'étape de l'inventaire forestier. Cette première étape lui permet d'évaluer la capacité de sa concession. Une fois terminée, il doit proposer un plan détaillé sur la durée d'une rotation comportant les paramètres d'aménagement suivants :

- L'affectation des portions terres de la concession en unité forestière d'aménagement
- La définition des DMA pour chacune des essences d'aménagement
- Une division de la concession en 6 blocs quinquennaux d'exploitation respectant les critères d'équivolume. Chaque bloc est ensuite divisé en 5 assiettes annuelles de coupe, le

nombre total d'Assiette Annuelle de Coupe (AAC) est égal à la durée d'une rotation. Cette division détermine le caractère durable de la gestion en fixant l'intensité et la périodicité d'exploitation.

Une liste des paramètres plus exhaustive d'aménagement forestier est fourni en annexe A.

## 1.1.2 Les indicateurs de la gestion forestière

Les indicateurs de la gestion durable sont basés sur le principe de l'aménagement forestier et visent à évaluer les effets des activités humaines sur l'évolution des écosystèmes forestiers. Les informations ci-après ont été tirés du mémoire de fin d'études de l'ingénieur Tonye Pierre Lissouck [LIS16] dans le cadre de son travail sur le logiciel DafSim.

### 1.1.2.1 Volume de bois

D'une manière générale la détermination du volume peut se faire de deux façons différentes : les méthodes directes et les méthodes indirectes [VIN11]. Pour les méthodes directes la détermination peut se faire aussi de deux façons différentes selon que l'arbre est abattu (également appelé méthode destructive) ou sur pied. Dans les deux cas, des méthodes de cubage adaptées existent et sont répertoriées dans le tableau suivant :

**V**=Volume, **h**=hauteur, **Do** = diamètre à la base, et **Df** =diamètre au sommet

**TABLE 1.1:** Equations de cubage traditionnelles

Formule de Huber	$V = \frac{\pi * h * DHP^2}{4}$
Formule de Smalian	$V = \frac{\pi * h * (D_0^2 + D_f^2)}{8}$
Formule du tronc de cône	$V = \frac{\pi * h * (D_0^2 + D_f^2 + D_0 D_f)}{12}$
Formule de Newton	$V = \frac{\pi * h * (D_0^2 + D_f^2 + 4 * DHP^2)}{24}$

Les méthodes d'estimation du volume généralement appelées tarifs de cubage, permettent d'obtenir une estimation du volume d'arbre de manière indirecte. En effet, l'usage des tarifs de cubage permet d'éviter de cuber « physiquement » les arbres. Un tarif de cubage se représente sous la forme d'un tableau chiffré, un graphique ou une équation fournissant le volume d'un arbre en fonction d'une ou de plusieurs caractéristiques dendrométriques directement mesurables comme le DHP. La majorité des tarifs de cubage prennent l'une des deux formes suivantes :

- Modèle de Puissance :  $V = a * DHP^b$
- Modèle polynomial :  $V = a + b * DHP + c * DHP^2$

Où **V** = Volume de bois et **a, b et c** sont des coefficients du modèle.

### 1.1.2.2 Biomasse

Jusque récemment, la dendrométrie s'orientait principalement vers l'estimation du volume car celui-ci servait de base pour les ventes de bois. Cependant, ces dernières années, la biomasse a

connu un important regain d'intérêt. Celui-ci s'explique par le fait que la masse de bois est souvent préférée dans certains secteurs tels que l'industrie papetière et le bois énergie. Elle permet de mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes forestiers et comparer leurs productivités. De plus la biomasse est à la base des calculs de stocks de carbone en forêt et donc en lien direct avec les études sur le changement climatique.

**Formule de calcul** Selon [Cha+07], deux méthodes d'estimation de la biomasse ont été retenues :

- **Estimation à partir du volume de bois fort sur écorce** (calibrage du paramètre de [Bro97])  
Cette méthode permet une conversion du volume commercial sur écorce classiquement calculé par les forestiers, en biomasse épigée totale des arbres (bois et feuilles). Elle est appliquée aux inventaires forestiers réalisés par classes de diamètre incluant toutes essences et utilisant un diamètre de pré-comptage de 10 cm. Elle se base sur la conversion du volume bois fort inventorié sur écorce (VOB) en biomasse totale (AGB), par application de la densité anhydre du bois (WD ou WSD) et d'un coefficient d'expansion (BEF) représentant le rapport entre biomasse totale et biomasse commerciale. Cette formule s'applique à d'autres inventaires ayant un diamètre de pré-comptage supérieur (jusqu'à 30 cm) moyennant l'application d'un facteur correctif (VEF) permettant d'extrapoler le volume des classes de diamètre manquantes.

$$AGB = VOB * WD * BEF(*VEF)[BL92]$$

WD est aussi appelé WSG lorsqu'on considère les densités du bois propres à chaque espèce. On utilise également dans les calculs intermédiaires le terme BV, correspond à la biomasse des troncs :

$$BV = BOV * WD[Bro97]$$

- **La méthode d'estimation à partir des tables d'inventaires et des modèles allométriques** forestiers à la condition de corriger les données par classe de diamètre en faisant des hypothèses sur la distribution diamétrique continue du peuplement. Dans le cas présent on cherche à estimer la biomasse totale d'un arbre (AGB) à partir d'une ou deux données d'entrée : le diamètre DHP et la hauteur de l'arbre H. La revue la plus exhaustive à l'heure actuelle des modèles applicables aux forêts tropicales et données disponibles pour paramétrer ces modèles a été réalisée par [Cha+07]. Jérôme Chave suggère l'utilisation en forêt tropicale humide le modèle « Wet Forest », qui signifie « forêt pluvieuse » dans le cas où la hauteur totale des arbres est disponible :

$$AGB = WSD * e^{(-2.557+0.940*\ln(*DHP^2*H))} \approx 0.776 * (*DHP^2 * H)^{0.940}$$

Et l'équation suivante lorsque la hauteur n'est pas disponible. C'est celle qui est la plus

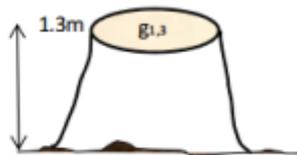
utilisée.

$$AGB = WSD * e^{(-1.449+2.148*\ln(DHP)+0.207*(\ln(DHP))^2+0.028*(\ln(DHP))^3)}$$

### 1.1.2.3 La surface terrière

La surface terrière (notée **G**) est une grandeur qui quantifie la concurrence entre les arbres d'un peuplement forestier. Cet indice correspond, pour un arbre à la surface de la section de cet arbre mesurée à 1,30 mètre du sol. Mais, selon les pays cette mesure peut être faite à une hauteur comprise entre 1 et 1,5m au-dessus du niveau du sol. La surface terrière totale ou moyenne d'une aire donnée peut être calculée par la somme des surfaces terrières des arbres de cette aire. C'est un indicateur utilisé pour la gestion sylvicole ou l'étude de peuplement forestier. Le suivi dans le temps de cette valeur donne en effet un indice précis de la productivité ligneuse du peuplement, via la vitesse de croissance en diamètre des arbres.

**Formule de calcul** Rappelons tout d'abord que la surface d'un arbre ( $g_{1,3}$ ) correspond à la surface de sa section à 1,3 comme présenté sur la figure 1.6.



**FIGURE 1:** Illustration d'une section d'arbre à 1,3 m du sol [LIS16]

Dans le cas de notre étude, la formule utilisée pour estimer la surface terrière d'un arbre est :

$$g_{1,3} = \frac{\pi DHP^2}{4}$$

La surface terrière **G** du peuplement est alors ensuite déterminée par sommation des surfaces terrières de **N** arbres à l'hectare le constituant soit :

$$G = \frac{\pi DHP_1^2}{4} + \frac{\pi DHP_2^2}{4} + \frac{\pi DHP_3^2}{4} + \dots + \frac{\pi DHP_N^2}{4} = \sum_i^N \frac{\pi DHP_i^2}{4}$$

L'unité de mesure de **G** est le  $m^2 / ha$ .

Connaissant la surface terrière d'un peuplement (**G**), on peut en déduire la surface terrière moyenne et le diamètre qui lui correspond. Sur la base de **G** et de **N**, on peut calculer la surface terrière moyenne.

$$\bar{g} = \frac{G}{N}$$

#### 1.1.2.4 Le taux de reconstitution du stock

La reconstitution encore appelé renouvellement est un indice indiquant le nombre d'arbres devenus exploitables après une rotation. C'est le ratio du nombre de tiges prévues dont le diamètre sera supérieur au DME (ou DMA) à la fin d'une rotation sur le nombre de tiges dont le diamètre est supérieur au DME (ou DMA) au début de la même rotation. Cet indicateur permet de résumer la dynamique complexe et multifactorielle par un seul indice souvent apprécié à travers la formule de l'API de DIMAKO [Jah+19] et très utilisée par les exploitants forestiers.

**Formule de calcul** La formule de reconstitution mise au point par [DF97] est le mode standard de calcul de reconstitution dans le bassin du Congo et est utilisé par la plupart des administrations forestières de ces pays. Selon la formule, la reconstitution dépend des dégâts d'exploitation, de l'accroissement annuel moyen, et du taux annuel de mortalité qui sont imposés sur la distribution du diamètre initial [PG08].

$$\%R = \frac{(N_f(1 - m)^T(1 - \alpha))}{N_0}$$

$m =$  taux de mortalité en  $\% \text{ an}^{-1}$

$\alpha =$  taux de dégâts d'exploitation

où  $T =$  durée d'une rotation en années

$N_f =$  effectif initial de tiges dont le diamètre est entre  $[\text{DMA} - \alpha * T; \text{DMA}]$  avec  $\alpha$  à déterminer

$N_0 =$  effectif d'arbres initial au-dessus du DMA

Ou tout simplement :

$$\%R = \frac{(\text{stock apres rotation} \geq \text{DMA}) * 100}{(\text{stock initial avant rotation} \geq \text{DMA})}$$

Il est important de noter que dans le cas d'une population en déséquilibre démographique, la valeur du taux de reconstitution est très élevée à la fin de la première rotation et ne reflète pas forcément la durabilité de l'exploitation mais plutôt l'ancienneté du pic démographique.

#### 1.1.2.5 Stock d'arbres

Il s'agit de l'effectif d'arbres par espèces recensé et le stock exploitable est le nombre d'arbres dont le diamètre est supérieur au DME (ou DMA).

#### 1.1.2.6 Structure diamétrique

La structure diamétrique est la répartition des tiges par classes de diamètres. Elle peut être établie en prenant en compte tous les individus et toutes les espèces. Elle correspond aux effectifs d'arbres dans les classes de diamètre. Elle peut-être également établie par espèce et l'on parle de structure spécifique. C'est le fruit de l'histoire locale de l'espèce qui peut remonter à plusieurs siècles compte tenu de leur durée de vie. Elle est porteuse d'informations sur la stabilité de toutes les espèces confondues [PG11]. A noter qu'une structure diamétrique de type distribution exponentielle s'interprète couramment comme le fruit d'un équilibre démographique et suggère une bonne reconstitution du stock à l'issue de la seconde rotation. Tandis qu'une structure diamé-

trique en cloche traduit un déséquilibre démographique, un déficit d'arbres juvéniles par rapport aux gros arbres. Le mode de la cloche révèle l'ancienneté des conditions favorables.

## 1.2 Modélisation des forêts

Le bon fonctionnement de l'écosystème forestier est difficile à évaluer. La résolution de ce problème nécessite de projeter dynamiquement l'évolution de la forêt. La modélisation de la dynamique forestière étant un outil pour la réalisation d'une telle projection [Gor+05].

Etymologiquement, un modèle est une imitation d'une réalité observée. C'est l'explication du réel dans la supposition d'un modèle idéal auquel on veut aboutir. Dans l'étude des forêts, il en existe plusieurs en fonction de l'échelle de description, chaque modèle étant adapté à un type de végétation particulier.

### 1.2.1 Les modèles de population

Encore appelés modèles de peuplement, ils mettent en jeu les variables descriptives de la population sans prendre en compte l'hétérogénéité entre individus et de ce fait la compétition qui existe entre arbres de différentes tailles et de différentes espèces. Ils modélisent la forêt comme un ensemble homogène décrit [FGP00] :

- Soit par son seul effectif  $x$  (modèle de régression logistique)

$$\frac{dx}{dt} = rt \left(1 - \frac{x}{K}\right)$$

- Soit par la distinction entre prédateurs et proies (modèle de Lotka-Volterra)

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = x(\alpha - \beta y) \\ \frac{dy}{dt} = y(-\gamma + \gamma x) \end{cases}$$

En supposant l'assimilation du peuplement à un arbre moyen, ce sont des résumés de la dynamique forestière des forêts mono spécifiques équiennes (homogènes) telles que les plantations ou les aires protégées.

Les tables de production et de croissance sont un type de modèle de peuplement. Une table de production apparaît comme une description plus ou moins complète du peuplement, une prévision de son évolution et un guide de sylviculture. Ils sont très utilisés par les gestionnaires forestiers des zones tempérées pour estimer en première approximation la productivité des formations forestières [Pic07]. C'est en fonction de cette production que sont raisonnés les prélèvements de manière à assurer l'évolution cyclique de la ressource.

Dans une table de production, chaque colonne décrit une caractéristique du peuplement et les lignes successives décrivent l'état probable du peuplement à des âges successifs. Les rotations, les intensités d'intervention sont également précisées.

Production des plantations d'épinette blanche  
Indice de qualité de station = 12 m

Espacement = 1.50 X 1.50 m									
Âge a	Hauteur dominante m	Surface terrière m <sup>2</sup> /ha	Diamètre moyen cm	Volume (m <sup>3</sup> /ha)		Nombre de tiges (/ha)		Accroissement annuel (m <sup>3</sup> /ha)	
				total	merchand	total	merchand	moyen	courant
15	6.16	13.72	7.1	47.04	25.16	3451	995	1.68	
20	9.09	23.31	10.1	91.39	67.17	2913	1674	3.36	8.40
25	12.00	31.92	12.7	140.21	114.12	2508	1934	4.56	9.39
30	14.79	39.25	14.9	189.96	162.15	2241	1967	5.41	9.61
35	17.37	45.26	16.7	237.71	208.32	2045	1915	5.95	9.23
40	19.71	50.04	18.1	281.38	250.58	1950	1847	6.26	8.45
45	21.77	53.75	19.1	319.76	287.73	1874	1785	6.39	7.43
50	23.54	56.55	19.9	352.32	319.26	1825	1739	6.39	6.31
Espacement = 1.75 X 1.75 m									
15	6.16	12.78	7.6	43.73	22.11	2848	862	1.47	
20	9.09	22.37	10.7	87.65	63.59	2466	1497	3.18	8.30
25	12.00	30.97	13.6	136.03	110.10	2135	1709	4.40	9.30
30	14.79	38.30	16.0	185.37	157.71	1906	1707	5.26	9.52
35	17.37	44.32	18.0	232.73	203.50	1751	1631	5.81	9.16
40	19.71	49.10	19.5	276.05	245.42	1645	1546	6.14	8.38
45	21.77	52.80	20.7	314.13	282.28	1573	1473	6.27	7.37
50	23.54	55.60	21.6	346.42	313.54	1524	1417	6.27	6.25
Espacement = 2.00 X 2.00 m									
15	6.16	11.84	8.0	40.42	19.08	2354	736	1.27	
20	9.09	21.42	11.4	83.90	60.01	2100	1332	3.00	8.19
25	12.00	30.03	14.5	131.86	106.07	1831	1505	4.24	9.21
30	14.79	37.36	17.1	180.77	153.27	1635	1477	5.11	9.44
35	17.37	43.37	19.2	227.75	198.69	1498	1387	5.68	9.08
40	19.71	48.15	20.9	270.72	240.27	1403	1294	6.01	8.32
45	21.77	51.86	22.2	308.49	276.82	1336	1216	6.15	7.31
50	23.54	54.66	23.2	340.52	307.83	1289	1156	6.16	6.20

FIGURE 2: Exemple de table de peuplement [Was+15]

### 1.2.2 Les modèles démographiques ou de distribution

Dans cette famille de modèles, une population est résumée par une fonction de distribution sur une ou plusieurs variables. Cette famille de modèles est issue de la démographie humaine et a été développée en écologie par Leslie [FGP00] et Usher [Ush66]. En suivant leur évolution, on peut décrire l'état du peuplement en tenant compte de l'hétérogénéité des espèces. Ils sont très utilisés en foresterie où la distribution diamétrique peut être facilement déterminée par les concessionnaires. En forêts tropicales humides, le plus répandu est le modèle matriciel obtenu dans le cas d'une distribution discrète en temps discret. Pour les modèles à classes de diamètre, la variation du diamètre des arbres est divisée en  $L$  catégories et on note  $\mathbf{N}(t)$  la distribution d'arbres par classe de diamètre avec  $n_i(t)$  le nombre d'arbres dans la classe  $i$ . La dynamique est alors modélisée par une relation matricielle :

$$\mathbf{N}(t + 1) = \mathbf{U} * \mathbf{N}(t) + \mathbf{R}$$

avec

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} q_1 & 0 & \dots & 0 \\ p_1 & q_2 & \dots & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & \dots & p_{L-1} & q_L & 0 \\ m_1 & \dots & \dots & m_L & 1 \end{pmatrix}$$

et

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_1 & \dots & r_L & 0 \\ & & 0 & \end{pmatrix}$$

Où

- $U$  est la matrice de Usher [Ush66] de taille  $(L+1 \times L+1)$  dont les coefficients constants s'interprètent comme les probabilités de survie dans la classe de diamètre ou de passage dans une classe supérieure.
  1.  $q_i$  est la probabilité qu'un arbre reste dans la classe  $i$  en survivant.
  2.  $p_i$  la probabilité qu'un arbre quitte la classe  $i$  pour la classe  $i+1$ .
  3.  $m_i = 1 - p_i - q_i$  et  $m_L = 1 - q_L$  sont les probabilités de mourir dans la classe d'indice  $i$ .
- $R$  est la matrice de recrutement qui indique l'effectif d'arbres participant au recrutement dans chaque classe de diamètre,  $r_i$  est le nombre moyen de recrues dans la classe de diamètre
- $N(t) = (n_1, n_2, \dots, n_L)$  la distribution des effectifs par classes de diamètres à l'instant (année)  $t$ .
- $L$  est le nombre de classes de diamètres.

### 1.2.3 Les modèles individuels

Une autre façon de tenir de l'hétérogénéité d'un peuplement forestier dans sa modélisation est de considérer chaque arbre dans son unicité. On parle de modèle arbre ou modèle individuel. La forêt est perçue comme une collection d'arbres dont on suit la trajectoire un par un. La valeur de chacune des variables descriptives du peuplement est déterminée et la localisation des tiges est faite autant que possible. L'hétérogénéité est à son niveau maximal à cette échelle. La position d'un arbre définit son voisinage et son statut compétitif dans la résistance du vent et la compétition pour la lumière.

Ces types de modèles offrent néanmoins une profusion d'information par rapport aux besoins de l'aménagiste forestier, sans compter la lourdeur des calculs numériques à effectuer pour juste quelques dizaines d'hectares de forêts. Leur implémentation informatique fait appel au SMA où chaque arbre est un agent sur qui est appliqué les différents processus de la dynamique : croissance, mortalité, régénération.

Plusieurs modèles existent et la question du choix de l'outil le plus adéquat pour le gestionnaire forestier se pose donc. Il faut un modèle qui confère un niveau de détail suffisant pour tenir compte des activités du gestionnaire : le modèle de peuplement lui ne peut s'appliquer qu'en forêt homogène s'il faut fournir le maximum de précision sur la dynamique; quant au modèle individuel, la profusion d'information en fait un modèle très complexe et difficile à mettre en œuvre uniquement avec des données normales d'inventaires. Dans un contexte où il faut déterminer le scénario d'exploitation qui maximise le volume de bois tout en s'assurant de la pérennisation de la ressource, les modèles de distributions n'ont rien à envier à la précision des modèles arbres

[Pic07]. C'est d'ailleurs ce type de modèle qui a été mis sur pied par le CIRAD et que nous utilisons pour la réalisation de DafSim-C.

## 1.3 Etude de l'existant

Nous nous intéressons à deux logiciels : CAPSIS un logiciel collectif pour la modélisation forestière et DafSim le logiciel de simulation développé dans le cadre du projet DynAfFor.

### 1.3.1 CAPSIS

#### 1.3.1.1 Présentation

Computer-Aided Projection of Strategies in Silviculture (Croissance d'Arbres en Peuplement avec Simulation d'Itinéraires Sylvicoles) est une plateforme de simulation pour gérer durablement les forêts [CIR13]. Créée en 1994 au laboratoire de Recherche forestière méditerranéenne de l'INRA en France, c'est une plateforme logicielle dédiée à la simulation de la croissance et de la dynamique forestière, générique et ouverte.

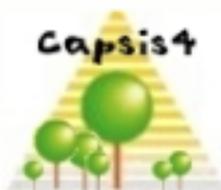


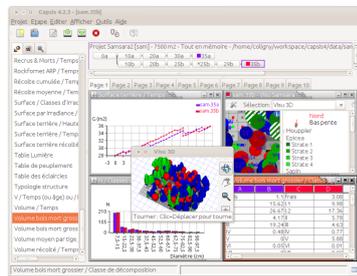
FIGURE 3: Le logo de Capsis 4[CIR13]

#### 1.3.1.2 Son principe

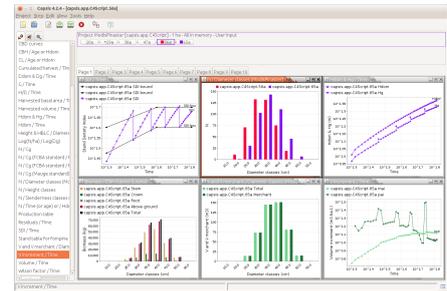
Les scientifiques forestiers construisent des modèles pour simuler la croissance des peuplements et la dynamique des forêts. Des outils informatiques dédiés sont souvent développés pour mettre en œuvre ces modèles afin d'exécuter des scénarii sylvicoles et d'explorer les résultats de simulation[Duf+11].

Le but de CAPSIS est de proposer un logiciel capable d'accueillir tout modèle de croissance d'arbres mis au point dans les organismes de recherche, afin de faciliter le transfert et encourager la réutilisation des logiciels. Chaque modèle conserve ses spécificités et ce mélange de modèles permet de simuler la dynamique de plusieurs types de peuplement en favorisant le partage de connaissances entre chercheurs. Pour rendre accessible le logiciel à ces derniers, une méthode d'accompagnement a été mise en place et affinée au cours des années afin de réduire considérablement les freins techniques. Un chercheur ayant conçu un modèle de croissance pour une espèce et une région donnée se voit proposer une formation rapide pour devenir programmeur débutant dans CAPSIS (langage Java). Une session de travail intensive est proposée dans la foulée, laquelle permet généralement d'obtenir en quelques jours un prototype fonctionnel pour ce modèle de croissance.

Par l'intermédiaire de la plateforme, les modélisateurs peuvent facilement diffuser leurs modèles à leurs partenaires scientifiques, à leurs financeurs, ainsi qu'aux organismes en charge de la gestion des forêts.



(a) une simulation CAPSIS avec le modèle Samsara2 en 3D



(b) une simulation CAPSIS avec le modèle de croissance ModisPinaster

**FIGURE 4:** Simulations de modèles sous CAPSIS

### 1.3.1.3 Fonctionnement

**Paramètres d'entrée** Toutes les simulations sont lancées dans des projets. Chaque projet est associé à un modèle Capsis spécifique, choisi au moment de son initialisation. Les projets mémorisent les différentes étapes de l'historique de la simulation. Chaque étape a une date et mémorise l'état du peuplement calculé par le modèle associé à cette date. CAPSIS héberge des modèles de dynamique par défaut. Une fois le projet crée, le gestionnaire de projets fournit un menu contextuel d'étapes qui propose des options de gestion pour l'étape en question, les différentes étapes (l'intervention, l'évolution naturelle) à suivre pour simuler la dynamique forestière.

**Paramètres de sortie** Capsis fournit une architecture logicielle ouverte et modulaire basée sur différents composants, permettant d'exécuter des simulations de croissance forestière et d'afficher les résultats. Les visualiseurs montrent l'état du peuplement sous une étape du projet donnée. Cette représentation peut être graphique (carte, distribution) ou non (texte, table de peuplement). Il permet aussi de sauvegarder et restaurer les résultats d'un projet et d'exporter l'état du peuplement à une étape donnée.

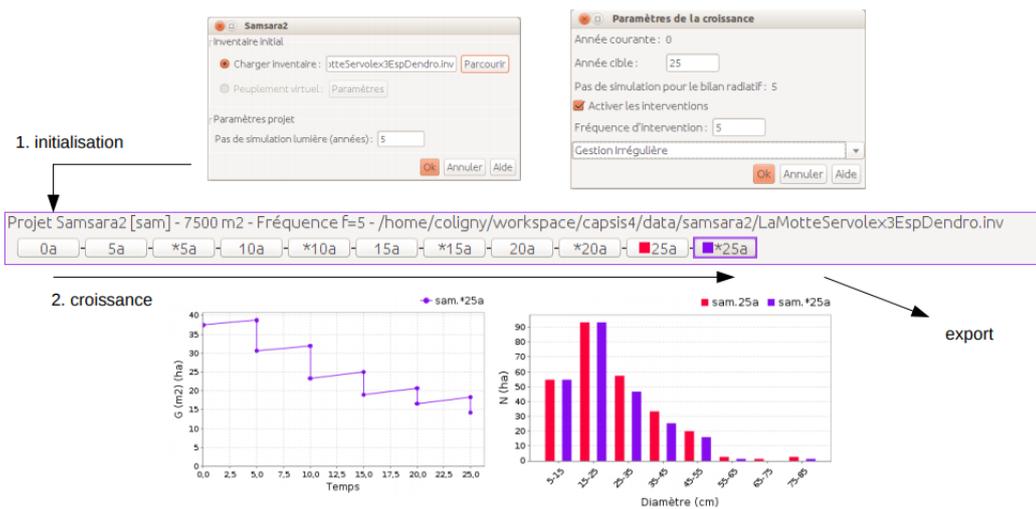


FIGURE 5: Etapes de simulation sous CAPSIS [Duf+11]

**Validité des simulations** Les modèles intégrés par CAPSIS ont été conçus et revus par des experts en écologie et foresterie après de longues recherches menées dans le domaine. Embarquant à ses débuts une douzaine de modèles, il contient aujourd'hui près de 60 modèles de croissance. CAPSIS a notamment été utilisé par l'Office National des Forêts de France lors de l'élaboration d'une quinzaine de guides de sylviculture ces dernières années.

TABLE 1.2: Quelques modèles implémentés dans Capsis

Modèles	Descriptions
Phenofit [MC05]	Un modèle individu-centré écophysologique qui prédit la distribution des espèces à l'échelle régionale ou continentale
Forceps [MC05]	Un modèle de dynamique forestière pour étudier l'effet de la diversité sur les processus écosystémiques (Individu centré, Génotype centré, Compétition lumière + Eau, Régénération plus intégrée)
Samsara [MC05]	Un modèle individuel de dynamique forestière spatialisé pour plusieurs espèces de montagne (régénération, croissance et mortalité).

**Environnement de développement et de production** Sa version 4, la plus récente, a été développée en langage **Java** ce qui le rend multiplateforme. Son installation nécessite la version 8 de **Java**. L'interface graphique, en français et en anglais, propose aux utilisateurs la construction visuelle de scénarios sylvicoles, ainsi que leur évaluation par des sorties graphiques intégrées ou exportées vers des outils d'analyse indépendants.

### 1.3.1.4 Critiques

#### Avantages :

- La flexibilité de son architecture permet d'intégrer des modèles hétérogènes suivant différents processus de dynamique (croissance, mortalité, dispersion des graines, régénération) ainsi qu'un accroissement du niveau de détail.
- Le cadre de travail de Capsis facilite la collaboration et le développement de logiciels partagés.
- L'application est bilingue et propose à l'utilisateur la construction visuelle de scénarios sylvicoles et l'évaluation de leurs impacts grâce à des sorties graphiques.
- Il permet de définir des itinéraires d'exploitation avec une grande précision.
- Un suivi continu de son développement et mise à jour régulière de son architecture.
- Logiciel multiplateforme peut donc s'exécuter sur plusieurs environnements.

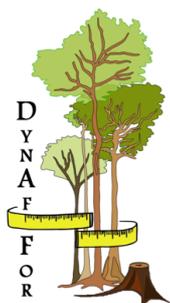
#### Inconvénients :

- CAPSIS est orientée pour la recherche et l'enseignement. Son utilisation requiert un haut niveau en foresterie. Il n'est pas destiné à un usage public. Il est destiné au modélisateur ayant conçu un modèle de croissance et souhaitant l'intégrer dans Capsis pour obtenir un simulateur afin de poursuivre ses propres objectifs scientifiques.
- Une multitude de modèles inutiles aux gestionnaires forestiers
- Les modèles présents sont bien adaptés pour les forêts homogènes tempérées de quelques hectares. Il permet la simulation sur quelques hectares de forêts alors que les concessions forestières peuvent s'étendre sur plusieurs milliers d'hectares.
- Le logiciel ne prend pas en compte les règles d'aménagement forestier comme la découpe de la concession en AAC utiles aux forestiers.

## 1.3.2 DAFSIM

### 1.3.2.1 Présentation

Une première version du logiciel de simulation des forêts du bassin du Congo, DafSim a été conçu et diffusée aux exploitants forestiers du Bassin du Congo dans le cadre du projet DynAfFor. Il s'appuie sur un simulateur de la dynamique forestière lui-même basé sur le modèle DafMod. Le



**FIGURE 6:** logo du projet DynAfFor [LIS16]

modèle DafMod est un modèle de dynamique forestière de type Usher stochastique et densité dépendant pour la version parcelle. Le simulateur DafSim calcule les intervalles de confiance du modèle DafMod suivant le principe de la méthode Monte Carlo. Ce simulateur a pour but principal d'estimer l'évolution du peuplement forestier et de visualiser les indicateurs suivants :

- La surface terrière
- La surface terrière
- Le volume total de bois
- Le volume exploitable
- Le taux de reconstitution
- La structure diamétrique
- Le stock d'arbres
- La biomasse
- Le stock exploitable

Il est par ailleurs possible pour l'utilisateur d'ajouter des indicateurs en fournissant l'équation permettant leur calcul.

### 1.3.2.2 Son Principe

Le modèle DafMod représente l'état du peuplement forestier par une répartition des effectifs d'arbres par classe de diamètre sur une superficie donnée. Son fonctionnement est construit autour de trois modules : l'exploitation, les dégâts d'exploitation et la dynamique naturelle. Il prédit l'évolution du peuplement d'une parcelle forestière avec un pas de temps fixe (annuel par exemple), en appliquant sur ce dernier les trois modules cités ci-dessus comme suit :

- Les exploitations à une périodicité fixée (30 ans par exemple au Cameroun).
- Les dégâts d'exploitation juste après chaque exploitation.
- La dynamique naturelle tous les pas de temps (annuel par exemple).

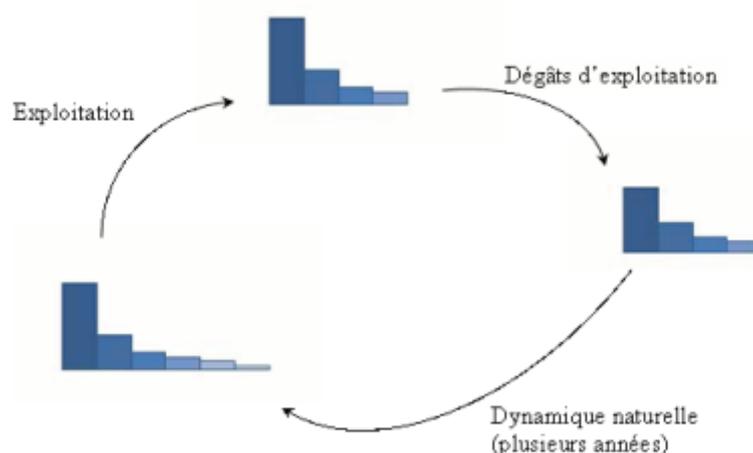


FIGURE 7: Le principe de fonctionnement du simulateur « **DafSim** » [CIR14a]

### 1.3.2.3 Fonctionnement

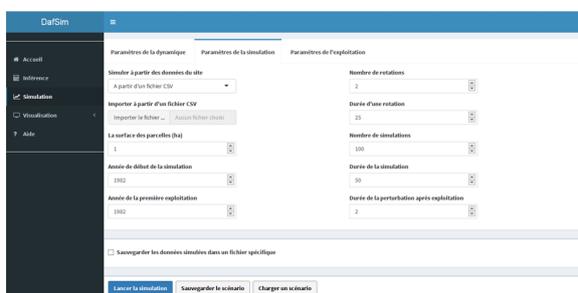
**Paramètres d'entrée** Pour fonctionner normalement comme décrit précédemment, il faut fournir un certain nombre d'informations au simulateur et s'assurer d'un certain nombre de prérequis :

- Il faut calibrer le modèle DafMod avec les données issues des parcelles ou de sentiers, représentatifs du peuplement ou de la population à simuler;
- Il faut fournir l'état initial du peuplement sous forme d'une distribution des effectifs par classe de diamètre, du groupe d'espèces ou de l'espèce à simuler;
- Il faut fournir le scénario d'exploitation : la liste des essences à exploiter, leur diamètres d'exploitations (DMA) respectifs, les intensités de prélèvement, durée de rotation, ...
- Il faut fournir le vecteur de probabilités de dégâts post-exploitation par classe de diamètre.

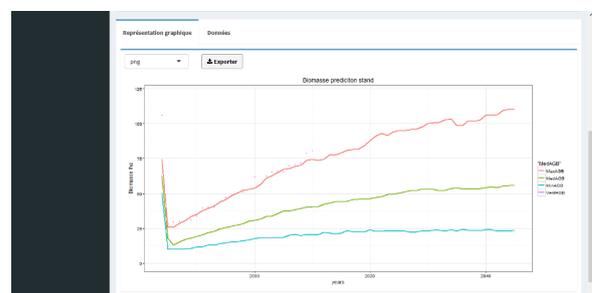
**Sorties du simulateur** Le simulateur produit en sortie des données décrivant les états prévisionnels, à chaque pas de temps, du peuplement forestier sur la durée de la simulation. A partir de ces données, le module de « visualisation » de DafSim, permet de calculer et visualiser les évolutions des indicateurs cités précédemment. Il est également possible de sélectionner la plage temporelle de la simulation à visualiser ainsi que d'agréger le calcul des indicateurs à différentes échelles : peuplement, groupes d'espèces ou une espèce particulière.

**Validité des simulations** Le modèle parcelle de ce simulateur a été calibré sur des données collectées depuis 30 ans sur le dispositif expérimental de M'Baïki ce qui assure la confiance dans les simulations. De plus pour valider les simulations, il est possible de comparer les prévisions du modèle, à la réalité, lorsque les simulations concernent les parcelles de M'Baïki.

**Environnement de développement et de production** Le logiciel DafSim est développé dans le langage **R** avec une interface graphique conçue grâce à l'extension **Shiny** et est destiné à un environnement Windows. Son architecture physique lui permet d'être à la fois utilisable en local sur un PC qu'en mode distribué sur le réseau.



(a) Paramètres de simulation DafSim [LIS16]



(b) Exemple de résultats indicateur DafSim [LIS16]

**FIGURE 8:** Simulation sur le logiciel DafSim [PG08]

### 1.3.2.4 Critiques

**Avantages :**

- Il simule les modèles à fonction de distribution, nécessaire à la satisfaction des besoins des aménagistes;
- Rapide pour tester des modèles de dynamique sur des parcelles d'inventaire;
- Permettre aux aménagistes de suivre l'impact de leurs activités à travers des sorties graphiques de bonne qualité;
- Interface conviviale et facile d'utilisation;
- Logiciel autonome et multiplateforme.

**Inconvénients :**

- DafSim est inadapté pour les exploitants car il permet de simuler la dynamique des dispositifs expérimentaux;
- DafSim ne prend pas en compte l'échelonnement temporel et la dimension spatiale d'une concession forestière.

## 1.4 Positionnement

Ce chapitre nous a permis de poser le problème d'aménagement forestier et de présenter les concepts de la modélisation forestière. Nous avons également présenté deux solutions de simulation. D'un côté, il y a CAPSIS, le logiciel de l'INRA qui jouit d'une grande communauté de chercheurs de part le monde et qui embarque en son sein un nombre considérable de modèles pour simuler divers types de peuplement forestier. Cependant, son usage premier est la recherche et l'enseignement ce qui limite ses fonctionnalités et son utilisation. De l'autre côté, nous avons DafSim, logiciel développé lors du projet DynAfFor, qui certes ne jouit pas de la maturité et de la notoriété de CAPSIS mais qui est adapté au contexte de l'aménagement forestier dans le bassin du Congo et dont l'usage est premièrement orienté vers l'exploitant.

En considérant le contexte forestier du bassin du Congo, les forêts tropicales humides sont actuellement gérées sous la forme de concessions dont la superficie varie entre quelques hectares et quelques centaines de milliers d'hectares. A cette échelle, le gestionnaire forestier n'a pas besoin de connaître l'accroissement de chacun des arbres : une estimation de la tendance moyenne de la dynamique, qui permet de prévoir le volume de bois exploitable par unité de surface est suffisante. En même temps, la connaissance des mécanismes de dynamique forestière est utile et nécessite de se placer à une échelle un peu plus fine. De ce fait, un modèle de distribution tel que celui de DafSim, semble indiqué pour la réalisation de DafSim-C. De plus, les exploitants forestiers n'ont pas l'expertise adéquate pour prendre en main un logiciel comme Capsis qui requiert une formation spéciale pour mettre en œuvre un modèle de dynamique et l'utiliser. Par contre, DafSim permettrait à l'exploitant de rapidement évaluer les conséquences écologiques et économiques de ses activités sur les forêts sans posséder une compétence poussée en foresterie. Toutefois, DafSim, tel qu'il est conçu ne prend pas en compte l'échelonnement temporel et la dimension spatiale d'une concession forestière. Pour la réalisation de DafSim-C, nous proposons de compléter DafSim se procédant comme suit :

1. Un modèle de distribution semble indiqué pour la réalisation de DafSim-C. Nous utiliserons un modèle de type sentier car plus adapté aux besoins de l'exploitant contrairement au modèle parcelle de DafSim. Ce type de modèle fourni en entrée, sera à chaque fois simulé par la méthode de Monte-Carlo afin de simuler et par la même occasion quantifier la variabilité de la dynamique forestière et construire des intervalles de confiance à 95%.
2. Les paramètres d'aménagement quant à eux, sont la représentation de la stratégie d'aménagement choisie par le concessionnaire. Ils serviront alors de paramètres de simulation dans DafSim-C.
3. En sorties, les graphiques présentant l'évolution des indicateurs de gestion durable seront présentés comme dans DafSim mais à l'échelle de la concession.
4. En plus, un Système d'Information Géographique (SIG) sera associé à DafSim pour apporter une dimension spatiale au module de visualisation. Ce système permettra de consulter sur un fond de carte à l'échelle de la concession entière, l'évolution des stocks soit statiquement année par année ou dynamiquement soit à travers un film temporel.

### 1.5 Bilan du chapitre

Ce chapitre, nous a permis de parcourir les concepts et termes clés ainsi que les modèles existants utilisés en modélisation forestière. Nous y avons également présenté les solutions logicielles existantes pour la simulation de la dynamique forestière et apporté quelques critiques. Notre objectif est la réalisation d'un outil d'aide à la gestion des concessions forestières. Le modèle à utiliser se doit de convenir aux attentes de l'exploitant et l'outil mis au point doit tenir compte de ses activités et de la dimension spatiale de sa concession pour lui suggérer les meilleures règles de gestion. Le chapitre suivant se consacrera à la réalisation du logiciel : il débutera par le choix du modèle de dynamique ensuite la définition de l'algorithme de simulation. Il se termine sur des étapes d'analyse et de conception logicielles.

## Méthodologie

**Introduction** *En Afrique centrale, les dispositifs les plus représentés sont les sentiers et les parcelles permanentes. Lors du projet de DynAfFor, les chercheurs du CIRAD ont mis au point deux modèles de dynamique forestière : le modèle de type parcelle qui porte sur toutes les espèces de la concession et le modèle de type sentier calibré pour un nombre réduit d'espèces commerciales dont les exploitants souhaiteraient suivre l'évolution. C'est ce dernier type de paramètres de dynamique que nous utiliserons pour la réalisation de DafSim-C. Il est question dans ce chapitre de dérouler les étapes de conception de notre solution. Il débutera par une description du modèle de dynamique DynAfForMODEL, pour suivre avec l'algorithme de simulation et enfin terminer sur les étapes de conception logicielles.*

## 2.1 Le modèle de dynamique

DafMod est le modèle statistique conçu et calibré par les chercheurs du CIRAD pour la dynamique forestière des forêts du Bassin du Congo à l'aide du dispositif de M'Baiki en RCA. Son principal but est d'appréhender les réponses de la forêt face à l'exploitation.

### 2.1.1 Structure du modèle

DafMod est un modèle à fonction de distribution densité-dépendant et chaîne de Markov d'ordre 1 constitué de trois modules qui sont les processus de la dynamique forestière et les états de la chaîne : la croissance, la mortalité et la régénération. Ces différents modules sont indépendants pour permettre de mieux les calibrer [CIR14a]. Il a été calibré avec deux types de données d'études : les données des parcelles expérimentales et celles issues des sentiers forestiers.

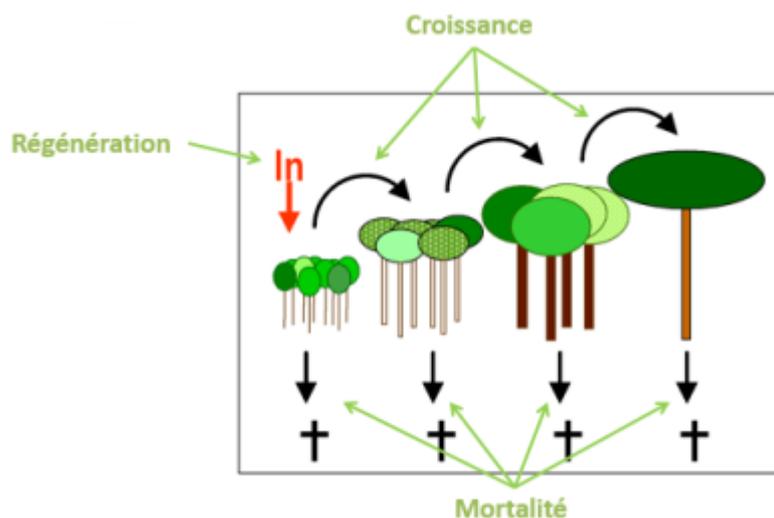


FIGURE 9: Modèle de dynamique DafMod [CIR14a]

### 2.1.2 Description du peuplement forestier

DafMod considère l'écosystème forestier comme une répartition des effectifs par classe de diamètre par espèce ou groupe d'espèce sur une surface donnée [CIR14a].

	Ayous	Azobé	Bilinga	...	Otunga	Sapelli
[10;20[	40	15	5	...	50	26
[20;30[	30	16	0	...	37	22
...	...	...	...	...	...	...
[110;120[	3	0	1	...	1	8
[120; +∞[	0	0	0	...	0	2

**FIGURE 10:** Le représentation du peuplement forestier dans le modèle « DafMod» [CIR14a]

Le modèle fait évoluer les arbres de chaque classe sur un pas de temps donné (annuel par exemple) avec un nombre de transitions déterminé et décrit par des probabilités de :

- Rester dans la même classe de diamètre  $q_i$
- Passer dans la classe suivante, la régression de classe étant impossible  $p_i$
- De mourir, l'état « **mort** » étant absorbant  $m_i$

Ce modèle tient compte des hypothèses suivantes :

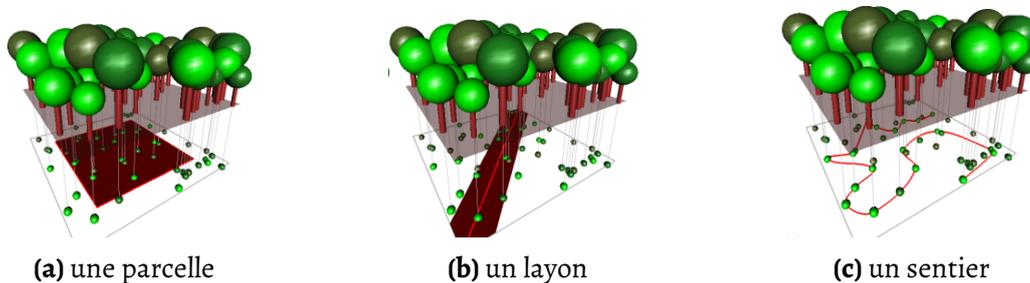
- **Hypothèse d'indépendance** : les arbres évoluent indépendamment les uns des autres
- **Hypothèse de Markov** : l'évolution d'un arbre de la classe de diamètre  $l$  entre les dates  $t$  et  $t + 1$  dépend uniquement de son état à la date  $t$
- **Hypothèse de Usher** : A chaque étape, un individu peut rester dans une classe de diamètre, aller dans la classe suivante ou mourir ; chaque individu peut donner naissance à un nombre de recrues.
- **Hypothèse de stationnarité** : L'évolution des arbres entre deux dates sont indépendants du temps.

### 2.1.3 Description du modèle de dynamique de type sentier

La collecte des données sur les peuplements se base sur l'utilisation de dispositifs permanents dans lesquels les arbres sont suivis individuellement à intervalles de temps réguliers. Il existe deux types :

- **La parcelle permanente** : il s'agit d'une portion délimitée de la forêt à l'intérieur de laquelle tous les individus d'une taille supérieure à un seuil sont suivis. Elle se présente sous forme rectangulaire pour la plupart sur une superficie de 1 ha. L'utilisation de Dafsim nécessite un modèle de ce type de dispositif.
- **Le sentier permanent** : il s'agit d'une ligne virtuelle reliant des individus identifiés pour être suivis. Dafsim-C devra utiliser les données issues de ces dispositifs.

- **Le layon** : C'est un cas particulier de parcelle dont la longueur est très grande devant la largeur.



**FIGURE II:** Dispositifs d'étude de la dynamique forestière [PG08]

La mise en place et le suivi d'un dispositif de type parcelle est coûteuse en temps, en ressources humaines et financières. C'est pour cela que les sentiers sont les plus souvent préférés aux parcelles. En effet dans la forêt les concessionnaires n'exploitent qu'une faible proportion dans la liste des espèces présentes. Ils mettront donc plus facilement leurs ressources à l'étude de ces seules espèces qu'à des espèces qu'ils n'exploitent pas. Le dispositif de type sentier est très adapté pour cette tâche, il permet de suivre une espèce particulière ou un groupe d'espèces avec moins d'efforts. On répertorie une quantité suffisante d'arbres (par exemple 200 arbres) de l'espèce en se déplaçant dans la concession de façon à produire un sentier. Le suivi revient donc à parcourir le sentier et relever les données.

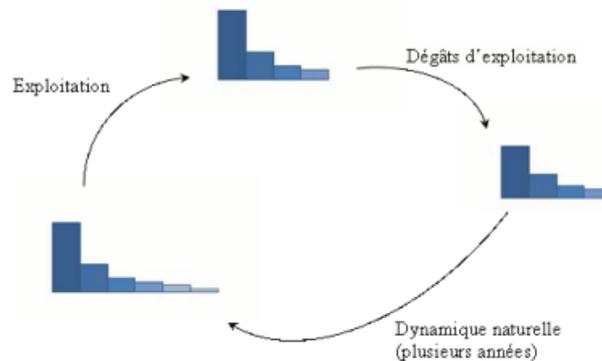
Les données récoltées lors de l'inventaire d'aménagement représentent l'état initial et serviront à déterminer l'évolution du peuplement des espèces suivies à travers un simulateur de type sentier. Le modèle utilisé pour le développement de DafSim-C a été calibré avec les données de type sentier issues du dispositif d'étude de Pallisco. C'est une restriction de DafMod à quelques espèces commerciales.

## 2.2 Quantification de la variabilité des estimations des indicateurs : la méthode de Monte Carlo

Simuler la dynamique forestière revient à déterminer aléatoirement l'état de la forêt pour chaque année de simulation à partir des effectifs par classes de diamètre déduits des données d'inventaire, la précision augmentant avec le nombre de simulations  $N_{sim}$ . Le processus à simuler peut se modéliser comme suit.

L'exploitant organise ses activités d'exploitation sur un pas d'une année pendant laquelle il exploite une AAC suivant un vecteur d'exploitation  $I$  par classes de diamètres supérieures au DMA. Il parcourt ainsi tour à tour les différents Assiette Annuelle de Coupe et le nombre de tours effectués représente le nombre de rotations. Dans chaque AAC, la dynamique se déroule en 3 phases :

1. **L'exploitation** : Pendant une année d'exploitation, un certain nombre d'arbres sont tirés aléatoirement de l'effectif initial puis considérés comme exploités ceci en fonction des paramètres d'exploitation spécifiés par l'exploitant. D'autres arbres meurent et les proportions sont définies par le vecteur de dégâts d'exploitation. Pendant une période de rotation, les assiettes de coupe sont exploitées chacune pendant une année et les unes après les autres.
2. **Dynamique de post exploitation** : Elle suit l'année d'exploitation. Ici les arbres survivants évoluent selon les modèles de dynamique en situation perturbée de la forêt. Cette évolution est ponctuelle et peut durer en moyenne deux ans.
3. **La dynamique naturelle** : Après la période de perturbation, la forêt revient à son état normal. Les arbres évoluent ici selon la dynamique naturelle des forêts dirigée par les trois processus : croissance, mortalité et recrutement.



**FIGURE 12:** Le principe de fonctionnement du simulateur « **DafSim** » [CIR14a]

Les paramètres de simulation qui en découlent sont :

**TABLE 2.1:** Table des paramètres de simulation

Paramètres	Description
$D_0, \dots, D_L$	Les classes de diamètres qui sont relevés lors des travaux d'inventaire
$W_1, \dots, W_L$	Pourcentage d'arbres reproducteurs par classes de diamètres
DurRotation	la période d'un cycle du processus à simuler
NbRotations	le nombre de répétitions du cycle
DMA	Diamètre Minimum d'Aménagement
I	vecteur d'intensité d'exploitation
$N_{sim}$	le nombre de simulations du phénomène
Recov	le nombre d'années de perturbation de la forêt
CAM	Coefficient d'augmentation de la mortalité en période de perturbation

### 2.2.1 L'exploitation (LoggM)

L'exploitation peut se formaliser par une loi binomiale sur les effectifs initiaux. En effet, chaque arbre de la même classe de diamètre possède la même probabilité d'être exploité. L'exploitation revient donc à faire un choix pour chaque arbre entre deux états : **exploité** ou **survivant**. Ce qui se traduit bien par une loi binomiale dépendant de deux paramètres à savoir : Diamètre Minimum d'Aménagement (DMA) et le vecteur d'intensité d'exploitation par classes de diamètres  $I$ . Appelons LoggM la fonction qui va mettre à jour les effectifs  $\mathbf{N}(t)$ . Son équation peut s'écrire :

$$\text{LoggM}(\mathbf{N}(t)|\text{DMA}, I) = \tilde{\mathbf{N}}(t)$$

Ce processus se représente simplement par une loi binomiale. Les arbres au-dessus du DMA sont exploités avec une probabilité de  $I$  et pour les classes  $l$  telles que  $D_l \leq \text{DMA}$  leur effectifs ne sont pas influencés par l'exploitation  $N_l^{\tilde{}}(t) = N_l(t)$ . Pour les classes de diamètres  $l$  telles que  $\text{DMA} \leq D_l$ , le nombre d'arbres après exploitation suit une loi binomiale de paramètres  $N_l^{\tilde{}}(t)$ , le nombre d'arbres dans la classes avant exploitation et  $1 - I$  :  $N_l^{\tilde{}}(t) \sim \binom{N_l(t)}{1-I}$ . Ainsi LoggM peut s'écrire :

$$\text{LoggM}(N_1(t), \dots, N_L(t)|\text{DMA}, I) = (N_1^{\tilde{}}(t), \dots, N_L^{\tilde{}}(t))$$

Avec

$$\begin{aligned} N_l^{\tilde{}}(t) &= N_l(t) \text{ si } D_l < \text{DMA} \\ N_l^{\tilde{}}(t) &\sim \binom{N_l(t)}{1-I} \text{ sinon} \end{aligned}$$

### 2.2.2 Dynamique de post-exploitation(LogDM)

Ici, nous modéliserons uniquement le processus de mortalité. Les autres processus sont identiques que ceux en situation de dynamique naturelle exposée plus loin. La seule différence se situe au niveau des probabilités de croissance et de régénération. Notons cette fonction LogDM fonction qui met à jour les effectifs de l'année en cours.  $\text{LogDM}(N_1^{\tilde{}}(t), \dots, N_L^{\tilde{}}(t)|(d_1, \dots, d_L)) = (N_1^{\bar{}}(t), \dots, N_L^{\bar{}}(t))$  Chaque année durant la période de perturbation, une proportion de  $m_l$  est détruite à cause de l'exploitation. Le processus se modélise simplement par une loi binomiale : chaque arbre dans la classe de diamètre  $l$  est détruit avec une probabilité  $d_l$ .

$$\text{LogDM}(N_1^{\tilde{}}(t), \dots, N_L^{\tilde{}}(t)|(d_1, \dots, d_L)) = (N_1^{\bar{}}(t), \dots, N_L^{\bar{}}(t))$$

Avec

$$N_l^{\bar{}}(t) \sim \binom{N_l^{\tilde{}}(t)}{1-d_l}$$

### 2.2.3 Dynamique naturelle (DynM)

La dynamique naturelle est un modèle stochastique de Usher[Ush66] qui repose sur les hypothèses citées à la section §2- 2.1.2. En prenant en compte, les hypothèses de Markov, de stationnarité et de Usher, on peut représenter la dynamique naturelle par une distribution multinomiale avec  $\theta_l = (p_l, q_l, m_l)$  et  $p_l + q_l + m_l = 1$  pour  $l \leq L$  et  $\mu = (1, \theta_L)$  avec  $\theta_L = (p_L, m_L)$  et  $p_L + m_L = 1$  car un individu dans la classe L ne peut que soit rester dans sa classe soit mourir. Le recrutement lui se fait selon les vecteurs de fécondité et la matrice de recrutement. Le schéma suivant récapitule les transitions possibles dans le modèle :

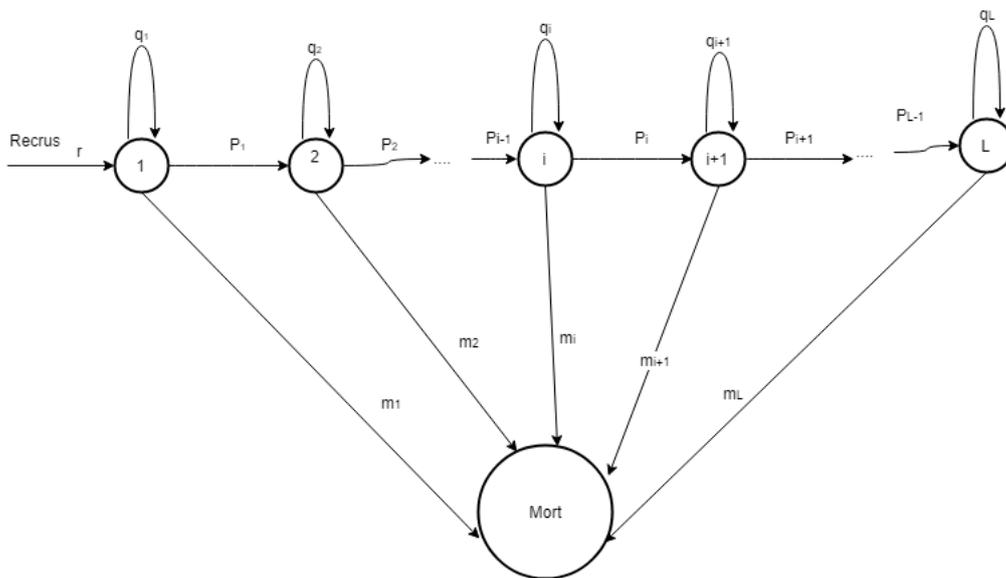


FIGURE 13: schéma de transitions des classes de diamètres

On pose par la suite DynM la fonction qui récapitule la dynamique sus-exprimée mettant en jeu le vecteur  $N(t)$  entre deux dates. On a :

$$\text{DynM}(N_1(t), \dots, N_L(t) | \theta_1, \dots, \theta_L, R) = (N_1(t+1), \dots, N_L(t+1))$$

On définit également le vecteur  $(N_{l,p}(t), N_{l,q}(t); N_{l,m}(t))$  où :

$N_{l,p}(t)$  désigne le nombre d'arbres de la classe de diamètre l qui survivent et restent dans cette classe de diamètre entre les dates t et t + 1.

$N_{l,q}(t)$  désigne le nombre d'arbres de la classe de diamètre l qui survivent et passent dans cette classe de diamètre l + 1 entre les dates t et t + 1.

$N_{l,m}(t)$  désigne le nombre d'arbres de la classe de diamètre l qui meurent naturellement entre les dates t et t + 1.

et  $N_{L,q}(t) = 0$  et  $N_{1,q}(t) = R^t$  ou  $R^t$  représente le nombre de recrues. Cette variable suit une loi de poisson définie comme suit  $R^t \sim P(R^t, \sum_{l=1}^L W_l * N_l(t))$ .

Le vecteur ainsi défini suit une loi multinomiale de paramètres  $\theta_l$  et  $N_l(t)$  :

$$(N_{l,p}(t), N_{l,q}(t); N_{l,m}(t)) \sim \mu(\theta_l, N_l(t))$$

L'effectif à la date  $t + 1$  s'écrit :

$$N_l(t + 1) = N_{l,p}(t) - N_{l,q}(t) - N_{l,m}(t) - N_{l-1,q}(t)$$

En résumé, le processus de dynamique naturelle peut s'écrire :

$$\text{DynM}(N_1(t), \dots, N_L(t) | \theta_1, \dots, \theta_L, R) = (N_1(t + 1), \dots, N_L(t + 1))$$

Où

$$N_l(t + 1) = N_{l,p}(t) - N_{l,q}(t) - N_{l,m}(t) - N_{l-1,q}(t)$$

avec

$$(N_{l,p}(t), N_{l,q}(t), N_{l,m}(t)) \sim \mu(\theta_l, N_l(t))$$

$$N_{L,q}(t) = 0$$

$$N_{1,q}(t) = P(R^t, \sum_{l=1}^L W_l * N_l(t))$$

Cette dynamique naturelle s'applique aussi bien en situation perturbée qu'en situation de croissance normale. La seule différence se situe au niveau des paramètres :

- $\theta_l^r = (p_{r,l}, q_{r,l}, m_{r,l})$  avec  $r$  mis pour la récupération observée en temps de perturbation
- $\theta_l^s = (p_{s,l}, q_{s,l}, m_{s,l})$  avec  $S$  mis pour la stationnarité observée en temps calme.

Pour la détermination des intervalles de confiance des indicateurs, nous avons utilisé la méthode de Monte Carlo [Sha19]. Le nom a été proposé par les scientifiques du projet Manhattan lors de la deuxième guerre mondiale et fait allusion aux jeux de hasard pratiqués à Monaco. Cette technique de simulation est utilisée pour simuler des systèmes déterministes avec des paramètres ou des entrées stochastiques par le biais d'un procédé aléatoire. La méthode de Monte-Carlo repose essentiellement sur la capacité à générer des réalisations indépendantes d'une variable aléatoire de loi donnée. En d'autres termes, elle repose sur la capacité à effectuer des tirages aléatoires indépendants suivant une loi de probabilité donnée.

L'algorithme de simulation de ces 3 phénomènes par la méthode de Monte Carlo est le suivant :

```

Data: paraSim;paramDyn;N0 : paramètres de dynamique,paramètres de
simulation,Effectif initial
Result: MatN : Matrice des effectifs simulées
1 initialization : N(t) ← N0;
2 for i in 1:Nsim do
3   for n in 1:NbRotat do
4     Exploitation : Ñ(t) ← LoggM(N(t)|DMA, I);
5     Dynamique post-exploitation : N̄(t) ← LogDM(Ñ(t)|(d1, ..., dL));
6     Mise à jour du nombre d'arbres : N(t) ← N̄(t);
7     Dynamique de récupération :
8     for t in 1:Recov do
9       N(t + 1) = DynM(N(t)|θ1r, ...θLr, Rr);           // r pour récupération
10      Matrice des effectifs : MatN ← N(t + 1)
11    end
12    Dynamique stationnaire :
13    for t in 1:DurSim-recov do
14      N(t + 1) = DynM(N(t)|θ1s, ...θLs, Rs);           // s pour stationnaire
15      Matrice des effectifs : MatN ← N(t + 1);
16    end
17  end
18 end

```

**Algorithm 1:** Algorithme de simulation de la dynamique

## 2.3 Analyse

### 2.3.1 Les Exigences

Les exigences d'un projet sont les services à rendre et les contraintes à respecter par le projet. Elles se divisent en deux catégories.

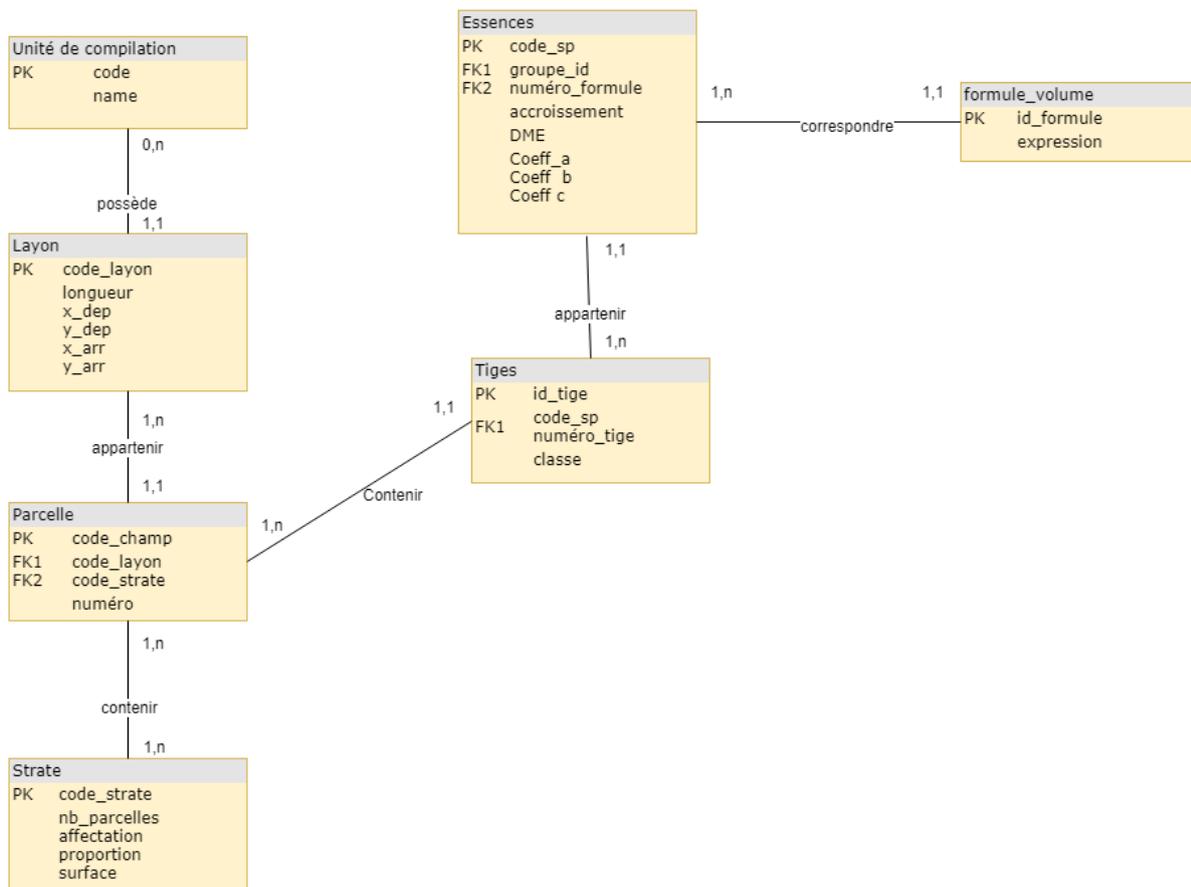
#### 2.3.1.1 Fonctionnelles

Ce sont les services que le système devra fournir pour être considéré fonctionnel. Pour DafSim-c, on peut les répartir en deux groupes :

— **Les fonctionnalités liées à la simulation de l'évolution du peuplement forestier :**

L'idée est de permettre à l'utilisateur de simuler l'évolution des espèces forestières en se basant sur les données d'inventaires, les paramètres de la dynamique du peuplement ainsi que les paramètres de simulation et d'exploitation qu'il a fourni.

- Les données d'inventaires : il s'agit de l'état initial ( $t=0$ ) du peuplement qui permettra de prédire les états suivants du peuplement. Elles serviront de point de départ pour déterminer l'évolution du peuplement forestier dans la concession pour assurer une gestion durable des ressources. Elles contiennent les informations suivantes :
  - \* Les données sur les sentiers : Lors de la mesure, les informations relevées sont le code de la parcelle qui l'identifie de façon unique, l'unité de compilation, le numéro du layon et le code la strate à laquelle elle appartient.
  - \* Les données sur la stratification : la forêt retrouvée dans une concession forestière est fortement hétérogène. Pour un suivi efficace et une modélisation facile, elle est subdivisée en strates représentant les espèces vivant dans un milieu aux caractéristiques similaires. Grâce à cette répartition, modéliser la dynamique du peuplement forestier d'une concession revient à agréger les modèles des différentes strates présentes. Cette feuille de données contient la liste des strates rencontrées, leurs codes, le nombre de parcelles qu'elles contiennent, la surface de la strate et sa proportion dans la concession.
  - \* Les données sur les essences rencontrées : une essence correspond à une ou plusieurs espèces d'arbre. Ces données, contiennent le code de l'espèce, son diamètre minimum d'exploitation (DME), le numéro de la formule de calcul du tarif de cubage d'un arbre de cette espèce, les coefficients de calcul du tarif de cubage, l'accroissement annuel moyen par défaut du diamètre d'un arbre de ce type.
  - \* Les tiges : qui représentent ici les arbres mesurés lors de l'inventaire de la concession. On retrouve ici le code de l'espèce à laquelle la tige appartient, son numéro parmi les arbres recensés, sa classe de diamètre ainsi que la strate et le code de la parcelle dans laquelle elle se situe.
  - \* Les Formules de volume : ce sont les expressions des volumes utilisées pour déterminer les tarifs de cubage des arbres.
  - \* Les détails du plan de sondage : répertorient tous les layons de la concession en les répartissant dans leurs unités de compilation. Elles précisent également leurs coordonnées de départ et d'arrivée, leur longueur et le système géodésique utilisée sur la carte.



**FIGURE 14:** Modèle conceptuel des données d'inventaire

- Les paramètres de dynamique :
  - \* La matrice de recrutement R
  - \* Les probabilités de mortalité en situation perturbée ( $d_1, \dots, d_L$ ) et en situation non perturbée ( $m_1, \dots, m_L$ )
  - \* Les probabilités de changer de classe en situation non perturbée ( $p_1, \dots, p_L$ ) et situation perturbée
  - \* Les probabilités de rester dans la même classe en situation non perturbée ( $q_1, \dots, q_L$ ) et en situation perturbée
- Les paramètres de simulation : il s'agit de
  - \* Le nombre de répétition à réaliser dans la simulation pour quantifier la variabilité du phénomène.
  - \* L'année de début de la simulation.
  - \* La durée de la rotation qui est égale au nombre d'AAC
  - \* Le nombre de rotations.
  - \* L'année de la première exploitation.
  - \* Les pourcentage d'arbres reproducteurs par classes de diamètres

- \* Coefficient d'augmentation de la mortalité en période de perturbation
- \* Le nombre de répétitions du cycle
- Les paramètres d'exploitation
  - Les informations sur l'espèce à exploiter :
    - \* Le nom de l'espèce.
    - \* Le code de l'espèce.
    - \* Le DME
    - \* Le DMA
    - \* Le vecteur d'intensité d'exploitation
    - \* Le taux de récolement.
    - \* Le tarif de cubage.
    - \* La densité.
  - Le vecteur des dégâts dû à l'exploitation par classe de diamètre.

Une fois ces paramètres saisis et validés par l'utilisateur, une vérification de conformité est effectuée avant le lancement effectif de la simulation. Si la vérification échoue ou s'il se produit une erreur durant la simulation, un message doit être renvoyé à l'utilisateur afin de lui demander de la corriger.

### — **Les fonctionnalités liées à l'exploration des résultats de la simulation**

Cette partie est la plus importante pour les concessionnaires forestiers. Elle permet à ceux-ci d'apprécier les effets de leurs activités sur le peuplement forestier à travers des indicateurs de gestion durable des écosystèmes. Il sera question de permettre à l'utilisateur de choisir dans une liste d'indicateurs préalablement définie, un indicateur et de visualiser sa courbe d'évolution sur une plage d'année, pour une classe de diamètre et les données ayant servi à tracer cette courbe, ceci pour chaque AAC ou groupe d'AACs. Pour chaque indicateur nous calculerons dans le cadre de l'analyse des données de la simulation afin de mieux présenter les résultats obtenus :

- La médiane.
- L'intervalle de confiance à 95% (la borne supérieure est le quantile à 97,5% et la borne inférieure le quantile à 2,5%)

La deuxième partie de la visualisation est de présenter l'évolution du peuplement à travers un film de cartes de la concession ou de l'AAC choisie d'années en années, chaque carte portant les statistiques du peuplement.

#### **2.3.1.2 Besoins non fonctionnels**

A côté des fonctionnalités principales se trouvent les besoins non fonctionnels. Ce sont des contraintes sous lesquelles doivent opérer le système. Elles permettent de valider le système produit. Il s'agit de :

### Des contraintes techniques

- Le logiciel doit être facile d'utilisation et offrir la plus grande convivialité possible.
- Il doit également être facile à installer et doit pouvoir fonctionner sur un environnement Windows.
- Il doit effectuer et fournir les résultats de la simulation des indicateurs dans un temps raisonnable.
- L'utilisation du moteur de simulation de type sentier développé dans le cadre du projet DynAfFor.
- Le logiciel doit s'assurer de la validité des données d'entrée à savoir :
  - Tous les types de données attendues doivent être remplies et conformes;
  - Les espèces doivent être cohérentes avec celles du jeu de paramétrage;
  - Définir les valeurs par défaut pour orienter l'utilisateur dans le remplissage de certains paramètres.

**Des contraintes conceptuelles** Comme dans la première version, l'architecture choisie doit permettre l'ajout ou la modification d'un module du logiciel sans toutefois affecter le fonctionnement d'un autre.

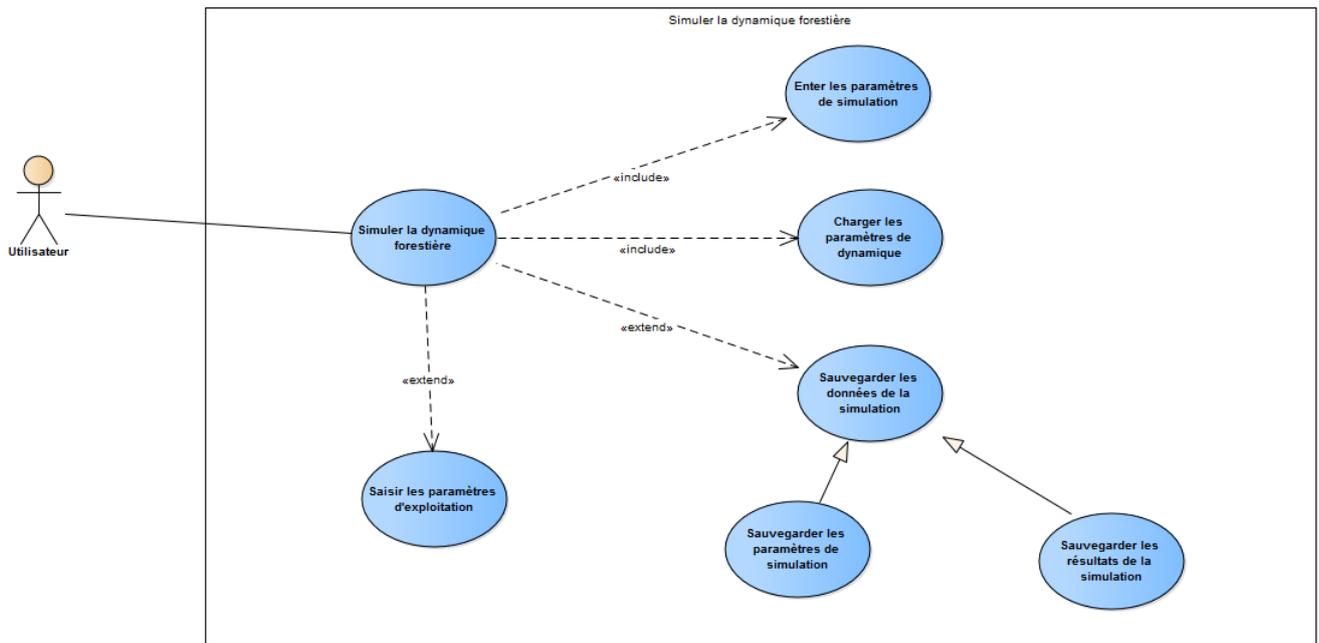
#### 2.3.1.3 Les acteurs

Dans notre système nous ne faisons pas une différence entre les utilisateurs de celui-ci. Qu'il soit exploitant forestier, scientifique ou membre de l'administration forestière d'un Etat, ils peuvent tous avoir accès à toutes les fonctionnalités du logiciel. C'est pour cette raison que dans le système un acteur est équivalent simplement à un « **utilisateur** ».

#### 2.3.1.4 Les cas d'utilisation

On peut les résumer en trois groupes :

- **La simulation de la dynamique sur l'ensemble de la concession :**  
cette catégorie regroupe toutes les services qui entrent en jeu dans la simulation de l'évolution de la forêt à savoir :
  - Entrer les paramètres de dynamique
  - Fournir des données d'inventaire
  - Charger les données SIG des assiettes de coupes de la concession
  - Fournir les paramètres de simulation et d'exploitation
  - Sauvegarder les paramètres de simulation et d'exploitation



**FIGURE 15:** diagramme de cas d'utilisation « simuler la dynamique forestière »

— **L’acquisition et la validation des entrées de la simulation.**

Le deuxième groupe se charge de valider les données entrées par l'utilisateur :

- Vérifier la forme et le contenu des paramètres de dynamique
- Vérifier le format des données d’inventaire
- Contrôler l’adéquation des fichiers d’inventaires aux paramètres de la dynamique (adéquation espèces inventoriées et espèce de dynamique, calcul des indicateurs initiaux de biomasse, volume, effectifs initiaux ...)

— Vérifier la validité des données spatiales de la concession

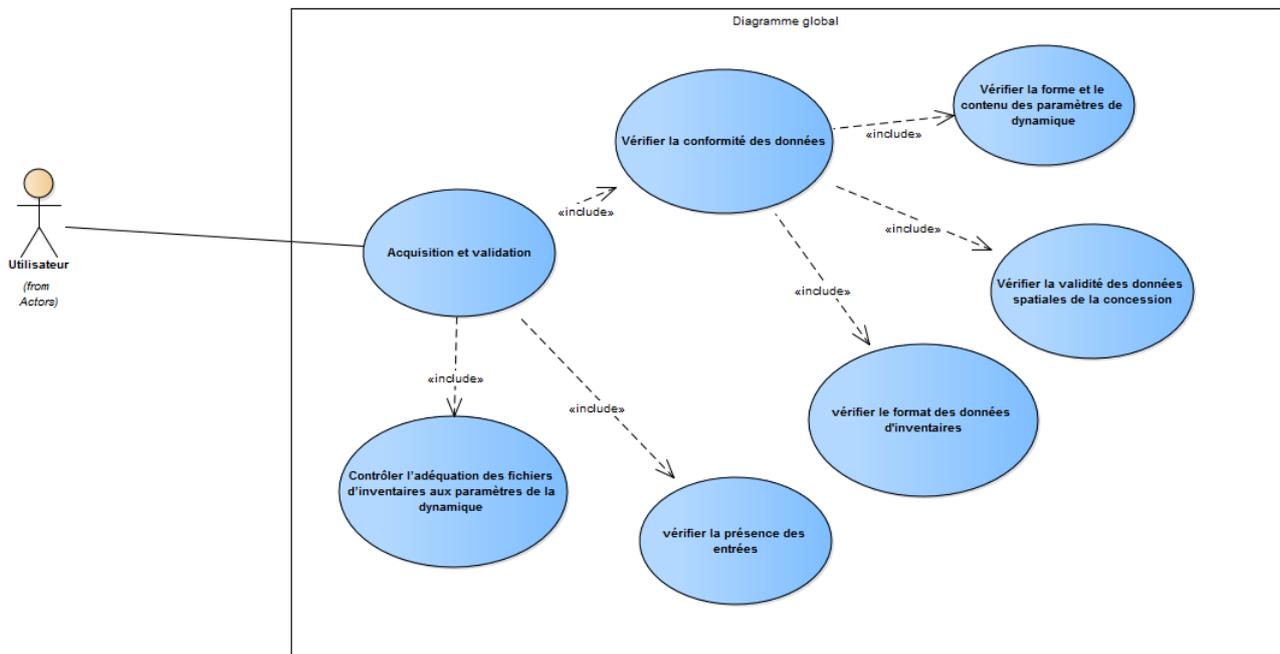


FIGURE 16: Diagramme de cas d'utilisation « Acquisition et validation des données »

— **Calcul des intervalles de confiance et Visualisation des indicateurs**

Elle concerne l'exploitation des résultats de simulation pour fournir à l'utilisateur une interface de gestion présentant la valeur des indicateurs et leur évolution dans le temps de simulation.

- Visualiser un indicateur : consulter sa courbe d'évolution ainsi que les données générées par les simulations et qui ont servi à construire la courbe
- Visualiser sur un fond de carte de la concession, avec les statistiques résultats de la simulation dans chaque assiette de coupe (effectif pour l'espèce simulée, taux de reconstitution, volume, Exploitation)
  - Pour une année donnée
  - Sur toute la durée de la simulation comme un film temporel
- Exporter les résultats (graphes, données, carte)

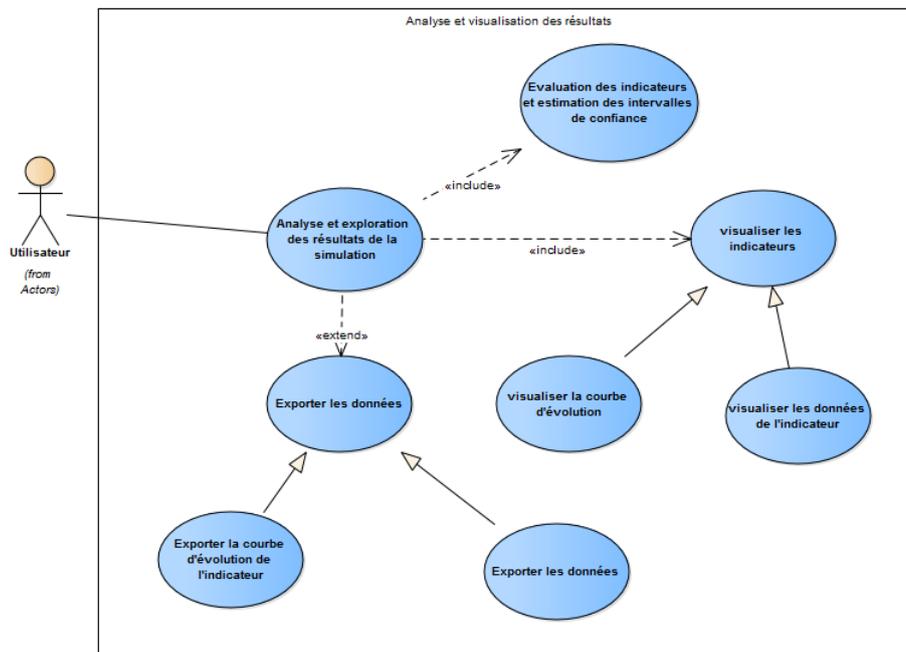


FIGURE 17: Diagramme de cas d'utilisation « calcul et visualisation des indicateurs »

## 2.3.2 Diagrammes d'analyse

### 2.3.2.1 Diagrammes d'activités

**Simuler la dynamique forestière** Le diagramme d'activités du cas d'utilisation "simuler la dynamique forestière" représente la séquence d'action à suivre pour effectuer une simulation de la dynamique d'un peuplement d'arbres. Tout d'abord, il faut fournir un fichier de dynamique de type sentier, ensuite les données d'inventaires de la concession entière. Les données acquises sont vérifiées et validées par le système. Après, l'utilisateur doit donner en entrée les fichiers cartographiques de la concession, le logiciel calcule les effectifs initiaux pour chaque classe de diamètre et pour chaque espèce présente dans le fichier de dynamique. L'utilisateur doit ensuite entrer les paramètres de simulation enfin d'exploitation. Il peut dès lors lancer la simulation. Le processus est effectif si les vérifications des entrées ne renvoient aucune erreur sinon on revient sur le point aberrant.

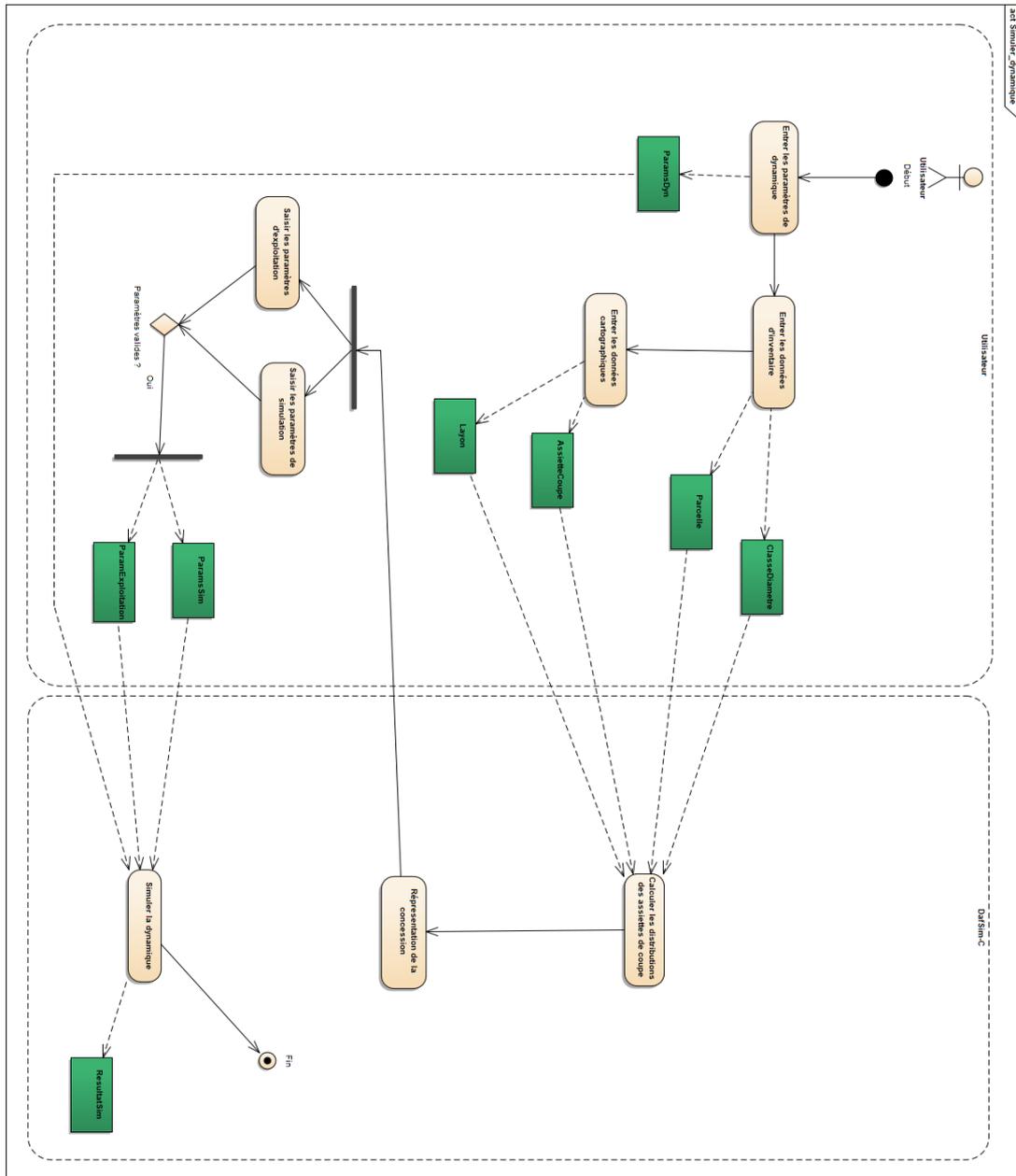
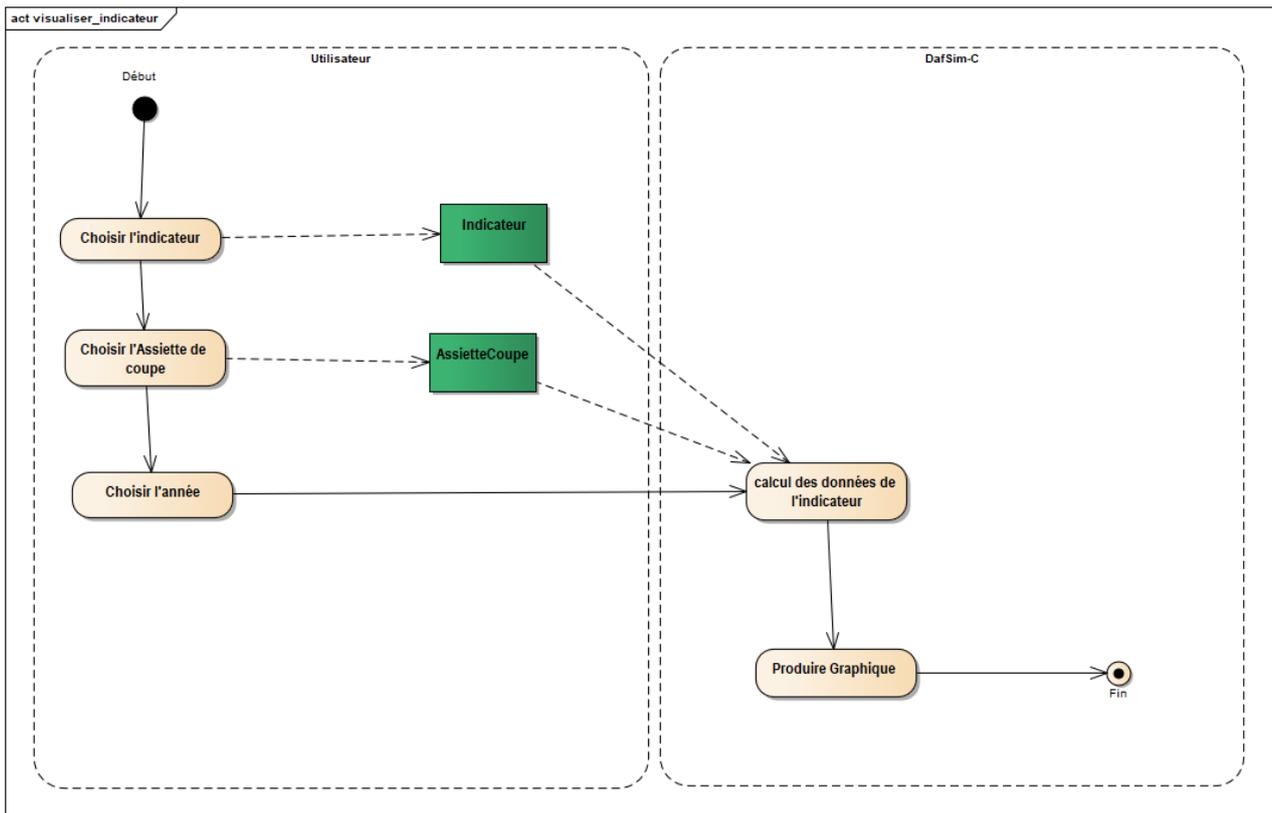


FIGURE 18: Diagramme d'activités « simuler la dynamique »

**Visualiser un indicateur** Visualiser un indicateur revient, à consulter sa courbe et ses données qui ont servi à la produire. En premier, il faut choisir l'indicateur puis l'assiette de coupe, la plage de diamètre et enfin l'année. Après validation, une vérification est effectuée et s'il n'y a pas d'erreurs, l'indicateur est calculé et affiché à l'utilisateur. Le cas contraire, le logiciel retourne au choix des paramètres et indiquant l'erreur survenue. Le schéma suivant représente la séquence d'actions décrites.



**FIGURE 19:** Diagramme d'activités « visualiser un indicateur »

**Visualisation du SIG** L'utilisateur peut visualiser un rendu statique de la concession à une année donnée. Pour cela, il doit choisir l'indicateur à visualiser, la plage de diamètre et il clique sur le bouton pour lancer l'affichage. S'il veut consulter un film temporel, il devra choisir l'option 'animation' dans les paramètres, puis l'indicateur et la plage de diamètre et enfin cliquer sur le bouton de visualisation. Le diagramme d'activités correspondant est le suivant :

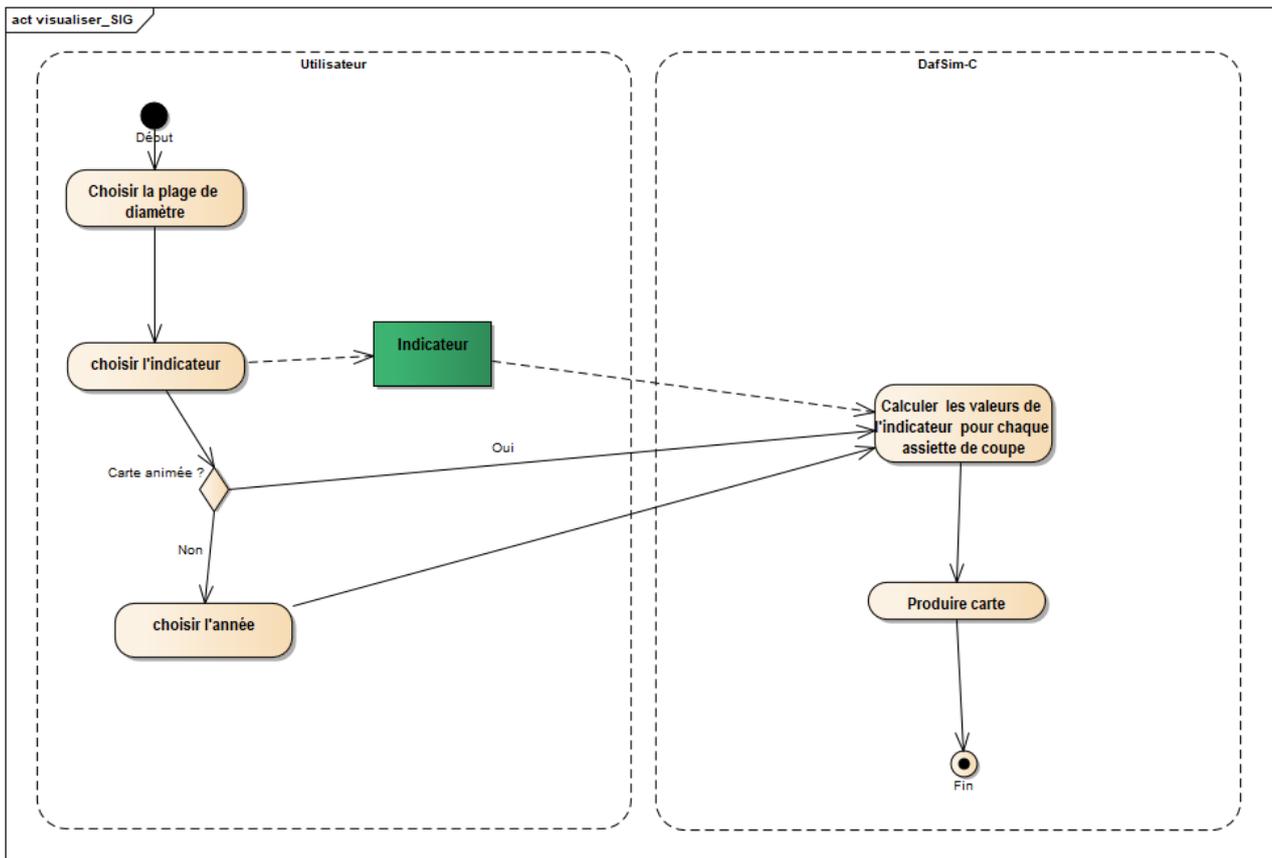


FIGURE 20: Diagramme d'activités « visualiser SIG »

2.3.2.2 Modélisation des données

De l'analyse effectuée, on peut ressortir les classes suivantes :

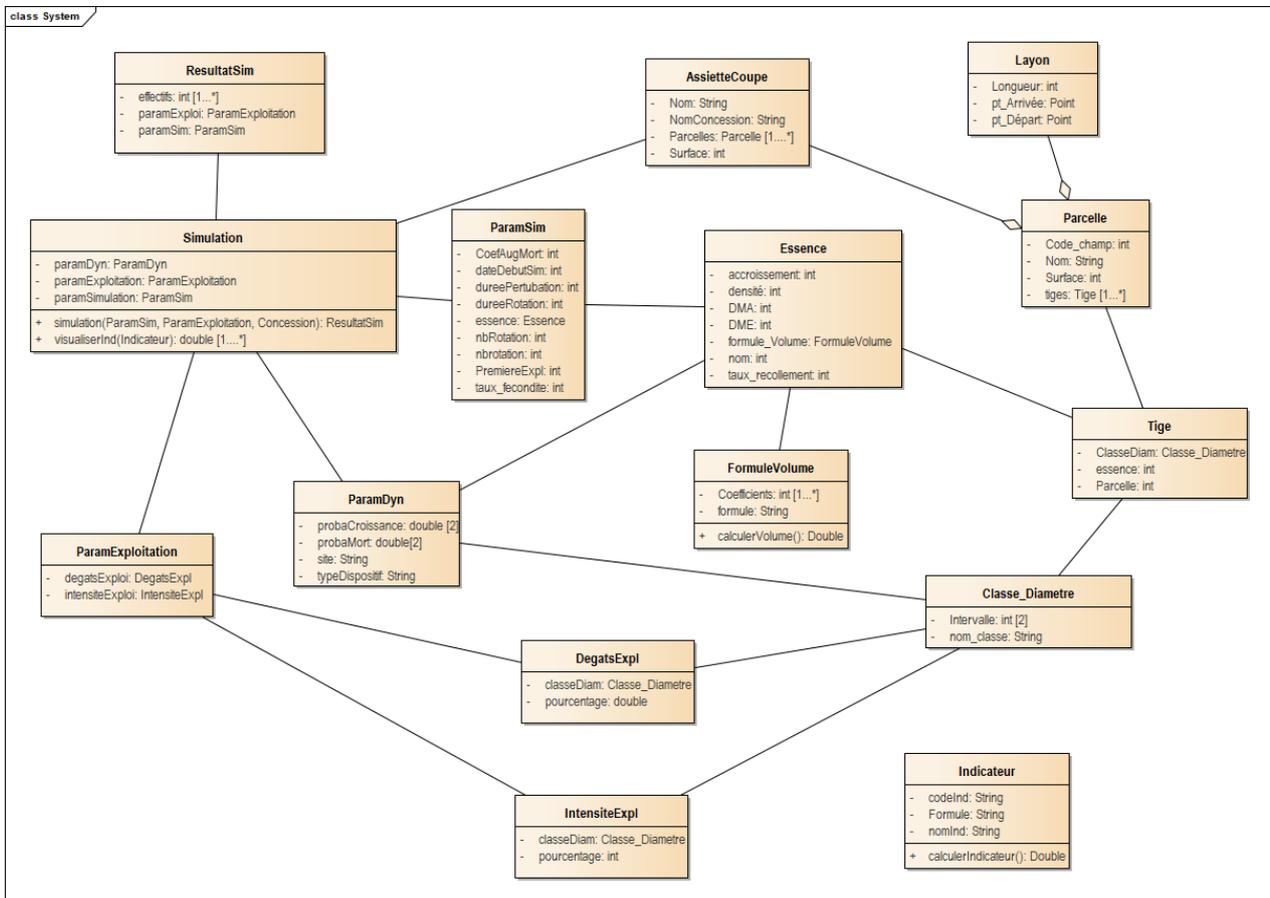


FIGURE 21: Diagramme de classes

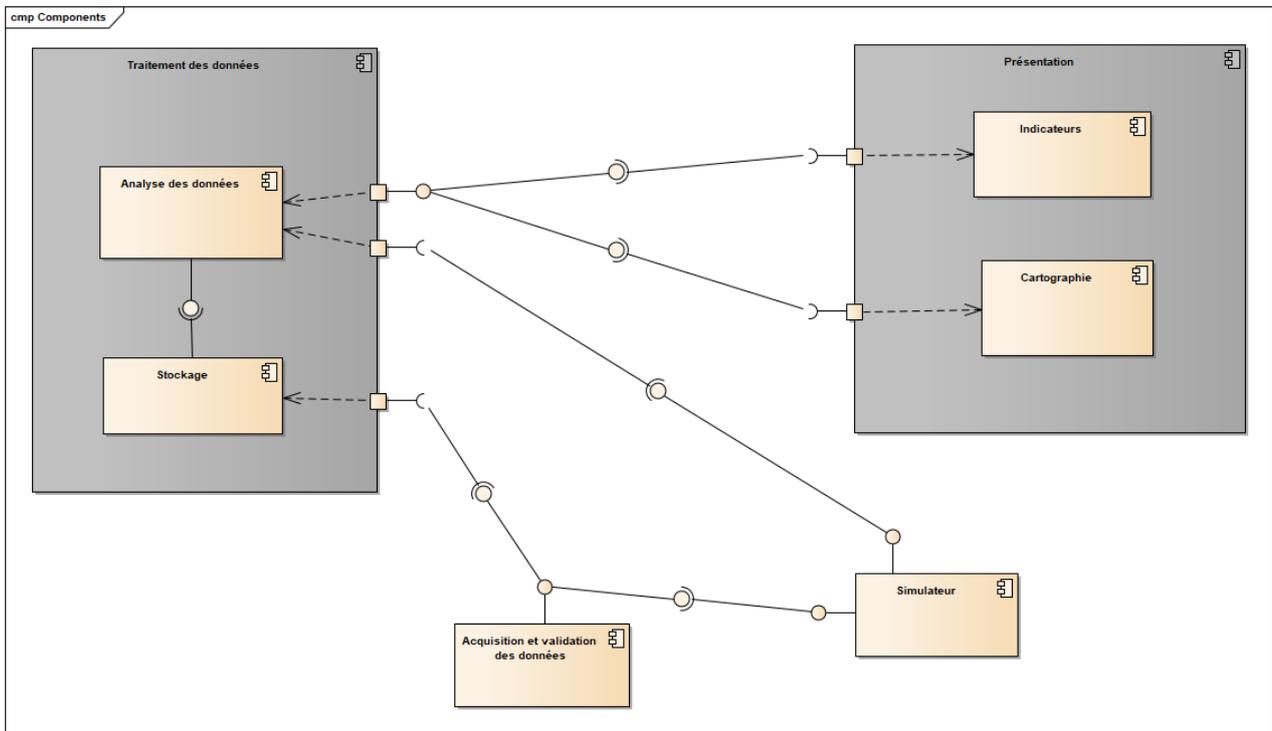
2.4 Conception de la solution

2.4.1 Architecture logicielle de la solution

Dans le but de respecter la contrainte de modularité et de diminuer la complexité, l'application a été divisée en plusieurs composants logiciels comme suit :

- Le bloc **traitement des données** qui contient
  - le module Analyse de données pour les calculs des indicateurs;
  - le module Stockage chargé de sauvegarder et de recharger au besoin les données.
- le bloc de **présentation** constitué de deux modules :
  - Module Indicateur chargé de la représentation graphique des indicateurs;
  - Module Cartographie chargé de la représentation des cartes thématiques de la concession.
- le Composant **Simulateur** : il est chargé d'effectuer les simulations dans DafSim-C;

— le Composant **Acquisition et vérification** qui s'occupe de valider les entrées de l'utilisateur



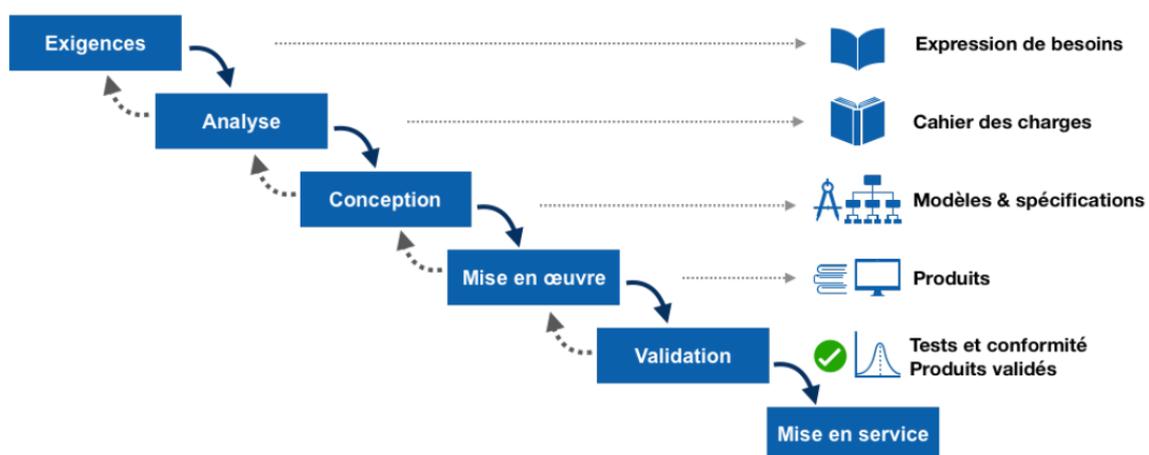
**FIGURE 22:** Architecture logicielle

## 2.5 Bilan du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle de dynamique utilisé dans DafSim-C, l'algorithme de simulation ainsi que les différentes étapes d'analyse et de conception mises au point pour définir les fonctionnalités du logiciel, son architecture ainsi que son interface utilisateur. Il ne reste que l'implémentation et l'évaluation des résultats. Ce problème fera l'objet du prochain chapitre.

## Implémentation et Résultats

**Introduction** Les premières phases de développement de DafSim-C consistaient à définir un cahier de charges avec un planning des tâches à mener. Pour la méthodologie de développement, nous avons opté pour la méthode en cascade car connaissant au préalable toutes les exigences du projet. Le développement s'est fait avec langage R au moyen du framework shiny pour la construction d'applications web sous R. Dans la suite, nous présenterons les outils utilisés et les résultats obtenus. La dernière partie de ce chapitre sera consacrée à l'évaluation de la solution et la formulation de quelques perspectives.



**FIGURE 23:** Méthodologie de développement

## 3.1 Implémentation

### 3.1.1 Outils et technologies

Les outils et technologies nécessaires pour la réalisation de notre travail ont été identifiées à partir de la conception et des contraintes du projet.

#### 3.1.1.1 Langage de programmation

Le but étant de compléter DafSim, le travail sous-jacent relève toujours de traitements statistiques. Il est aussi nécessaire de s'occuper de l'interopérabilité entre les modules. Pour cela, nous avons décidé de continuer le développement avec le langage R. R est un environnement de logiciel libre pour l'informatique statistique et graphique créé par Ross Ihaka et Robert Gentleman. C'est à la fois un langage informatique et un environnement de travail. Les commandes sont exécutées grâce à des instructions codées dans un langage relativement simple, les résultats sont affichés sous forme de texte et les graphiques sont directement visualisés dans une fenêtre qui leur est propre. C'est un logiciel libre et publié sous licence /GNU/GPL.

Pour le stockage des données, nous utilisons les objets **RDS** et **RDATA** de R. En effet, les données à manipuler ne sont pas nombreuses et ne nécessitent pas d'être conservées pendant longtemps ou partagées par des milliers d'utilisateurs. L'utilisation d'une base de données n'est pas nécessaire. Ces objets sont également très utiles en phase de développement car ils peuvent servir à sauvegarder entièrement l'espace de travail.

#### 3.1.1.2 Framework

Pour le développement d'une application web sous R, le framework **Shiny** [Rst17] est très prisé. En effet, il sert à produire des applications web interactives pour l'analyse de données et la communication des résultats [Rst18]. Il simplifie la création de page web avec l'utilisation d'un système de macros encapsulant le code HTML/CSS habituel. La conception d'application web avec shiny sépare au niveau du code le client (fichier ui.R) et le serveur (fichier server.R) responsable du traitement des requêtes clientes et de la gestion des événements. Il est facile d'utilisation et offre de nombreuses facilités de déploiement aussi bien en ligne qu'en local. Tout comme R, il est libre et gratuit.

### 3.1.1.3 Quelques bibliothèques

Pour la réalisation de notre solution, des bibliothèques R sont utilisées notamment pour la production des cartes ou la construction des graphes. Ce sont tous des outils Open Source jouissant d'une large communauté et maintenus continuellement.

Pour le module SIG, nous choisissons de transformer R en serveur cartographique. Pour cela, nous utilisons des extensions de R pour les SIG afin de produire des cartes et permettre à un utilisateur de les visualiser directement dans le logiciel sans toutefois avoir recours à un SIG externe. Comme bibliothèques du projet, nous avons retenu :

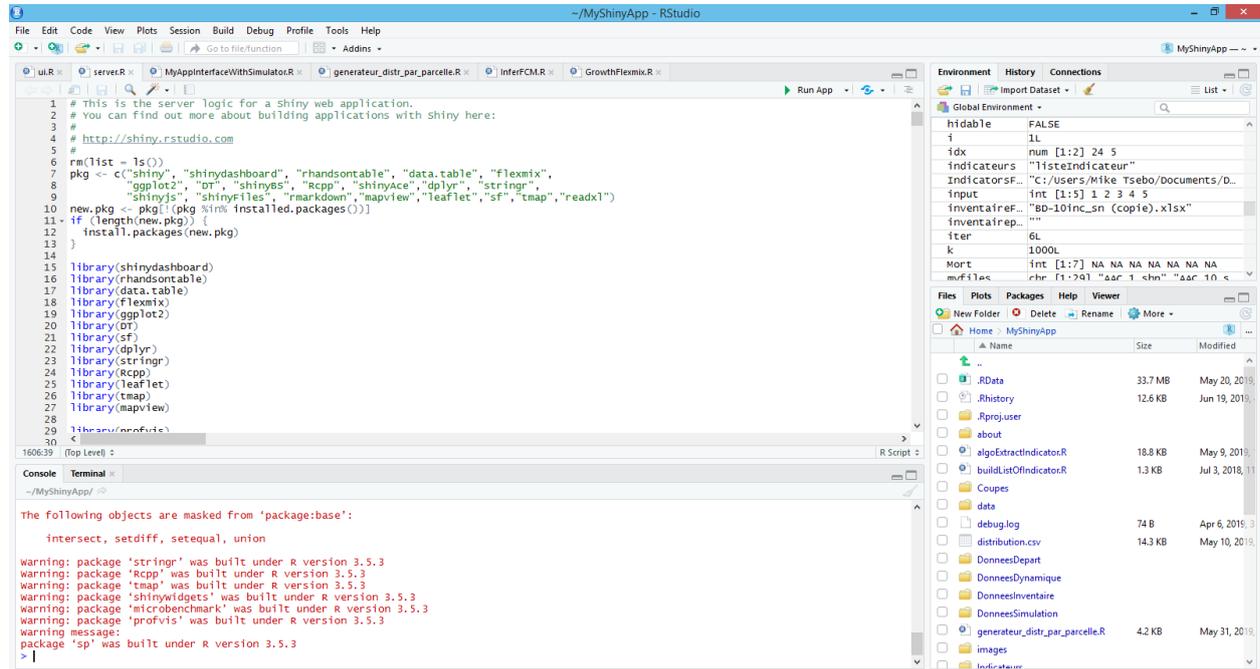
**TABLE 3.1:** Table des bibliothèques R utilisées

Bibliothèques	Description
leaflet et mapview	Production des cartes interactives avec peu de code. Ils transforment R en un serveur cartographique complet. Ils sont facilement intégrables avec un shiny.
sf	Pour simple features, il combine les capacités des paquets sp, rgdal et rgeos. En plus de couvrir plusieurs types de données spatiales (fichiers csv, shapefile, base de données spatiales), il offre un grand nombre de méthodes d'analyses spatiales.
dplyr	Manipulation et analyse des données sous R
ggplot 2	Construction des graphiques
tmap	Représentation des cartes thématiques sous R
rhandsontable	Construction des tableaux interactifs avec shiny
shinydashboard	Extension de shiny pour la construction facile des tableaux de bord
data.table	Package développé par Matthew Dowle, un ancien de Lehman Brothers . L'importation des données volumineuses avec ce package est très rapide. Il a servi à lire et manipuler les entrées utilisateurs comme les données d'inventaires.

### 3.1.1.4 Environnement de développement

L'IDE RStudio [Rst18] est un environnement intégré libre, gratuit et qui fonctionne sous Windows, Mac OS et Linux. Il complète R et fournit un éditeur de script avec coloration syntaxique, des fonctionnalités pratiques d'édition et d'exécution du code (comme l'auto-complétion), un affichage simultané du code, de la console R, des fichiers, des graphiques et pages d'aide, une gestion

des extensions, une intégration avec des systèmes de contrôle de version comme git, etc. Il intègre à la base, divers outils comme Rmarkdown pour la production de rapports au format interactif. Il est en développement actif et de nouvelles fonctionnalités sont ajoutées régulièrement.



**FIGURE 24:** Interface principale de RStudio sous Windows

Pour une présentation plus générale de RStudio on pourra se référer au site du projet : <http://www.rstudio.com/>. La documentation de RStudio (en anglais) est disponible en ligne à l'adresse : <https://support.rstudio.com> pour être tenu informé des dernières évolutions de RStudio.

## 3.2 Résultats

Nous présenterons image à l'appui le fonctionnement de DafSim-C en allant de la fourniture des données d'inventaire à la visualisation en passant par l'ajout et la validation des paramètres de simulation.

### 3.2.1 Scénario d'utilisation

Mr. X est un exploitant forestier possédant une concession forestière dans l'EST du Cameroun. Comme les codes forestiers l'exigent , il doit fournir avant toute activité d'exploitation, un plan d'aménagement qui informe de la composition et de l'état de la ressource mais aussi des pratiques sylvicoles qui utilisera pour assurer la durabilité du bois d'oeuvre. Muni de ses données d'inventaires et de cartographie de sa concession, il souhaite à travers DafSim-C tester quelques scénarios d'exploitation et évaluer la possibilité de sa concession dans le temps. Selon ses prévisions financières, l'assaméla se vend bien sur les marchés ses dernières années et il en possède abon-

damment dans sa concession. Il souhaite donc simuler la dynamique de cette espèce à travers DafSim-C pour affiner son plan d'aménagement. Pour cela, il doit passer par les étapes ci-après.

### 3.2.2 Prérequis d'utilisation

La solution développée s'installe simplement comme un logiciel de bureau et est utilisable à partir d'un navigateur, Internet Explorer 11 ou Chrome de préférence. Pour l'utiliser, Mr. X doit disposer d'un ordinateur de bureau doté d'un navigateur web et avec de bonnes capacités de calcul afin d'assurer son bon fonctionnement et d'éliminer les risques de plantage.

### 3.2.3 Présentation du logiciel

#### 3.2.3.1 La page d'accueil

La page d'accueil présente le logo de l'application (au centre de la vue) ainsi que les différents onglets de navigation sur le côté gauche et puis le titre du logiciel en haut à gauche.

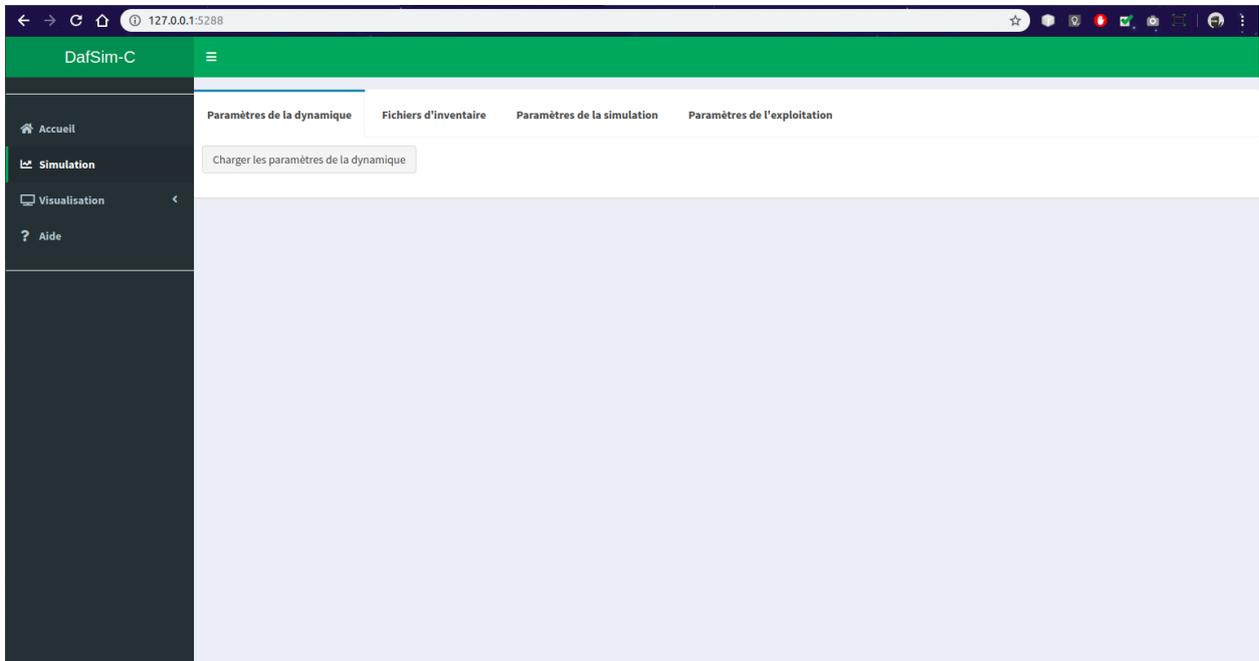


**FIGURE 25:** Page d'accueil de DafSim-C

A partir de cette page, Mr. X peut accéder aux menus de simulation et de visualisation ainsi qu'à la page d'aide qui récapitule le fonctionnement du logiciel et donne des orientations sur son utilisation.

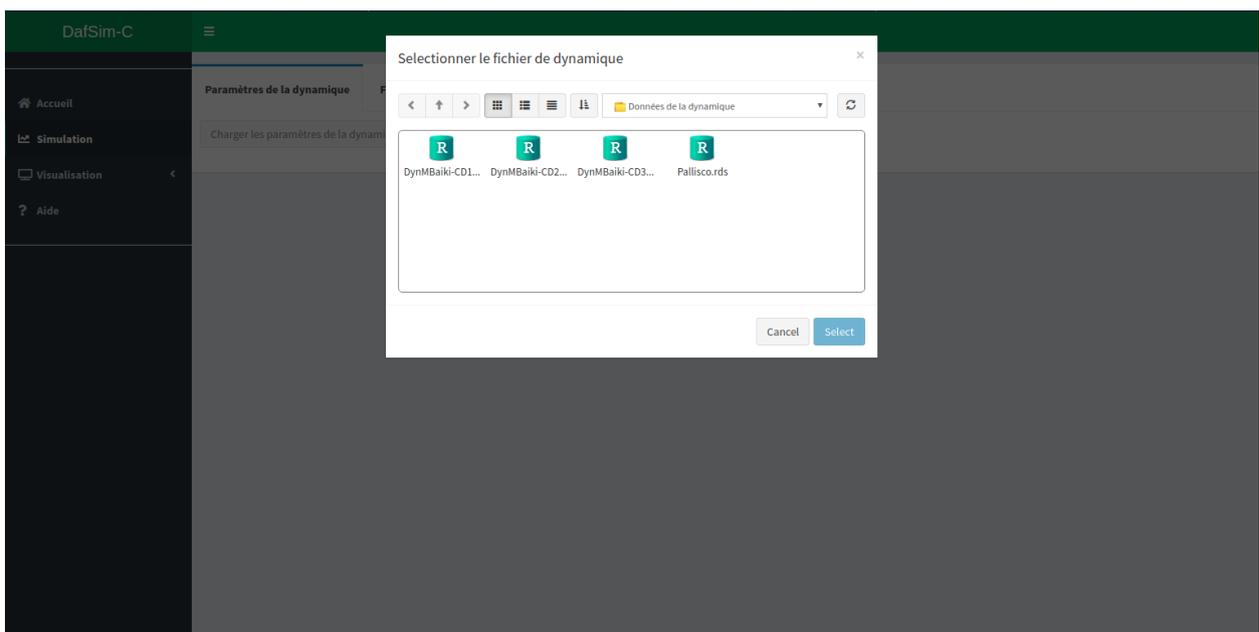
### 3.2.3.2 Module de simulation

**Saisie des paramètres de dynamique et données d'inventaire** La première étape pour réaliser une simulation de la dynamique forestière est de fournir les paramètres de dynamique à l'application. Pour se faire, aller au menu simulation, la page de l'image 26 s'ouvrira.



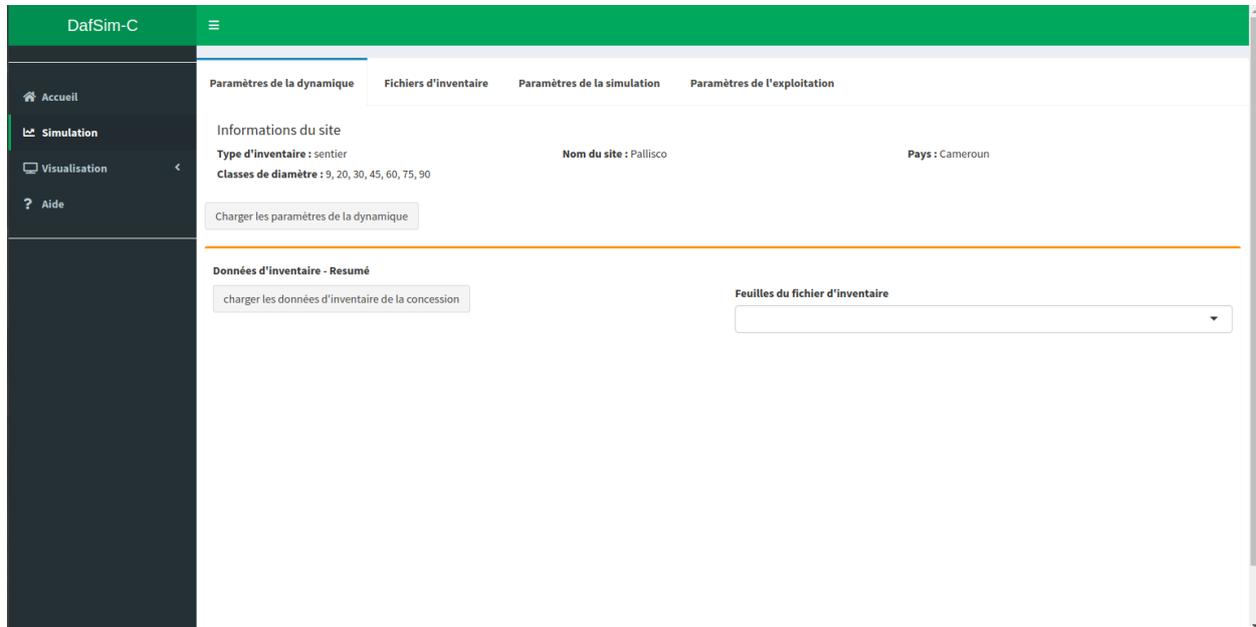
**FIGURE 26:** Première page onglet de Simulation

Ensuite choisir un fichier de dynamique de type sentier car c'est avec celui-là que DafSim-C fonctionne. Pour ce scénario, Mr X. choisit le fichier de Pallisco fourni par défaut dans DafSim-C qui décrit la croissance de quelques espèces commerciales dont l'Assaméla.



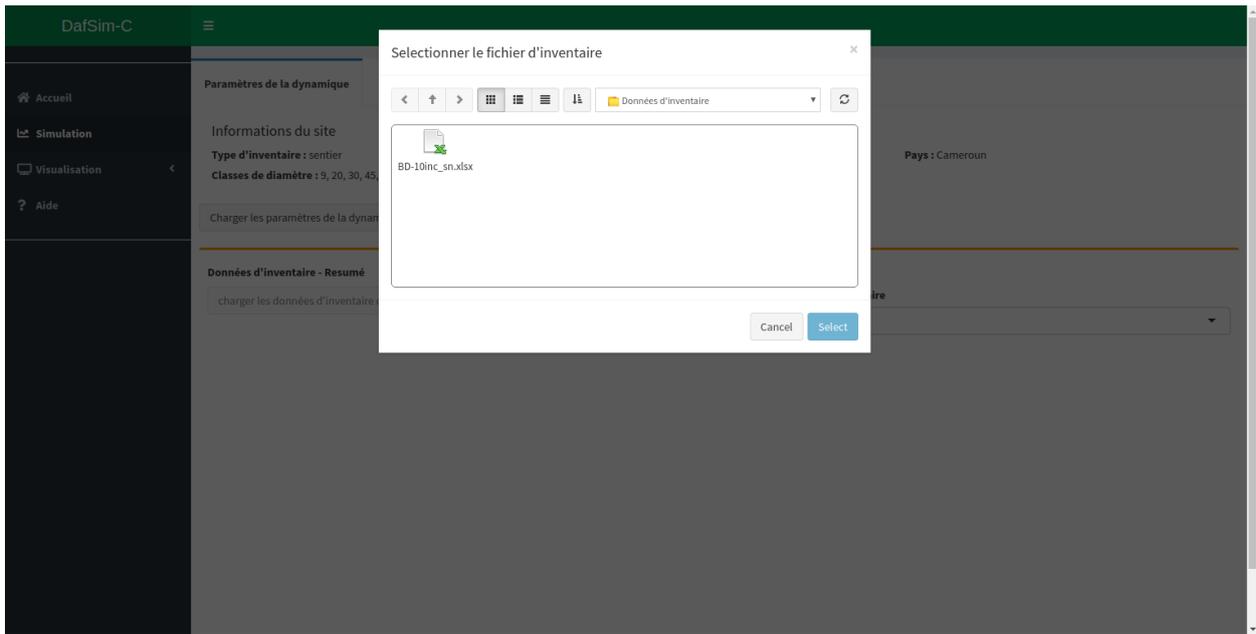
**FIGURE 27:** Choix des paramètres de dynamique

Plus tard, le logiciel offrira la possibilité à l'utilisateur de calibrer, à partir des données collectées lors des campagnes d'étude sur sa concession, un modèle de dynamique des espèces qu'il souhaite suivre et exploiter. Après l'import des paramètres de dynamique, une nouvelle page s'ouvre et invite Mr. X à fournir un fichier d'inventaire au format xlsx.



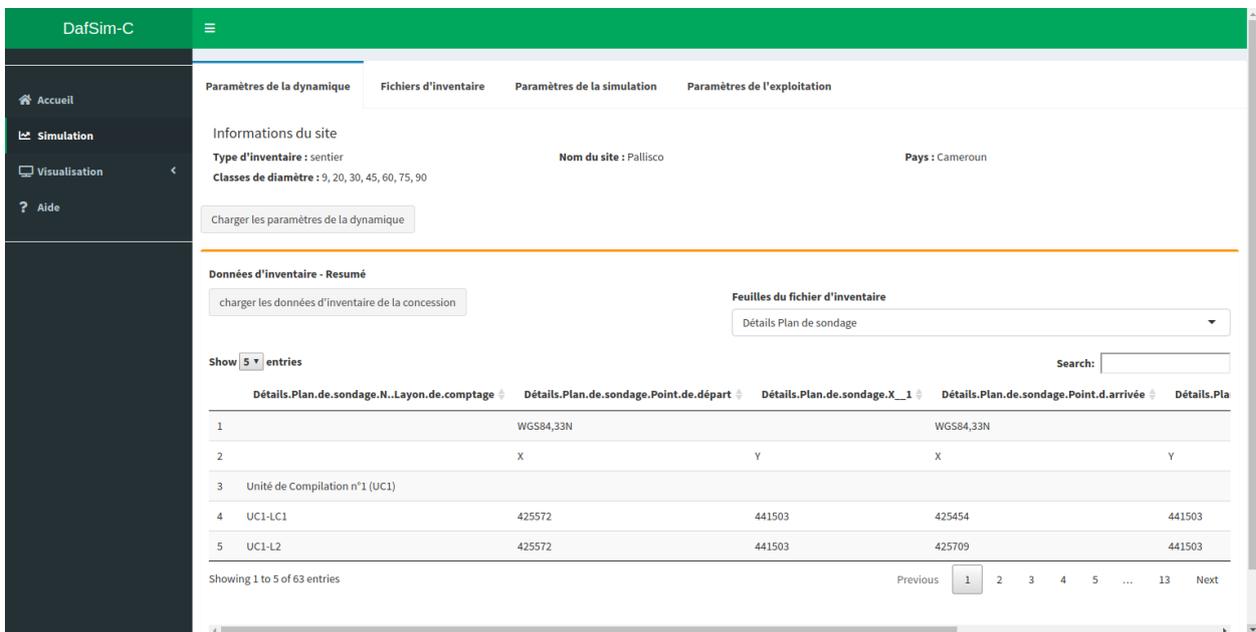
**FIGURE 28:** Description du Site

Mr. X importe le résultat de ses travaux d'inventaire.



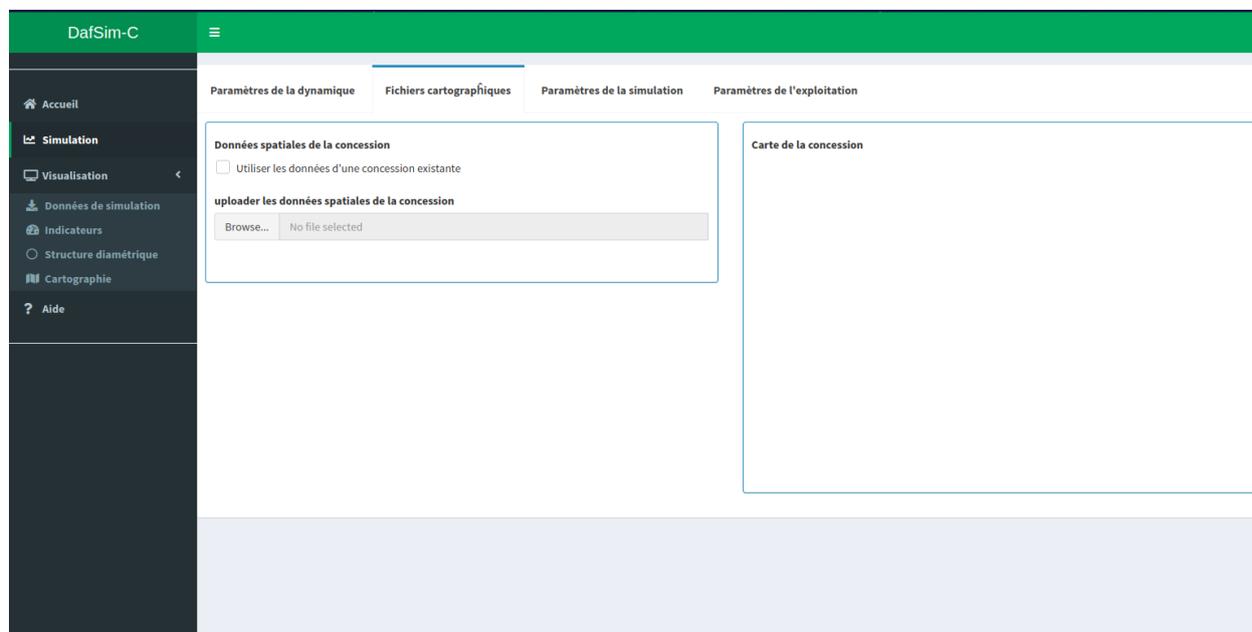
**FIGURE 29:** Choix du fichier d'inventaire

Après le choix des données d'inventaire, l'application présente le contenu du fichier uploadé à Mr. X pour consultation. Il peut consulter les différentes rubriques de son fichier dans le tableau dressé en bas de la page.



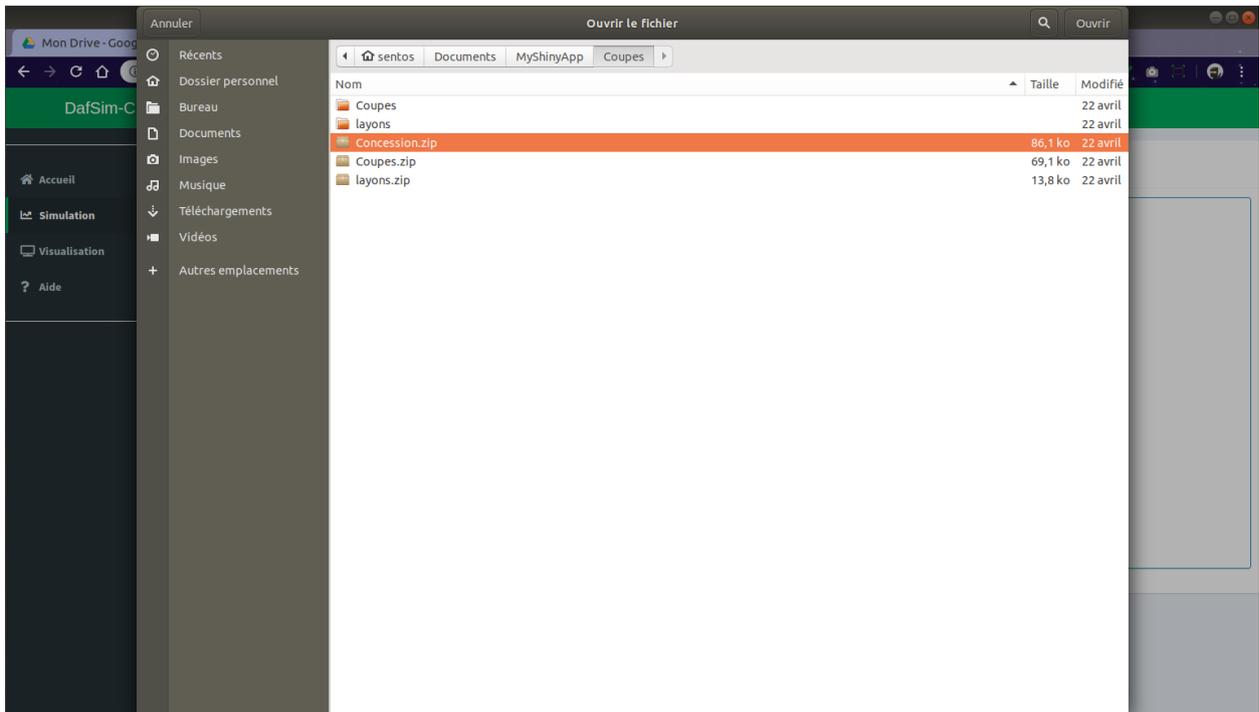
**FIGURE 30:** Présentation fichier d'inventaire

Le paramètre restant est le fichier au format zip des données cartographiques de la concession. Pour le fournir, Mr.X passe au deuxième onglet ('fichiers d'inventaire'), la page suivante s'ouvre et invite ce dernier à fournir sous format zip les données spatiales de sa concession. A l'intérieur de ce fichier, l'on devra trouver un dossier **Coupes** contenant les shapefiles des AACs et un autre dossier **layons** contenant les fichiers cartographiques (shapefiles) des éléments secondaires de la concession comme layons de comptage, point de départ des layons ayant servi à l'inventaire.



**FIGURE 31:** Onglet chargement des données cartographiques

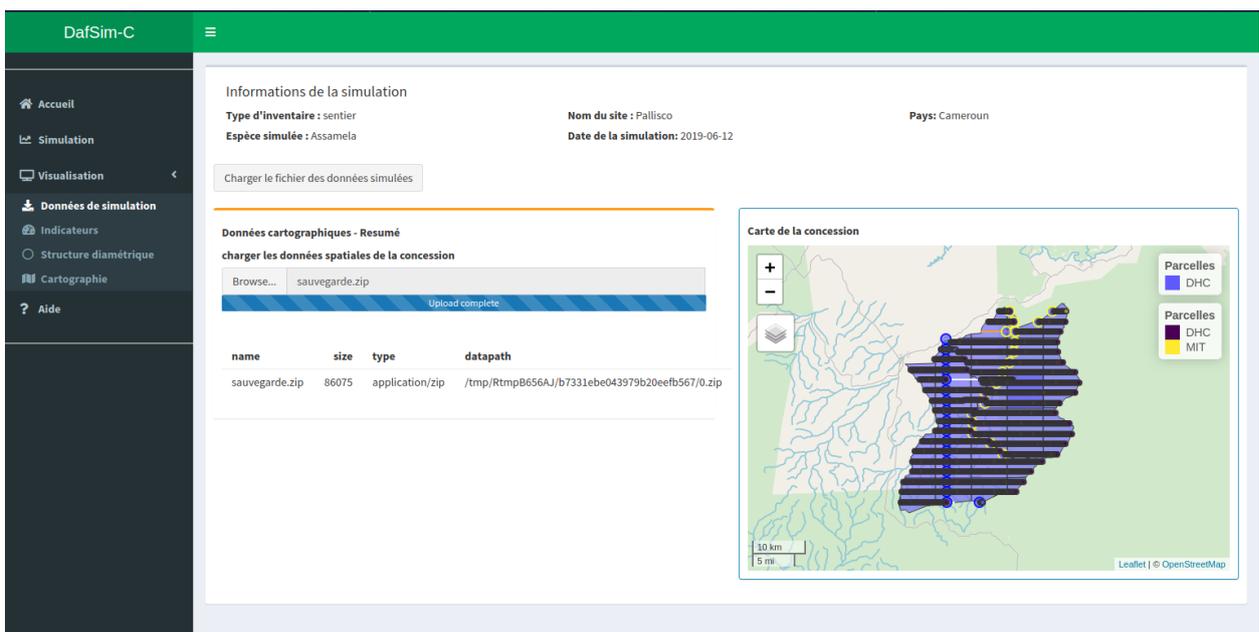
La figure suivante illustre le choix du fichier **concession.zip** de l'exploitant formaté comme précédemment.



**FIGURE 32:** Choix fichier zip des données cartographiques de la concession

Le chargement terminé, le logiciel calcule les positions des parcelles d’inventaire, sélectionne les espèces à suivre ainsi que les classes de diamètres en fonction du fichier de dynamique et détermine leurs distributions par parcelles et ensuite par assiette annuelle de coupe enfin représente la carte de la concession en assemblant les assiettes annuelles de coupe, les layons de comptage et les parcelles calculées.

Un exemple de résultat est illustré sur la figure 33. Il est possible de désactiver la couche des parcelles pour mieux visualiser la concession. De même, Mr. X peut naviguer sur la carte, zoomer et dézoomer. La carte est représentée ici à titre d’illustration et de validation par l’utilisateur.



**FIGURE 33:** Insertion de la carte de la concession

**Entrée des paramètres de simulation** Par la suite, il faut entrer les paramètres de simulation. En premier, Mr X choisit l'assaméla comme espèce à simuler. Le logiciel calcule, à partir du fichier d'inventaire, les effectifs initiaux de l'espèce par classe de diamètre et remplit le tableau des effectifs initiaux. Des paramètres par défaut sont fournis et l'utilisateur peut décider de ne pas les modifier. Cependant, il est nécessaire de donner le taux de fécondité de l'espèce de même que les pourcentages de fécondité par classe de diamètre (en bas à droite) pour le calcul de l'API de Dimako et faire les simulations. Des paramètres par défaut sont fournis au lancement de l'application.

**Choix de l'espèce**  
 Espèce à simuler: Assamela

**Vecteur des effectifs initiaux de l'espèce par classe de diamètre**

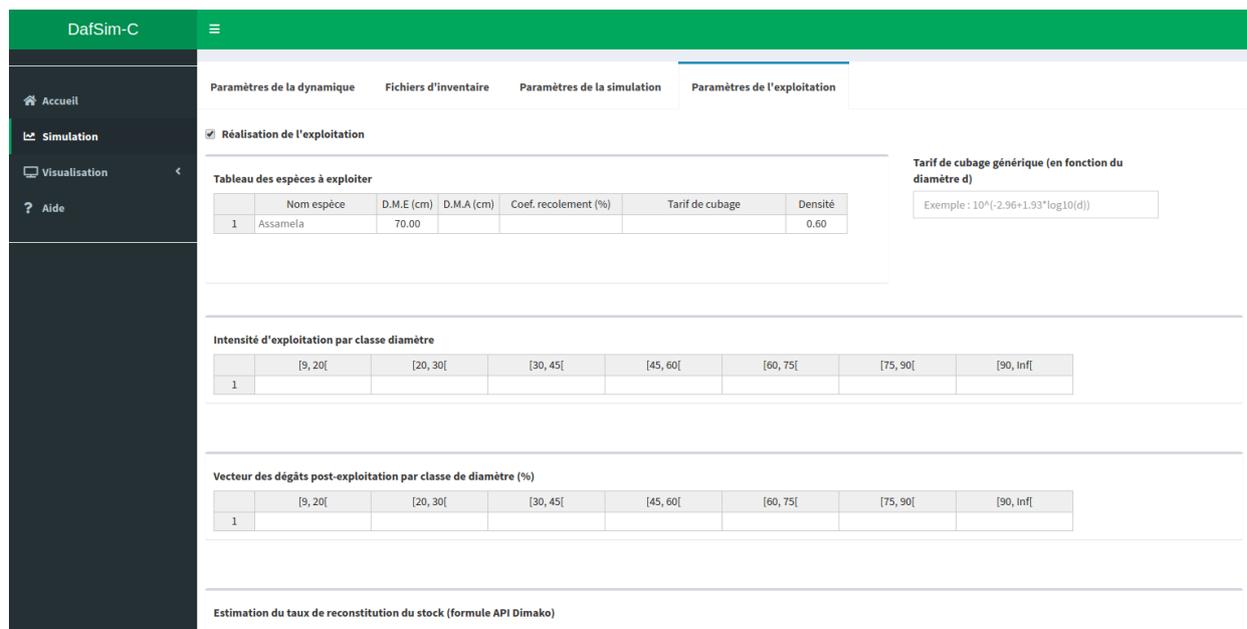
	[9, 20[	[20, 30[	[30, 45[	[45, 60[	[60, 75[	[75, 90[	[90, inf[
1	22075	8027	2508	3010	1505	0	0
2	149614	48051	16381	12012	7644	3276	2184
3	102655	30578	12012	2184	3276	1092	0
4	99551	38872	15169	1896	2844	0	0
5	1437	718	359	179	0	0	0
6	21328	7802	7282	3121	0	0	0
7	158351	74261	36038	14197	4368	6552	0
8	170435	77570	54626	14202	5462	7647	4370
9	111493	60119	33885	8744	8744	3279	0
10	132019	56735	24003	7637	5455	1091	2182
11	23695	12808	3202	640	640	0	0
12	53814	21754	9732	4579	1144	0	1144
13	941509	380599	170267	80112	20014	0	20014
14	69698	30977	15488	12584	4840	2904	968
15	86280	80819	31672	10921	10921	3276	0
16	151728	65179	45946	20301	10685	4274	0
17	101563	51327	21841	4368	2184	0	0
18	36459	20944	10860	775	0	775	0
19	4806	1831	1602	696	228	0	0
20	11894	4757	4417	2029	679	0	0

**Paramètres de la simulation**

- Année de début de la simulation: 1984
- Année de la première exploitation: 1984
- Nombre de rotations: 2
- Durée d'une rotation: 29
- Nombre de simulations: 100
- Durée de la simulation: 60
- Durée de la perturbation après exploitation: 2
- Durée de la stimulation de la dynamique après exploitation: 8
- Coefficient multiplicatif de la mortalité durant exploitation: 1

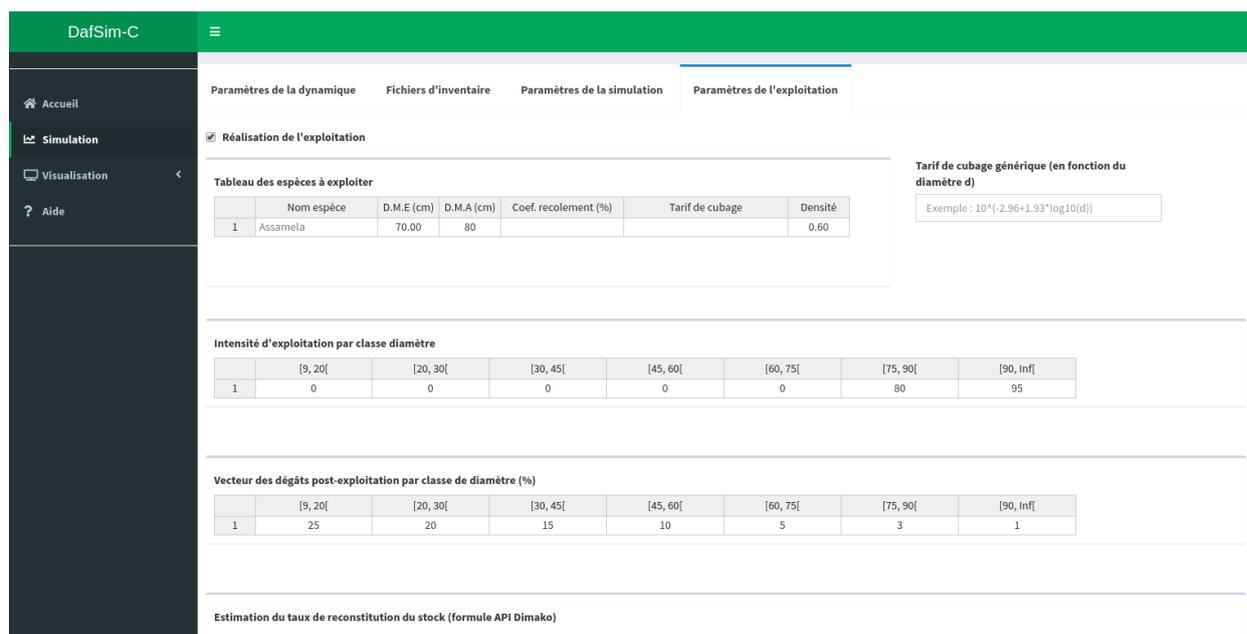
FIGURE 34: Paramètres de simulation de dynamique

**Entrée des paramètres d'exploitation** Mr. X doit à présent spécifier des paramètres d'exploitation (dégâts d'exploitation, DMA, intensité d'exploitation). Les informations comme le DME de l'essence et les standards de dégâts d'exploitation sont fournis par le logiciel.



**FIGURE 35:** Paramètres d'exploitation

Une fois remplie, la page ressemblerait à l'image de la figure 36 :



**FIGURE 36:** Exemple Remplissage Paramètres d'exploitation

Les paramètres d'exploitation fournis, Mr. X peut calculer le taux de reconstitution du stock selon la formule de l'API de DIMAKO ou alors lancer la simulation.

L'opération de simulation ne prend que quelques secondes.

Une fois terminée, il peut consulter les résultats dans le menu de visualisation.

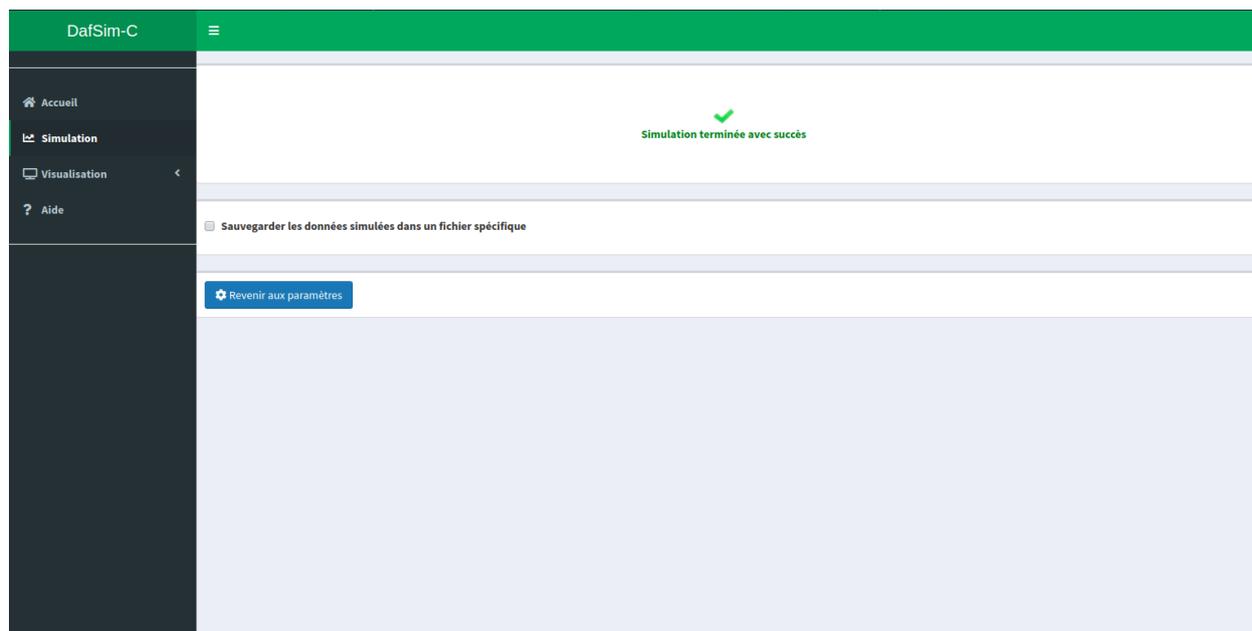


FIGURE 37: Simulation terminée

### 3.2.4 Module de visualisation

**Taux de reconstitution du stock par l'API de Dimako** Le taux de reconstitution du stock selon la formule de l'API DIMAKO est calculé pour chaque assiette de coupe et présenté comme sur la figure ci-dessous.

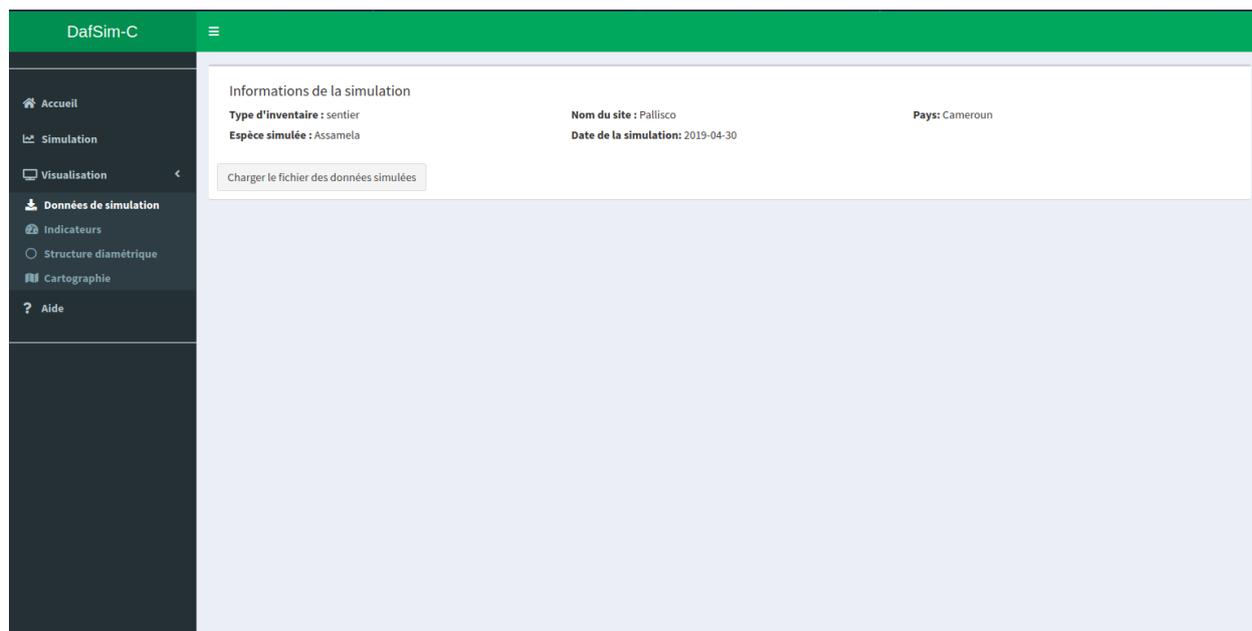
Estimation du taux de reconstitution du stock (formule API Dimako)

Vitesse d'accroissement (cm/an)  Taux de mortalité (%)

	Assiette 1	Assiette 2	Assiette 3	Assiette 4	Assiette 5	Assiette 6	Assiette 7	Assiette 8	Assiette 9	Assiette 10	Assiette 11	Assiette 12	Assiette 13	Assiette 14	Assiette 15	Assiette 16	Assiette 17	Assiette 18
1	333.99	112.86	143.56	253.29	0.00	0.00	102.15	68.58	146.60	115.14	273.46	116.57	116.57	127.47	159.96	167.51	333.99	

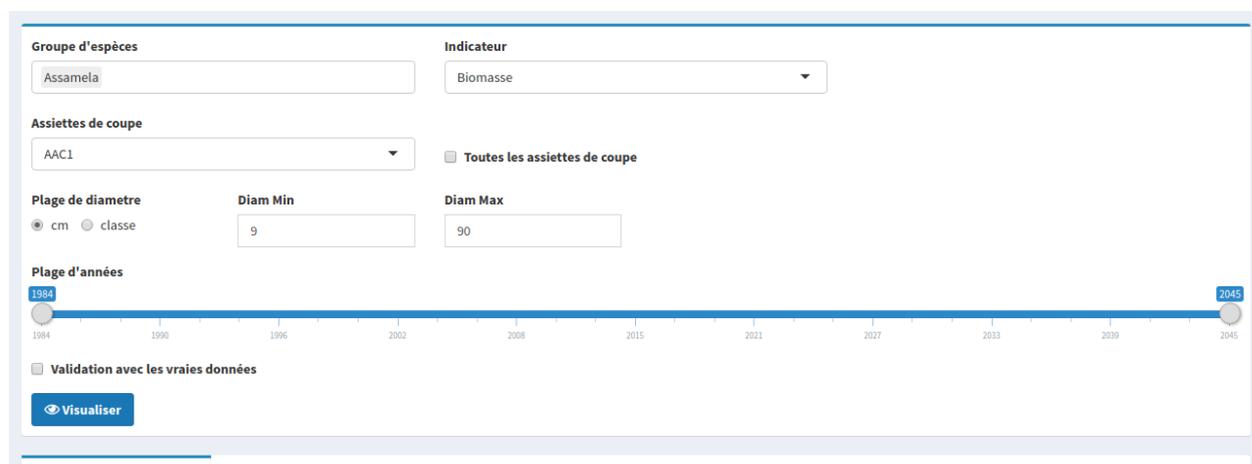
FIGURE 38: Calcul du taux de reconstitution du stock selon la formule de l'API de DIMAKO

**Visualiser un Indicateur** La simulation terminée, le sous menu “Données de simulation” permet de vérifier les informations relatives aux données simulées sans quoi aucun indicateur ne peut être observée.



**FIGURE 39:** Description Site de simulation

La vérification terminée, il faut passer au sous menu « indicateurs ». La page qui s’affiche permet de configurer le calcul et d’afficher la courbe de l’indicateur sélectionné ainsi que des données qui ont servies à générer cette courbe. Mr. X est invité à choisir l’indicateur, l’assiette de coupe, la plage de diamètre et ainsi que la plage d’années.



**FIGURE 40:** Paramètres pour la calcul de l’indicateur

Après représentation, Mr. x peut exporter le graphe obtenu au format **png**, **pdf** ou encore **jpg**. Ou alors de visualiser et/ou exporter les données qui ont permis de générer ce graphe.

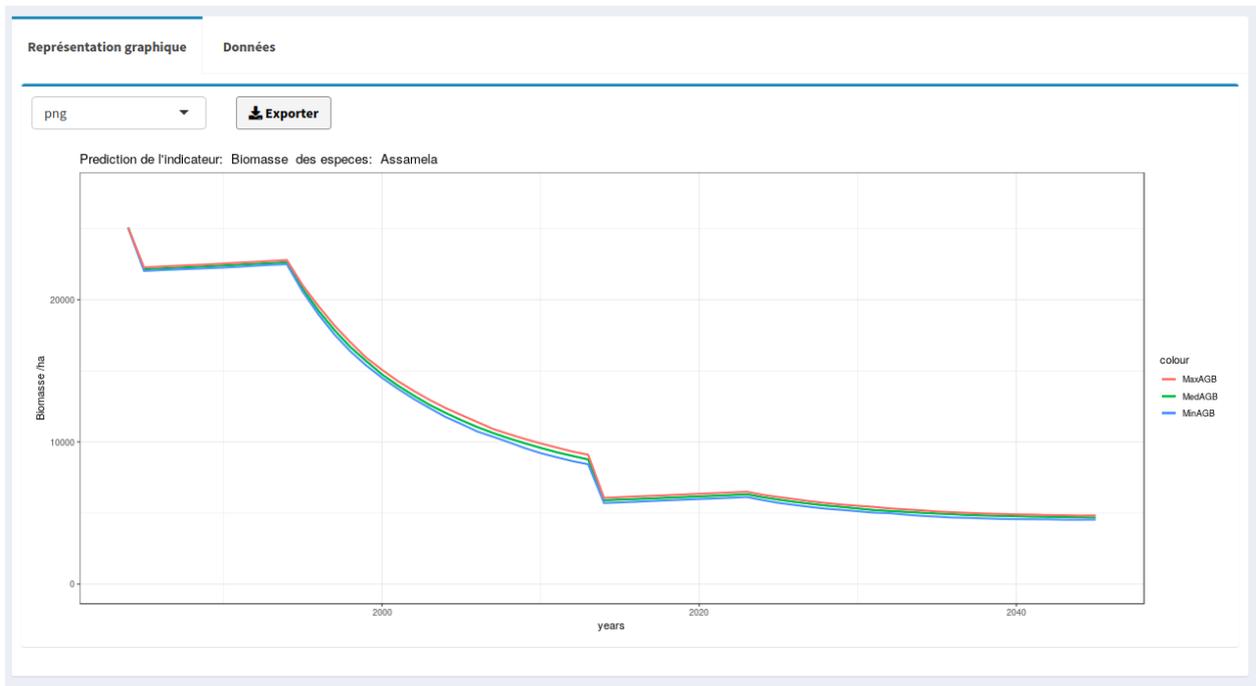


FIGURE 41: Courbe de l'indicateur de biomasse

	Temps	Mediane de AGB	Minimum de AGB	Maximum de AGB
1	1984	25068.6605104513	25068.6605104513	25068.6605104513
2	1985	22152.7138294381	22026.4322027727	22275.95116943
3	1986	22200.3114791606	22083.8969099289	22335.0916785471
4	1987	22251.0795935336	22128.160249481	22389.8249949367
5	1988	22303.3699269019	22175.4032071562	22437.9427699921
6	1989	22362.4821490256	22219.7015551286	22488.8311205577
7	1990	22414.4704205838	22265.2519785451	22548.8299885909
8	1991	22470.3772618315	22326.6131641475	22612.6206529264
9	1992	22530.5122747418	22397.261582154	22669.3122967786
10	1993	22580.0662450202	22455.8014030405	22731.0420494485

FIGURE 42: Données de la courbe

**Visualiser la Structure diamétrique** La structure diamétrique est un indicateur important pour les exploitants . Elle permet à ces derniers de déterminer à vu d'oeil la constitution de l'espèce et ses capacités de renouvellement dans le temps. Pour le visualiser, Mr X doit se rendre au menu **“structure diamétrique”**. Puis il doit choisir l'assiette de coupe et le type de structure à représenter (cumulé ou répartition par classe).

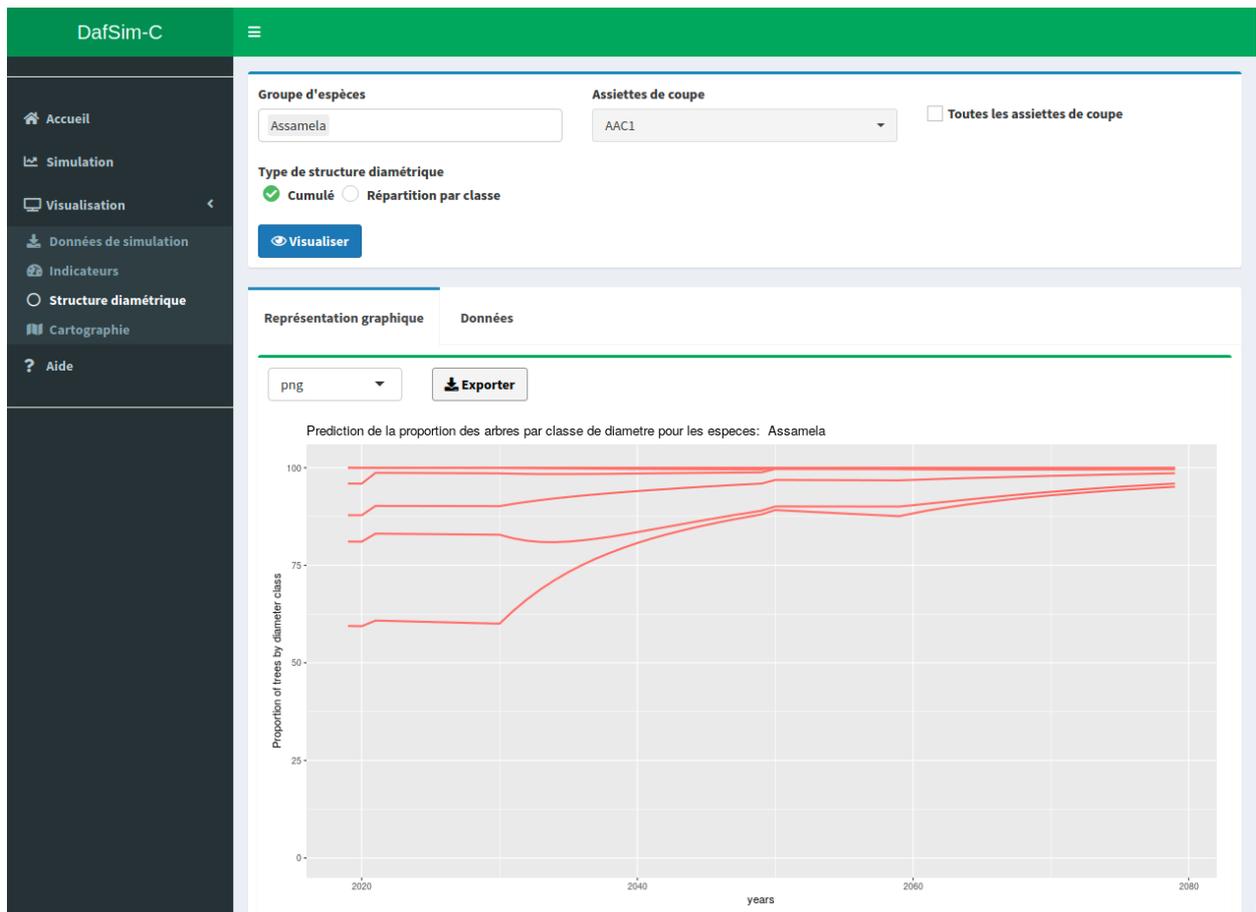


FIGURE 43: Courbe Structure diamétrique cumulé

A côté, il peut consulter les données qui ont permis de générer ce graphique.

Représentation graphique    **Données**

csv    Exporter

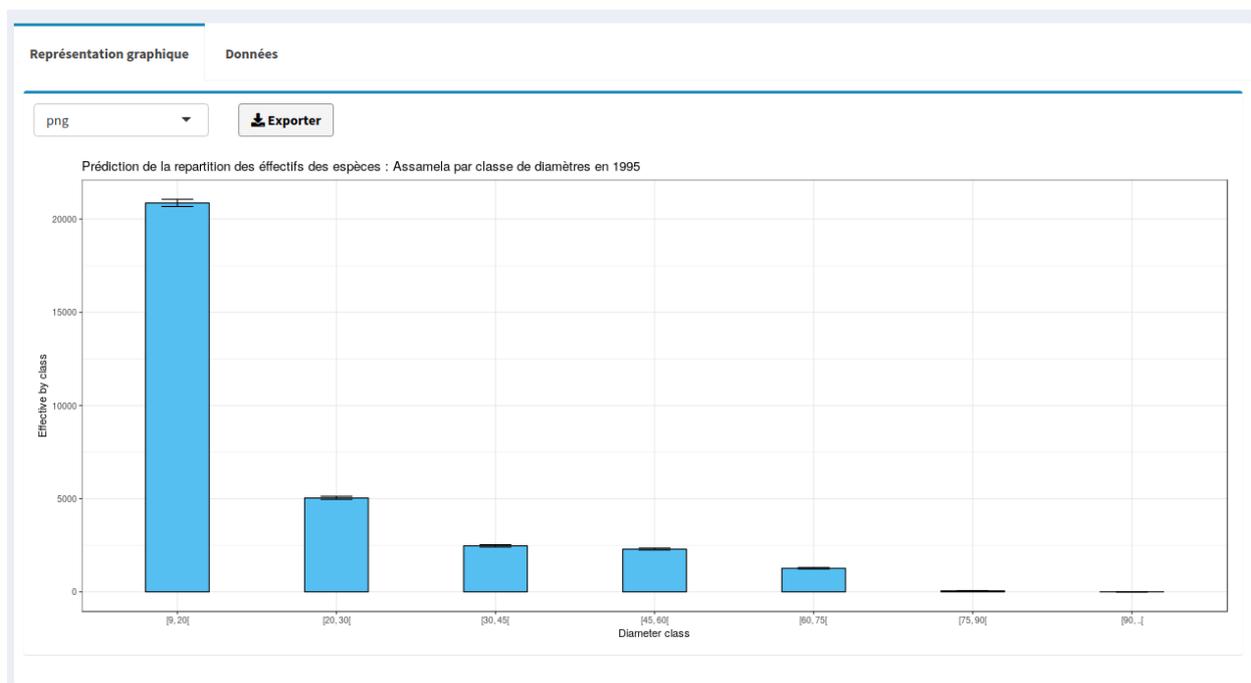
Show 10 entries    Search:

	Temps	Cumul classe 1	Cumul classe 2	Cumul classe 3	Cumul classe 4	Cumul classe 5	Cumul classe 6	Cumul classe 7
1	1984	59.4612794612795	81.0828282828283	87.8383838383838	95.9461279461279	100	100	100
2	1985	57.0839877725423	78.824880512067	86.046511627907	95.1731941700022	100	100	100
3	1986	57.6083333333333	79.0916666666667	86.24	95.23	99.99	100	100
4	1987	58.1246091564362	79.3651054866208	86.4315571207583	95.2835467202054	99.9802521146694	100	100
5	1988	58.6289261166989	79.6386266512845	86.6223616008319	95.3349690460329	99.9707521570284	100	100
6	1989	59.1378895921801	79.9022514221617	86.8103517346367	95.3897924845766	99.9615415431456	100	100
7	1990	59.6140145338252	80.1497712268258	86.9828855500847	95.4387853648497	99.9556702499881	100	100
8	1991	60.0993455068027	80.4042549868008	87.1631859291773	95.4872772145769	99.9453287305331	100	100
9	1992	60.5626417014976	80.6530221941176	87.340561716304	95.5364992211237	99.9383068309761	100	100
10	1993	61.0232983097305	80.8938632556723	87.5072331353738	95.5870260392874	99.9299527942744	100	100

Showing 1 to 10 of 62 entries    Previous 1 2 3 4 5 6 7 Next

FIGURE 44: Données courbe Structure diamétrique cumulée

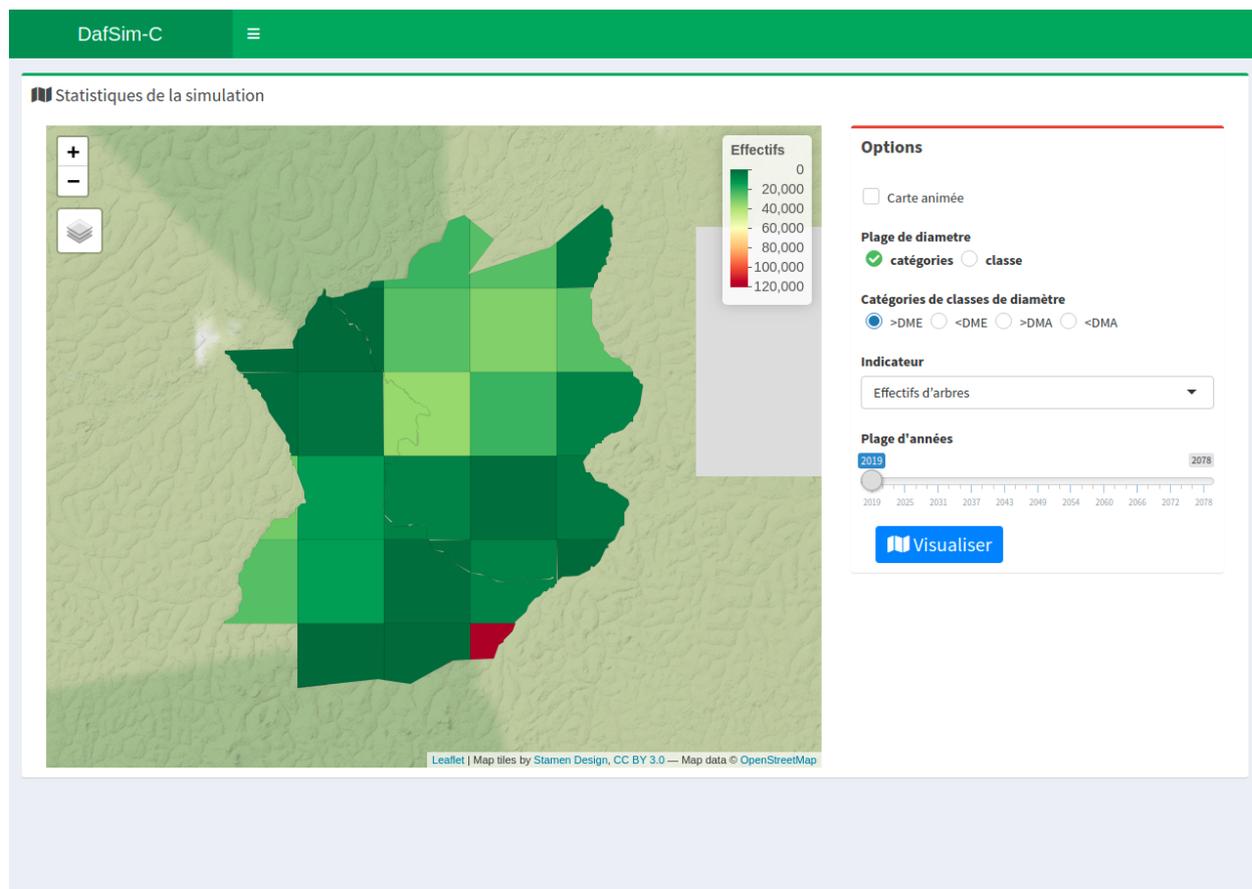
La structure diamétrique de type “répartition par classe” invite à choisir l’année car il est question de calculer la distribution diamétrique de l’espèce sur chaque classe pour une année.



**FIGURE 45:** Données courbe Structure diamétrique par répartition de classe

**Cartographie de la concession** Le module de cartographie offre la visualisation d'un certain nombre d'indicateurs choisis parmi les plus pertinents pour les exploitants. Deux options sont possibles :

- **Visualisation statique** : Pour cette option, l'utilisateur doit choisir les différents paramètres à droite de l'écran et appuyer sur le bouton « visualiser ». Lorsqu'il clique sur une assiette de coupe, l'utilisateur peut consulter les données comme l'effectif, le nombre d'arbres exploités, le volume d'arbres de l'année et la plage de diamètre sélectionnées. Parmi les plages de diamètre, il peut choisir entre des numéros de classes (classe 1,2,3,4...) ou des catégories à savoir (>DME, <DME, <DMA, <DMA). Les indicateurs possibles sont :
  - Le nombre d'arbres exploités
  - Le volume (exploitable)
  - Le taux de reconstitution
  - L'effectif



**FIGURE 46:** Visualisation statique des résultats de la simulation sur SIG

- **Animation de la carte de la concession** : Cette option permet de visualiser un film temporel de la concession durant les années de simulation pour une plage de diamètre choisie et un indicateur donné. Les indicateurs restent les mêmes comme pour une visualisation statique de même que les plages de diamètres. En plus de ces paramètres, l'utilisateur peut choisir entre le nombre de répétitions de l'animation et le temps qui sépare l'apparition des images du film.

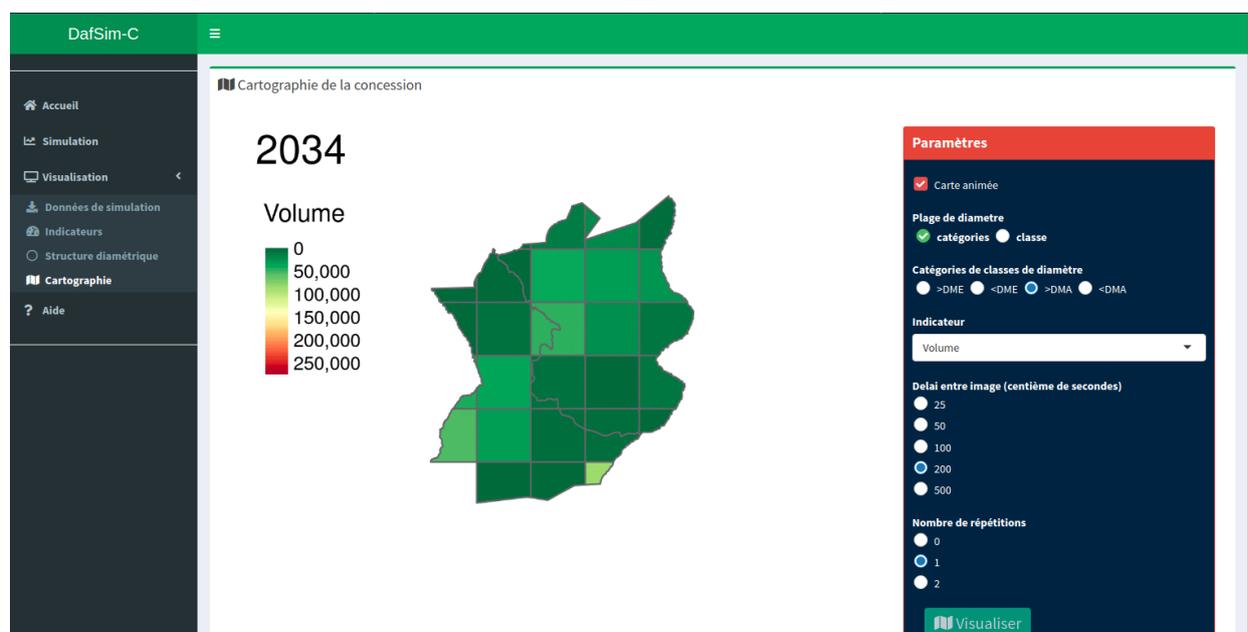


FIGURE 47: Animation temporelle du SIG

### 3.3 Evaluation

#### 3.3.1 Apports de la solution

##### 3.3.1.1 Gain au niveau des concessionnaires forestiers

Ce sont les premiers destinataires de cet outil. Il permettra d'évaluer les risques écologiques, financiers de leur stratégie d'exploitation. De plus, ils pourront désormais produire des plans d'aménagement adéquats conciliant profit économique et gestion durable des forêts du bassin du Congo.

##### 3.3.1.2 Utilité pour les bureaux d'études et centre de recherche en foresterie

Le logiciel sera également diffusé en ligne comme outil de recherche. De ce fait, il pourra aider les bureaux d'études et les centres de recherche dans l'étude des forêts tropicales du Bassin du Congo.

##### 3.3.1.3 Gain pour les administrations forestières du Bassin du Congo

Les administrations pourront désormais suivre et vérifier si les plans d'aménagement fournis par les forestiers sont durables et anticiper sur la dégradation des ressources dont elles sont garantes.

#### 3.3.2 Rappels des objectifs

Le tableau ci-après résume les objectifs à atteindre et les mentions « oui » et « non » portés par notre institution d'accueil pour signifier l'atteinte ou non des objectifs fixés.

**TABLE 3.2:** Table d'évaluation du travail

<b>Objectifs</b>	<b>Accomplissement</b>
Modéliser les activités du concessionnaire forestier	Oui
Définir un algorithme de simulation pour imiter le fonctionnement des forêts soumis aux activités du concessionnaire	Oui
Construire un logiciel de simulation la dynamique forestière	Oui
Permettre la visualisation ses indicateurs forestiers à l'aide de graphiques à l'échelle d'une concession forestière et Assiette Annuelle de Coupe par AAC	Oui
Ajouter un module de SIG pour consulter l'évolution de quelques indicateurs pertinents pour les forestiers	Oui
Construire une interface utilisateur convivial et facile d'utilisation	Oui

### 3.3.3 Critiques et perspectives

#### 3.3.3.1 Critiques :

1. Les distributions d'effectifs par assiette de coupe sont déterminées comme si les différentes espèces rencontrées étaient uniformément réparties sur l'ensemble de la concession ceci faute de données sur les répartitions des espèces. Ce qui ne représente pas exactement les forêts du Bassin du Congo.
2. La construction du film temporel est chronophage. La production des animations par DafSim-C nécessite beaucoup de temps.
3. Les données cartographiques fournies ne permettent pas de réaliser des simulations à une échelle plus basse. Si les données de localisation, ou alors de répartition des essences sur la concession étaient données, l'on pourrait augmenter la précision des calculs.

#### 3.3.3.2 Perspectives

1. Construire et développer un moteur d'inférence pour la production des paramètres de dynamique de type sentier. Cette fonctionnalité permettra à un exploitant de construire un modèle de dynamique directement dans DafSim-C et de le calibrer avec des données de campagne issues de sa concession. Ceci lui évitera de faire un travail de modélisation.

2. Concevoir un module expert pour l'interprétation des indicateurs et la proposition des stratégies d'exploitation pour un rendement défini par l'utilisateur.
3. Coupler DafSim-C à un logiciel de subdivision de la concession en AAC pour permettre de découper la concession en assiettes annuelles de coupe sans utiliser de logiciels externes.
4. Utiliser un réseau de neurones pour prédire l'état de la forêt à partir des observations des années précédentes.

### 3.4 Bilan du chapitre

Ce dernier chapitre portait sur le développement de DafSim-C et la présentation des résultats. La phase d'implémentation débute par le choix des outils de développement à savoir le langage R, quelques bibliothèques et l'environnement de développement. La seconde phase est le déploiement de la solution dans l'environnement de production puis la présentation du logiciel à travers un cas d'utilisation. Le chapitre se termine sur une étape d'évaluation du travail et la formulation de quelques perspectives.

## Conclusion Générale

L'objectif de notre travail était de développer un logiciel de simulation de la dynamique pour l'aide à la gestion des concessions forestières dans le bassin du Congo. L'outil à mettre en place devait permettre aux exploitants de tester leur stratégie d'exploitation afin d'établir un plan d'aménagement forestier durable et rentable. Le problème sous-jacent est la modélisation des activités des concessionnaires forestiers et de la dynamique des forêts tropicales humides. Une première solution DafSim a été mise sur pied lors du projet d'expérimentation DynAfFor mais ce dernier ne prenait pas en compte les activités du concessionnaire et la dimension spatiale de sa concession.

La solution que nous proposons est un logiciel de simulation qui prend des paramètres d'aménagement et d'exploitation en entrée pour présenter l'évolution d'indicateurs forestiers à l'aide de graphiques dont l'interprétation servira à évaluer la rentabilité de la stratégie adoptée. De plus, il prend en compte la cartographie de la concession, réalisée lors des travaux d'inventaire, en proposant un système d'information géographique pour une prise de décision à l'échelle de la concession. La simulation fait appel à des paramètres de dynamique de type sentier qui ont la caractéristique d'appartenir à la famille des modèles de distribution et de ne porter que sur un nombre réduit d'espèces qui retiennent l'attention des exploitants. Les objectifs tels qu'énoncés dans le cahier de charges ont été atteints. Désormais, les exploitants, les bureaux d'étude et les administrations forestières auront à leur disposition un outil pour simuler les forêts du bassin du Congo afin de réaliser chacun ses objectifs. Pour l'exploitant, il peut s'agir de maximiser ses profits à partir d'une stratégie d'exploitation durable. Pour l'administration forestière, il peut s'agir de suivre et vérifier les plans d'aménagement ou mettre à jour les politiques d'aménagement forestières. Et enfin, il peut s'agir de satisfaire des besoins de recherche pour les bureaux d'études en foresterie.

Le travail accompli peut soulever quelques réserves. En effet, la précision des calculs dépend fortement des données qui peuvent être fournies en entrée du logiciel. Pour DafSim-C, les calculs sont réalisés comme si les différentes espèces rencontrées étaient uniformément réparties sur l'ensemble de la concession. Ceci ne reflète pas la réalité des forêts du bassin du Congo qui se pose à cause d'un manque de précision dans les données d'inventaires. Le travail réalisé s'inscrit dans le projet P3FAC (phase 2 de DynAfFor) et sera présenté aux exploitants forestiers du bassin du Congo, en particulier à ceux du Cameroun, par ce biais afin de le faire évoluer selon les perspectives énoncées de façon à mieux répondre à leurs attentes.

# Bibliographie

- [BL92] Sandra BROWN et Ariel LUGO. “Aboveground biomass estimates for tropical moist forest of the Brazilian amazon”. In : *Interciencia* 17 (jan. 1992), p. 8–18 (cf. p. 7).
- [Bro97] Sandra BROWN. “Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: A Primer”. In : *FAO Forestry Paper* 134 (jan. 1997) (cf. p. 7).
- [Cha+07] Jérôme CHAVE et al. “Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 Neotropical tree species”. In : *Ecological applications : a publication of the Ecological Society of America* 16 (jan. 2007), p. 2356–67. DOI : [10.1890/1051-0761\(2006\)016\[2356:RAPVOW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[2356:RAPVOW]2.0.CO;2) (cf. p. 7).
- [CIR13] CIRAD. *Presentation Capsis*. Oct. 2013 (cf. p. 13).
- [CIR14a] CIRAD. *Modèle de dynamique / Produits - Projet Dynaffor*. 2014 (cf. p. 17, 22, 23, 25).
- [CIR14b] CIRAD. *Projet Dynaffor*. 2014 (cf. p. 1, 2).
- [DF97] L DURRIEU DE MADRON et E FORNI. “Aménagement forestier dans l’Est du Cameroun: Structure du peuplement et périodicité d’exploitation”. In : *Bois et Forêts des Tropiques* 254 (jan. 1997), p. 39–49 (cf. p. 9).
- [Duf+11] Samuel DUFOUR-KOWALSKI et al. “Capsis: An open software framework and community for forest growth modelling”. In : *Annals of Forest Science* 69 (mar. 2011), p. 221–233. DOI : [10.1007/s13595-011-0140-9](https://doi.org/10.1007/s13595-011-0140-9) (cf. p. 13, 15).
- [FGP00] Alain FRANC, Sylvie GOURLET-FLEURY et Nicolas PICARD. *Une introduction à la modélisation des forêts hétérogènes*. Nancy : ENGREF, jan. 2000, p. 320 (cf. p. v, vi, 10, 11).
- [Foa+19] B FOAHOM et al. “Sustainable Management of African Rain Forest Part I: Workshops”. In : *Wageningen : The Tropenbos Foundation, 2001. - ISBN 90-5113-047-3* (juin 2019) (cf. p. 2, 5).
- [Gor+05] François GOREAUD et al. “La modélisation: Un outil pour la gestion et l’aménagement en forêt”. In : *Vertigo* 6 (sept. 2005), p. 1–12. DOI : [10.4000/vertigo.4260](https://doi.org/10.4000/vertigo.4260) (cf. p. 10).
- [Jah+19] Michel JAHIEL et al. “Le Projet d’Aménagement Pilote Intégré de Dimako (Cameroun)”. In : (juin 2019) (cf. p. 9).
- [LIS16] Eric TONYE LISSOUCK. “Mise en place d’un outil d’aide à la gestion”. mémoire de fin d’études cycle ingénieur de conception en génie informatique. 2016 (cf. p. 6, 8, 16, 18).

- [MC05] Xavier MORIN et Isabelle CHUINE. “Sensitivity analysis of the tree distribution model PHENOFIT to climatic input characteristics”. In : *Global Change Biology* 11 (sept. 2005), p. 1493–1503. DOI : [10.1111/j.1365-2486.2005.00996.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00996.x) (cf. p. 15).
- [PG08] Nicolas PICARD et Sylvie GOURLET-FLEURY. “Manuel de référence pour l’installation de dispositifs permanents en forêt de production dans le Bassin du Congo”. In : CO-MIFAC (nov. 2008), p. 265 (cf. p. 9, 18, 24).
- [PG11] Nicolas PICARD et Sylvie GOURLET-FLEURY. *Projet d’aménagement des petits permis forestiers gabonais, rapport technique de mission*. 2011 (cf. p. 9).
- [Pic07] Nicolas PICARD. “Modélisation de la dynamique de forêts naturelles tropicales : quel niveau de description ?” In : *Ecologie, Environnement* (oct. 2007) (cf. p. 10, 13).
- [Rst17] RSTUDIO. *shiny*. 2017 (cf. p. 43).
- [Rst18] RSTUDIO. *RStudio: Open source and enterprise-ready professional software for R*. 2018 (cf. p. 43, 44).
- [Sha19] Bryar SHAREEF. “Monte Carlo Simulations”. In : mai 2019 (cf. p. 28).
- [Ush66] Michael USHER. “A matrix approach to the management of renewable resources, with special reference to selection forests”. In : *Journal of Applied Ecology* 3 (jan. 1966), p. 355–367 (cf. p. 11, 12, 27).
- [VIN11] Damien VINCKE. “Elaboration d’une méthodologie d’estimation de la biomasse ligneuse aérienne de populations d’espèces commerciales du Sud-Est du Cameroun”. mémoire de master. 2011 (cf. p. 6).
- [Was+15] C. de WASSEIGE et al. “Les forêts du Bassin du Congo - Forêts et changements climatiques”. In : (2015), p. 128 (cf. p. 11).

## **L'aménagement forestier**

Le processus d'aménagement commence par la réalisation d'un inventaire faunique, une étude socio-économique et une cartographie de base de la concession. Le chapitre suivant présente les décisions d'aménagement basées sur des paramètres à évaluer par l'aménagiste et qu'il est nécessaire de présenter. Ces informations ont été essentiellement tiré du Camerounais (MINEF, Janvier 1998) et (TEREA, ENEF, ATIBT, 2006).

## **A.1 Travaux d'inventaire**

L'inventaire d'aménagement est la base du processus d'aménagement forestier. Son objectif principal est l'estimation de la ressource ligneuse dans le but de planifier sur le long terme les opérations d'exploitation. Les réglementations des pays du bassin du Congo imposent des normes d'inventaire fixant les caractéristiques de leur mise en œuvre. La stratification de la concession La stratification d'une concession consiste à sa division en régions constituée de peuplements forestiers possédant des caractéristiques homogènes en termes de domaine de végétation, d'origine, de réponse à la perturbation, de densité et d'accessibilité. Réalisé grâce à la télédétection, cette première phase permet de cartographier la concession et de définir un dispositif de sondage adapté à chaque strate forestière.

### **A.1.1 Le layonnage**

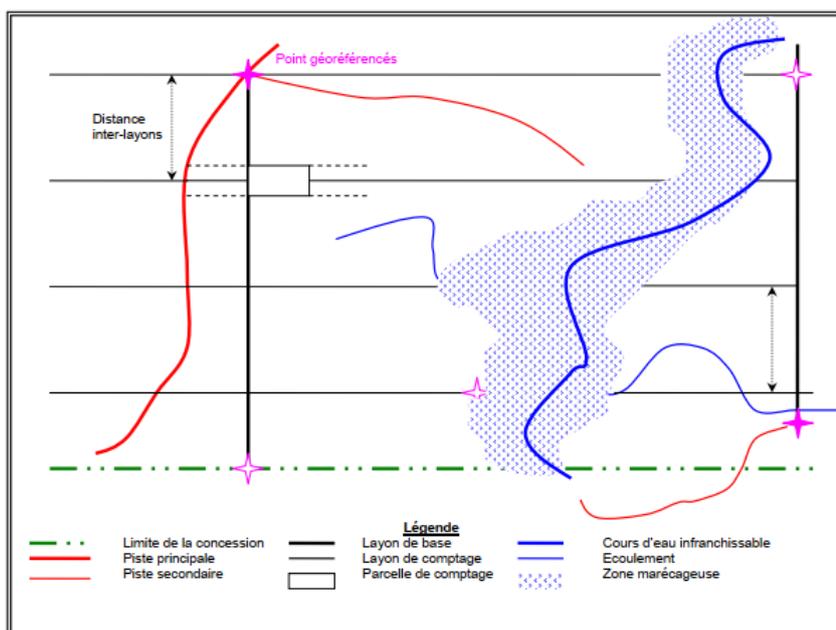
Les inventaires d'aménagement réalisés dans les forêts du bassin du Congo sont des sondages effectué le long de layons parallèles et équidistants. Le layonnage consiste à matérialiser sur le terrains le plan de sondage préalablement cartographié dans le but de délimiter les parcelles de comptage. Dans la mesure du possible (fermeture du couvert), les coordonnées géographiques des points de départ et d'arrivée des layons de comptage sont également relevés.

### **A.1.2 Le comptage**

Le comptage est l'opération qui suit le layonnage. Cette phase consiste principalement en une identification des arbres et à leur mesure. Lors de l'inventaire d'aménagement, chaque arbre est identifié botaniquement et son diamètre doit systématiquement être mesuré. Lors du pointage de l'information sur la fiche comptage (Annexe I). C'est la classe de diamètre correspondante qui est indiquée (voir figure I-2). Une note de qualité est également attribuée aux arbres exploitables (en général pour les essences principales seulement) d'un diamètre supérieur au DME.

### **A.1.3 La parcelle d'inventaire**

C'est l'unité de sondage. D'une taille admise à 0.5 ha, elles sont de formes rectangulaires et centrées sur l'axe d'un layon. Il s'agit d'une portion délimitée de la forêt à l'intérieur de laquelle



**FIGURE 48:** Exemple de plan de sondage

	Ayous	Azobé	Bilinga	...	Otunga	Sapelli
[10;20[	40	15	5	...	50	26
[20;30[	30	16	0	...	37	22
...	...	...	...	...	...	...
[110;120[	3	0	1	...	1	8
[120; +∞[	0	0	0	...	0	2

**FIGURE 49:** Classes de diamètres

tous les individus d'une taille supérieure à un seuil sont suivis. On distingue plusieurs types en fonction de l'option de comptage adoptée :

### A.1.3.1 La parcelle « grands arbres »

Les grands arbres au-dessus de 20 cm de diamètre sont répertoriées sur le totalité de la parcelle d'inventaire.

### A.1.3.2 La parcelles « petits arbres »

Une seconde option est de distinguer les taux de sondage entre les petits et les grands arbres, l'organisation de la parcelle de comptage peut alors être illustrée par la figure suivante :

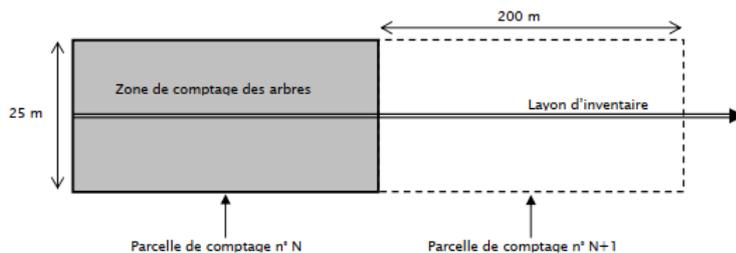


FIGURE 50: Exemple de parcelles des "grands arbres"

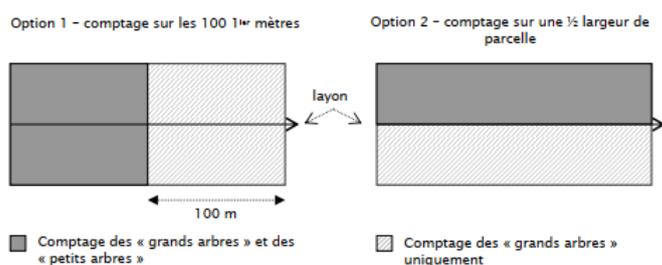


FIGURE 51: Exemple des parcelles de "petits arbres"

### A.1.3.3 La parcelles de régénération

La régénération est l'un des trois processus de la dynamique forestière. Elle est nécessaire pour mesurer la capacité de renouvellement du stock et concerne les arbres des essences exploitables de diamètre en général allant de 5cm à 20 cm.

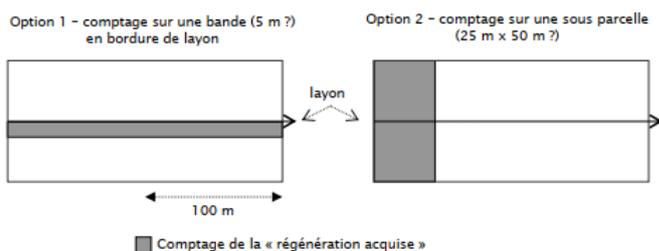


FIGURE 52: Exemple des parcelles de régénération

## A.2 Les paramètres d'aménagement

### A.2.1 Affectations des terres

Une affectation est une vocation particulière donnée à une superficie présente à l'intérieur des limites d'une concession et pour laquelle certaines activités humaines sont interdites, permises ou réglementées. Une série est quant à elle un ensemble de superficies d'une même affectation. Toutes séries créées lors de l'aménagement doivent être justifiées et cartographiées. Le plan d'amé-

nagement prévoit : Une carte ressortant les différentes affectations des terres dans la concession, leur total et leur superficie Tableau récapitulatif dans les différentes séries et leur superficie

### **A.2.2 La mortalité ( $\alpha$ )**

Ce paramètre représente la mort naturelle sans intervention humaine des essences forestières et doit varier par classe de diamètre. Elle doit être plus élevée chez les jeunes tiges que les arbres surannés. Toutefois, le taux constant de 1 % est fixée et utilisée tout diamètre confondu.

### **A.2.3 Les dégâts d'exploitation ( $\delta$ )**

L'exploitation forestière occasionne souvent des dégâts sur les arbres qui restent sur pieds. Ces dégâts varient par activité. Parmi celles qui détruisent le plus le peuplement résiduel, on cite en tête l'ouverture des routes et des parcs à bois, suivie du débardage, de l'abattage et d'autres sous activités d'exploitation qui vont jusqu'à l'ouverture des layons d'inventaire et la réalisation des travaux sylvicoles. Ces dégâts ont été fixés dans l'arrêté 0222 à 7% du peuplement résiduel bien qu'il y ait eu des études menées au Cameroun par le projet API de Dimako et qui les ont estimés à un peu plus (10%).

### **A.2.4 La possibilité**

Selon l'article 46 du Décret 95/531 du 23 août 1995, la possibilité annuelle de coupe correspond à la superficie maximale exploitable annuellement (possibilité par contenance) ou au volume maximal de bois susceptible d'être prélevé annuellement dans un massif forestier sans diminuer sa capacité de production (Possibilité par volume).

Le calcul de la possibilité se fera à partir de la table de stock de la série de production concernant uniquement les essences retenues pour le calcul de la possibilité. L'évaluation des volumes exploitables dans cette table doit tenir compte non plus des DME/ADM, mais des DME/AME fixés par essence tout en écartant le bonus.

La possibilité sera alors égale à la somme des volumes exploitables ainsi obtenus par essence divisée par la rotation. Il faut cependant relever qu'elle (possibilité par volume) n'est qu'indicative car son évaluation est faite juste sur la base d'une liste limitée d'essences (20 au minimum) dont les volumes exploitables ont été obtenus à partir d'un sondage réalisé à un taux très faible.

Il arrive très souvent qu'après l'inventaire d'exploitation, l'on trouve des volumes plus élevés ou moins élevés que ceux obtenus lors de l'inventaire d'aménagement. De plus, quand on ajoute le volume des autres essences exploitées librement au DME/ADM, on comprend que cette possibilité doit changer.

### **A.2.5 Accroissement annuel moyen (AAM)**

L'accroissement annuel de l'espèce permet à l'exploitant de déterminer le potentiel de la concession et constitue en effet un des paramètres principaux qui permet de fixer la rotation, la reconstitution des tiges exploitées ainsi que le volume maximum exploitable sans risque d'appauvrissement du peuplement.

### **A.2.6 Rotation (T)**

La rotation correspond au temps qui sépare deux passages consécutifs à l'exploitation au même endroit (AAC) d'un massif forestier. D'une valeur minimale de 30 ans, elle peut être portée à plus en restant un multiple de 5 ans en fonction des données d'inventaire. Sa formule est la suivante :

$$T = \frac{(DME - DborneInf)}{AAM}$$

Ou T = rotation DME = diamètre minimum d'exploitation administratif Dborne Inf= diamètre de la borne inférieure de la dernière classe de diamètre à faire monter au-dessus du DME AAM= accroissement annuel moyen de l'espèce Ce calcul est fait pour toutes les essences en fonction du taux de reconstitution souhaitée d'au moins 50 %. La rotation adoptée est alors la moyenne arithmétique des rotations obtenues mais très souvent le minimum est utilisé par les exploitants.

### **A.2.7 Les essences d'aménagement**

Une essence d'aménagement est une espèce forestière sur laquelle porte une décision d'aménagement (coupe à diamètre déterminé, interdiction d'exploitation ..). Conformément aux fiches techniques de l'arrêté 0222, « ces essences encore appelée essences principales sont déterminées par l'administration forestières et correspondent jusqu' alors aux 50 essences les plus exploitées en volume au cours des deux années précédentes (top 50) »

Aussi doit-on retrouver dans le plan d'aménagement, au niveau du paragraphe portant sur la Synthèse des résultats de l'inventaire d'aménagement, pour toute la forêt et toute essence principale confondue :

- Une table de peuplement
- Une table générale de stock

C'est à partir de cette table de peuplement que les structures diamétriques des essences seront élaborées. Ces essences aménagement doivent alors se retrouver toutes dans la nouvelle table de peuplement qui ne concerne que les essences se trouvant dans la série affectée à la production. Sur ces essences d'aménagement, on distingue les essences retenues pour le calcul de la possibilité de la concession. Ce sont celles sur lesquelles autorisée à l'exploitation et sur lesquelles portera la simulation pour la détermination du taux de reconstitution et du découpage des blocs d'aménagement. Ils sont au nombre de 20 au minimum et sont choisies dans la liste des essences prin-

cipales de la série de production après avoir exclu celles interdites à l'exploitation et celles dites « spéciales » faisant l'objet d'un régime sylvicole particulier (comme l'Ebène).

Ils doivent représenter au moins 75% du volume exploitable initial de toutes les essences principales de la série de production autorisées à l'exploitation car c'est le volume exploitable avant l'application des DME/Aménagement.

Diamètre minimum administratif (DME/ADM) et d'aménagement (DME/AME) Le DME encore appelé Diamètre Minimum d'Exploitabilité d'une essence est le diamètre en dessous duquel aucune essence ne doit pas être exploitée. Ils ont d'abord été fixés par l'administration et correspondent aux DME/ADM. Lors de l'élaboration des plans d'aménagement, de nouveaux DME sont fixés uniquement pour les essences retenues pour le calcul de la possibilité et correspondent au DME/AME.

Selon l'article 6 alinéa (j) de l'arrêté 0222, en aucun cas ces DME/AME ne doivent être inférieurs aux DME/ADM.

Les essences non retenues pour le calcul de la possibilité et non interdites de l'exploitation sont exploitées librement au DME/ADM. Les autres ne le seront qu'au DME/AME lors de la mise en application du plan d'aménagement.

### **A.2.8 Division de la concession (bloc quinquennal) et en AAC**

Cette subdivision est faite sur la base de production nette qui est celle obtenue en additionnant la possibilité forestière et le volume exploitable des autres essences principales autorisées à l'exploitation en écartant toujours le bonus. La production nette par hectare est évaluée pour chaque strate productive.

Le principe de la subdivision est d'avoir des UFE ou blocs quinquennaux équivalumes (possibilité par volume) de façon à assurer une récolte constante et continue. Les assiettes de coupe dans les blocs quinquennaux quant à elles doivent avoir la même superficie (possibilité par contenance) pour faciliter leur localisation sur le terrain ainsi que le suivi de leur exploitation. On commencera par délimiter les blocs quinquennaux en utilisant autant que possible les limites naturelles. On circonscrit alors le premier bloc et on évalue la superficie des strates productives qui s'y trouvent. Connaissant la production nette à l'hectare par strate, on évalue le volume correspondant. Si celui-ci est inférieur au volume recherché pour le bloc, on augmente la superficie et s'il est supérieur, on la réduit plutôt. On va procéder ainsi jusqu'à atteindre le volume recherché mais pas exactement. On va par cette approche découper le massif en un nombre de bloc correspondant à la rotation divisé par 5. Les différents blocs n'auront pas exactement le même volume. Une différence de 5% au maximum entre le bloc le plus élevé et le bloc le moins élevé est acceptée. Dépassé ce pourcentage, les blocs ne sont plus équivalumes.