

Université de Yaoundé I
Ecole Nationale Supérieure
Polytechnique
Département du Génie
Informatique

University of Yaounde I
National Advanced School of
Engineering
Department of Computer
Science



Mise en place d'un outil d'aide à la gestion
des exploitations forestières couplé à un
simulateur de la dynamique forestière :
Cas du bassin du Congo.

Mémoire de fin d'études/Master of Engineering

Présenté et soutenu par

TONYE LISSOUCK Pierre Nicolas Eric

En vue de l'obtention du :

Diplôme d'Ingénieur de Conception de Génie Informatique

Sous la Direction de :

Dr. Georges Edouard KOUAMOU

Dr. Vivien ROSSI

Ing. Guillaume CORNU

Devant le jury composé de :

Président : **Claude TANGHA**, *Professeur UY1.*

Examineur : **Jules TEWA**, *Maître de conférences UY1.*

Rapporteur : **Georges Edouard KOUAMOU**, *Chargé de cours UY1.*

Invités : **Vivien ROSSI**, *Modélisateur statisticien, HDR, cadre scientifique au CIRAD.*

Année académique 2015 - 2016

Mémoire soutenu le 08 juillet 2016

**Mise en place d'un outil d'aide à la gestion
des exploitations forestières couplé à un
simulateur de la dynamique forestière :
Cas du bassin du Congo.**

Mémoire de fin d'études/Master of Engineering

Présenté et soutenu par

TONYE LISSOUCK Pierre Nicolas Eric

En vue de l'obtention du :

Diplôme d'Ingénieur de Conception de Génie Informatique

Année académique 2015 - 2016

Mémoire soutenu le 08 juillet 2016

Dédicaces

*A mon feu père **Emmanuel Leopold ESSOLA LISSOUCK**, tu m'avais toujours montré que l'école est ma seule voie de réussite.*

*A ma mère **Elisabeth ESSOLA LISSOUCK**, tu as toujours été là quand j'ai besoin de toi.*

*A ma grande soeur **Madeleine Romaine NGO SAMNICK**, je sais que ton premier soucis c'est ma réussite et je me battrais toujours pour te rendre la fierté.*

*A mon petit frère **Ruben Leopold LISSOUCK ISSOLA**, tu seras toujours mon homme de main.*

Remerciements

Ce travail est l'aboutissement de nombreux efforts et sacrifices et n'aurait jamais été accompli sans l'aide et le soutien des personnes suivantes :

- Le Pr **Claude TANGHA** qui me fait l'honneur de présider ce jury ;
- Le Pr **Jules TEWA** pour avoir accepté d'examiner ce travail ;
- Le Dr **Georges Edouard KOUAMOU**, mon encadrant académique et enseignant à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, pour son encadrement, sa disponibilité, ses conseils, et toute l'attention qu'il a portée à l'accomplissement de ce travail ;
- Mon encadrant professionnel, le Dr **Vivien ROSSI** pour son sens poussé de la méthodologie et de la rigueur, qui sont les qualités premières d'un mathématicien ;
- Mon co-encadrant, L'ingénieur **Guillaume CORNU** pour tous ses conseils dans le domaine de l'informatique ;
- Tous mes enseignants du Génie Informatique, auxquels je dois la plupart de mes connaissances informatiques ;
- Mon co-stagiaire **Bertrand TEGUIA** pour tous ces moments passés ensemble ;
- Tous mes camarades de la promotion Génie Informatique 2016 ;
- Le contribuable Camerounais qui a financé mon cycle d'ingénieur à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique ;

A vous tous je dis un grand merci.

Résumé

Dans le souci de préserver sur le long terme les forêts du bassin Congo, les Etats de l'Afrique centrale ont imposé aux exploitants forestiers l'établissement des plans d'aménagement. Ces plans définissent des règles de prélèvements durables de la ressource naturelle en s'appuyant sur une double connaissance de l'état actuel de la ressource et de sa dynamique prévisionnelle. Mais ces exploitants forestiers n'arrivent pas toujours à respecter ces règles à cause du manque d'outil d'aide à la connaissance de la dynamique prévisionnelle de leur peuplement forestier. Le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement en abrégé CIRAD notre institution d'accueil propose son appui à ces Etats dans le cadre du projet DynAffFor avec pour objectif de mettre à la disposition de leurs exploitants forestiers un logiciel « prêt à l'emploi » leur permettant de simuler la dynamique prévisionnelle de leur peuplement forestier soumis aux effets des exploitations forestières et d'évaluer à long terme l'état de la ressource forestière.

Depuis le début du projet DynAffFor en 2013, des chercheurs du CIRAD ont pu mettre au point un simulateur de la dynamique forestière utilisant un modèle de dynamique forestière calibré sur les données collectées depuis 1982 sur le dispositif expérimental de suivi de la dynamique forestière de M'Baïki en République Centrafricaine. Mais ce simulateur à l'état où nous l'avions trouvé ne satisfaisait pas aux objectifs du CIRAD car ne disposait pas d'interface graphique et d'outils d'aide à la visualisation de certains paramètres d'aménagement appelés indicateurs de la gestion forestière. Notre travail a donc consisté pendant ce stage à concevoir et implémenter ce logiciel en, utilisant le simulateur existant. Pour atteindre cet objectif, nous avons d'abord étudié le fonctionnement du simulateur afin de comprendre les entrées et les sorties de ce dernier, puis nous avons analysé les besoins liés au logiciel à mettre en place. Sur cette base, nous avons conçu une architecture de base du logiciel intégrant le simulateur comme un composant logiciel ayant une entrée et une sortie, un module d'analyse des données issues du simulateur et une interface graphique pour piloter le simulateur et visualiser les résultats de la simulation à travers les indicateurs. Puis l'implémentation s'est appuyée sur le logiciel de calcul statistique R à travers son langage de programmation R utilisé aussi dans la mise au point du simulateur.

Mots-clés : *Dynamique forestière, exploitation forestière, gestion durable, indicateurs, simulateur, langage de programmation.*

Abstract

In the interest of long-term forest conservation in the Congo Basin, the States of Central Africa have imposed loggers establishing management plans. These plans define sustainable harvest rules of natural resource based on a double knowledge of the current state of the resource and its forward momentum. But these loggers are not always able to comply with these rules because of the lack of help to the knowledge of the forward momentum of their forest crop tool. CIRAD our host institution provides support to these states in the DynAffFor project aims to make available their loggers software "close to employment" allowing them to simulate the dynamics of their population forestry subject to the effects of logging.

Since the beginning of DynAffFor project in 2013 , researchers from CIRAD were able to develop a simulator of forest dynamics using a forest dynamics model calibrated on data collected since 1982 on experimental forest dynamics monitoring of M'Baïki Central African Republic. But this simulator did not meet the objectives of CIRAD since lacked graphical interface and retrieval support tool for certain development parameters called indicators of forest management . Our work consisted in sets up the software using the existing simulator.

To achieve this goal , we first studied the operation of the simulator to understand his inputs and outputs, then we analyzed the requirements for the software to implement. On this basis, we designed a basic software architecture integrating the simulator as a software component having input and output, a data analysis module from the simulator and a graphical interface to control the simulator and see the results of simulation through indicators . Then implementation was based on statistical computing software R through its programming language R also used in the development of the simulator.

Keywords : Forest dynamics, sustainable harvesting, indicators, simulator, statistical computing.

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Table des matières	vi
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	viii
Listes des abréviations	ix
INTRODUCTION GENERALE	1
1 ETAT DE L'ART	5
1.1 ÉTAT DES LIEUX SUR LE SIMULATEUR	6
1.1.1 MODELE DU SIMULATEUR	6
1.1.2 FONCTIONNEMENT DU SIMULATEUR	8
1.2 ÉTAT DES LIEUX SUR LA MÉTHODE ET LES OUTILS UTILISES . .	9
1.2.1 Présentation de la méthode de Monte Carlo	9
1.2.2 Présentation du logiciel R	10
1.3 LES MÉTHODES DE CALCUL DE CERTAINS INDICATEURS	13
1.3.1 Surface terrière	13
1.3.2 Volume total de bois	14
1.3.3 Volume exploitable	15
1.3.4 Biomasse	15
1.3.5 Taux de reconstitution	16
1.3.6 Structure diamétrique	17
1.3.7 Stock d'arbres	17
1.3.8 Stock exploitable	17
2 MÉTHODOLOGIE	18
2.1 Analyse du besoin	19
2.1.1 Rappel de l'état des lieux	19
2.1.2 Besoins du système	19
2.1.3 Recensement des contraintes	21
2.1.4 Les acteurs	21
2.1.5 Les cas d'utilisation	21
2.1.6 Diagramme global de cas d'utilisation	25
2.1.7 Workflow	25

2.2	CONCEPTION	27
2.2.1	Choix des indicateurs forestiers	27
2.2.2	Architecture de la solution	28
2.2.3	Modélisation des données et Diagramme de classe	31
2.2.4	Conception de la couche de présentation	33
3	IMPLEMENTATION ET RESULTATS	35
3.1	CHOIX DES OUTILS	36
3.1.1	Choix des outils de manipulation des données	36
3.1.2	Choix des outils d'implémentation de la interface graphique	36
3.1.3	Choix des outils d'analyse de données	37
3.1.4	Choix de l'IDE.	37
3.2	DEPLOIEMENT	38
3.3	PRESENTATION DE QUELQUES RESULTATS	39
3.3.1	Présentation du logiciel « DafSim »	39
3.3.2	Gains de la solution	45
	CONCLUSION GENERALE	47

Liste des figures

1.1	Les processus de la dynamique forestière du modèle « DafMod »[ROS15].	6
1.2	Le représentation du peuplement forestier dans le modèle « DafMod »[ROS15].	7
1.3	L'évolution du peuplement forestier dans le modèle « DafMod »[ROS15].	7
1.4	Le principe de fonctionnement du simulateur « DafSim »[Dyn14c].	8
1.5	Schéma de description de la méthode Monte Carlo [Bon09].	10
1.6	Illustration de la section d'un arbre à 1,30m du sol[VIN11].	14
2.1	Diagramme de cas d'utilisation - Simuler la dynamique d'un peuplement forestier.	22
2.2	Diagramme de cas d'utilisation - Gérer les indicateurs forestiers.	23
2.3	Diagramme de cas d'utilisation - Visualiser un indicateur de la gestion forestière.	23
2.4	Diagramme de cas d'utilisation - Exporter les informations.	24
2.5	Diagramme global de cas d'utilisation.	25
2.6	Workflow - Simulation de la dynamique forestière.	26
2.7	Workflow - Gestion des indicateurs forestiers.	26
2.8	Workflow - Visualiser un indicateur de la gestion forestière.	27
2.9	Architecture applicative de notre solution.	29
2.10	Architecture logicielle de notre solution.	30
2.11	Architecture physique de notre solution.	31
2.12	Architecture des données issues de la simulation.	31
2.13	Diagramme global de classe.	32
2.14	Prototype de l'IHM de « DafSim ».	33
3.1	Interface de R sous Windows.	37
3.2	Interface de RStudio sous Windows.	38
3.3	Diagramme de déploiement.	39
3.4	Page d'accueil du logiciel « DafSim ».	40
3.5	Les Paramètres liés à la dynamique naturelle pour une simulation.	40
3.6	Les Paramètres de l'exploitation - Tableau des espèces à exploiter.	41
3.7	Les Paramètres de l'exploitation - Dégâts post-exploitation.	41
3.8	Interface d'ajout d'un indicateur.	42
3.9	Interface de modification d'un indicateur.	43
3.10	Structure diamétrique cumulée.	43
3.11	Structure diamétrique pour une année par classe de diamètre.	44
3.12	Les paramètres de l'indicateur à visualiser.	44
3.13	Évolution de l'indicateur « Biomasse ».	45

Liste des tableaux

1.1	: Equation de cubage traditionnelles, v =volume, h =longueur, d_0 =diamètre à la base, d_m =diamètre à mi-longueur et d_f =diamètre au sommet[VIN11].	14
2.1	: Tableau des formules des indicateurs forestiers contenus par défaut dans l'outil.	28
2.2	: Tableau de description des classes de notre système.	32

Listes des abréviations

Sigle	Définition
COMIFAC	Commission des Forêts d'Afrique Centrale
CRAN	Compréhensive R archive Network
CIRAD	Centre de cooperation Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
D.M.A	Diamètre Minimum d'Aménagement
D.M.E	Diamètre Minimum d'Exploitation
HTML	HyperText Markup Language
IDE	Integrated Development Environment (Environnement de développement intégré).
IHM	Interface Homme Machine.
M.V.C	Modèle-Vue-Contrôleur (Environnement de développement intégré).

INTRODUCTION GENERALE

CONTEXTE

Avec 220 millions d'hectare de forêt tropicale, le bassin du Congo est le deuxième massif forestier tropical du monde et le plus grand réservoir de biodiversité en Afrique. Partagé entre six pays, il comporte actuellement 80 millions d'habitants. Le développement économique des pays africains ne peut se concevoir sans l'exploitation de leur forêt naturelle, l'une de leurs richesses majeures. Le défi consiste à concilier développement économique et préservation des biens et des services fournis par les forêts, en assurant leur gestion durable. Début 2011, sur environ 50 millions d'hectares de forêts concédés à des compagnies forestières, une trentaine de millions sont engagés dans une dynamique d'aménagement durable[GF13].

Conscient 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). Le projet s'intéresse principalement aux conditions dans lesquelles il est possible d'améliorer la production durable le bois d'œuvre dans les forêts tropicales du bassin du Congo.

Pour y arriver, des chercheurs du CIRAD l'un des organismes de recherche de ce projet se sont intéressés à l'étude de la dynamique des forêts tropicales du bassin du Congo soumises aux exploitations forestières. Au terme de cette étude, ils ont conçu un modèle de dynamique forestière, en s'appuyant sur les données recueillies sur le dispositif de suivi de la dynamique forestière de M'Baïki. Ce modèle a permis de mettre en place un simulateur de la dynamique forestière qui simule les processus pilotant la dynamique forestière à savoir la croissance, la mortalité et la régénération des arbres soumis aux effets des exploitations forestières.

Ce simulateur peut être utilisé pour fournir aux aménagistes des outils d'aide à la gestion des écosystèmes forestiers avec lesquels ils peuvent à partir des simulations, prédire l'évolution d'un peuplement forestier en visualisant le comportement de certaines variables de ces forêts après une simulation. Et ainsi de calculer plus rapidement et de manière plus précise certains paramètres de l'aménagement forestier.

Tous ces efforts peuvent amener les acteurs de la filière forestière à mieux concilier la gestion économique des ressources forestières et la lutte contre le changement climatique, en contrôlant au mieux les stocks de carbone de leurs forêts.

PROBLEMATIQUE

Le CIRAD a procédé à la demande du ministère centrafricaine des forêts en 1982 à l'installation d'un dispositif de suivi de la dynamique forestière à M'Baïki en République centrafricaine appelé dispositif de M'Baïki. Il est constitué d'un ensemble de parcelles de terrain sur lesquelles on procède à des observations et des mesures répétées dans le temps sur les arbres soumis aux exploitations forestières.

Les données collectées depuis maintenant 30 ans sur le dispositif de M'Baïki ont permis de calibrer un modèle de la dynamique forestière et calculer les paramètres cette dynamique forestière conduisant à la mise au point du simulateur de la dynamique forestière.

L'un des objectifs du projet DynAffor est de développer un logiciel « prêt à l'emploi » pour les entreprises de la filière forestière, capable de : 1) calibrer un modèle à partir des données issus d'un dispositif ; 2) projeter l'évolution des populations d'espèces prioritaires et des peuplements en fonction de différents scénarios de coupe (combinaisons de listes d'espèces exploitables, de diamètres minima d'exploitation et de durées de rotation) ; 3) évaluer l'état à long terme de la ressource forestière.

Le simulateur à l'état actuel est loin de satisfaire à cet objectif car : ce simulateur n'offre pas d'outils interactifs pouvant servir d'outils d'aide à la décision pour ces gestionnaires et ne dispose pas d'une interface graphique pouvant faciliter son utilisation surtout par des non-informaticiens.

Comment mettre en place ce logiciel partir de ce moteur de simulation de la dynamique forestière pour fournir aux gestionnaires des exploitations forestières un outil d'aide à la gestion, leur permettant de simuler d'évolution des écosystèmes forestiers et de mieux évaluer à long terme l'état de la ressource forestière ?

La réponse à cette interrogation passe par la réponse aux questions suivantes :

- Comment fonctionne ce simulateur et qu'elles sont les données produites en sortie de ce simulateur ?
- Quelles sont les informations pertinentes pour la gestion durable des forêts ?
- Comment extraire ces informations des données issues des simulations ?
- Comment définir et présenter de manière ergonomique ces informations ?

La réponse à toutes ces questions permettrait de trouver une solution pouvant s'avérer efficaces pour la mise en place de ce logiciel.

OBJECTIFS

Les principaux objectifs visés par l'opérationnalisation de ce travail sont :

- Concevoir une architecture logicielle modulaire intégrant le moteur de simulation déjà existant.
- Identifier les indicateurs pertinents liés à la gestion des écosystèmes forestiers pouvant être extraits des données provenant du simulateur,
- Permettre l'ajout et la modification d'autres indicateurs pouvant être visualisés après une simulation,
- Mettre en place un module d'analyse de ces données pour extraire les informations de ces indicateurs qui permettront aux gestionnaires de mieux évaluer l'état à long terme de la ressource forestière,
- Implémenter le logiciel sur la base de cette architecture permettant d'effectuer des simulations et de visualiser les résultats de façon ergonomique.

LES ENJEUX

Les enjeux liés à la réalisation d'un tel logiciel sont de quatre (04) ordres : les enjeux environnementaux, économiques, sociaux et scientifiques :

Les enjeux environnementaux

Les forêts tropicales humides font partie des écosystèmes riches et les plus diversifiés de la planète. La prise de conscience des gestionnaires forestiers en matière de gestion forestière et d'aménagement forestier, permettra sur le plan environnemental :

- D'inventorier de façon systématique et scientifique tout le massif forestier, y compris la biodiversité végétale et animale car ceci permet d'avoir une connaissance sur les espèces existants dans la forêt afin de ne pas exploiter les espèces protégées.
- De maîtriser les dégâts causés par la forêt en introduisant les techniques à faible impact.
- D'assurer une meilleure reconstitution de la ressource prélevée, par la prévision des espèces et des volumes à exploiter et système de rotation des parcelles d'exploitation.
- De préparer des dossiers de certification environnementale exigés par certains marchés européens.

La bonne gestion des écosystèmes forestiers à travers l'estimation de la dynamique des écosystèmes forestiers, favorisera l'aménagement forestier durable qui réduira de façon considérable le phénomène de déforestation et favorisera ainsi la lutte contre les phénomènes de changement climatique.

Les enjeux économiques

L'exportation des bois tropicaux vers l'extérieur est soumise à une pression croissante des ONG environnementales, qui exigent des preuves de bonne gestion des massifs forestiers soumis à l'exploitation.

Ensuite, le secteur forestier connaît une forte évolution, avec une tendance générale à l'industrialisation sur l'ensemble du bassin du Congo. Certaines de ces industries utilisent le bois et surtout du bois tropical comme leur principale matière première. Assurer une existence pérenne de ces bois, permettra la survie de ces industries.

Les enjeux sociaux

Les populations locales du bassin du Congo ont toujours tirés 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. L'étude de la dynamique prévisionnelle des peuplements forestiers permet de préserver ces ressources pour les générations actuelles et futures.

Les enjeux scientifiques

L'étude de la dynamique naturelle des écosystèmes forestiers, favorise la mise en place des dispositifs expérimentaux de recherche fournissant des données permettant aux chercheurs, d'élaborer des modèles de dynamique pour prédire l'évolution des écosystèmes

forestiers et de certains de ses ressources et améliorer ainsi l'évaluation à long terme de la ressource forestière.

PLAN DU MEMOIRE

Ce travail s'articulera en trois(03) principaux chapitres :

Le chapitre 1 intitulé **État de l'art** aura pour principal objectif de présenter l'état des lieux, les concepts liés à notre étude et de recenser les éléments liés à la gestion forestière.

Le chapitre 2 intitulé **Méthodologie** exposera en détail notre démarche pour la mise en place de la solution.

Le chapitre 3 intitulé **Implémentation et résultats** aura pour objectif de présenter les outils utilisés pour la mise en place de notre solution et les résultats obtenus.

INTRODUCTION

Comme nous l'avons présenté dans l'introduction, notre travail est fondé sur un simulateur appelé DafSim développé dans le cadre du projet DynAffFor. Ce simulateur a pour principal objectif de simuler l'évolution d'un peuplement forestier, en appliquant sur ce dernier des exploitations forestières et la dynamique naturelle à travers ses différents processus à savoir : la régénération, la croissance, la mortalité. Il utilise le modèle statistique DafMod qui a été calibré, en utilisant les données collectées sur le dispositif de M'Baïki. L'implémentation de ce simulateur a été réalisée à l'aide du langage de calcul statistique R[Fou14], il est basé sur les méthodes de **Monte Carlo**. L'objectif de ce chapitre est de présenter ces différents concepts liés à notre étude. Etant donné que la bonne gestion des écosystèmes forestiers passe par l'évaluation de certains indicateurs forestiers, nous présenterons les méthodes de calcul de certains d'entre eux.

1.1 ÉTAT DES LIEUX SUR LE SIMULATEUR

1.1.1 MODELE DU SIMULATEUR

Le modèle de dynamique forestière utilisé pour la mise en place de ce simulateur est appelé **DynAfForMoDel** en abrégé **DafMod**. Il a été conçu avec pour principal objectif d'appréhender la réponse de la forêt face à l'exploitation. Nous vous présenterons ici les grands axes de ce modèle pour mieux l'expliquer [Dyn14a].

La structure du modèle

Le modèle global de **DafMod** est constitué de trois sous modèles (voir la Figure 1.1) correspondant chacun aux différents processus pilotant la dynamique forestière à savoir : la régénération, la croissance et la mortalité. Ces sous modèles sont indépendants entre eux. Cette séparation entre les sous-modèles permet de mieux les calibrer, de les modifier et d'en ajouter d'autres indépendamment des existants [Dyn14a].

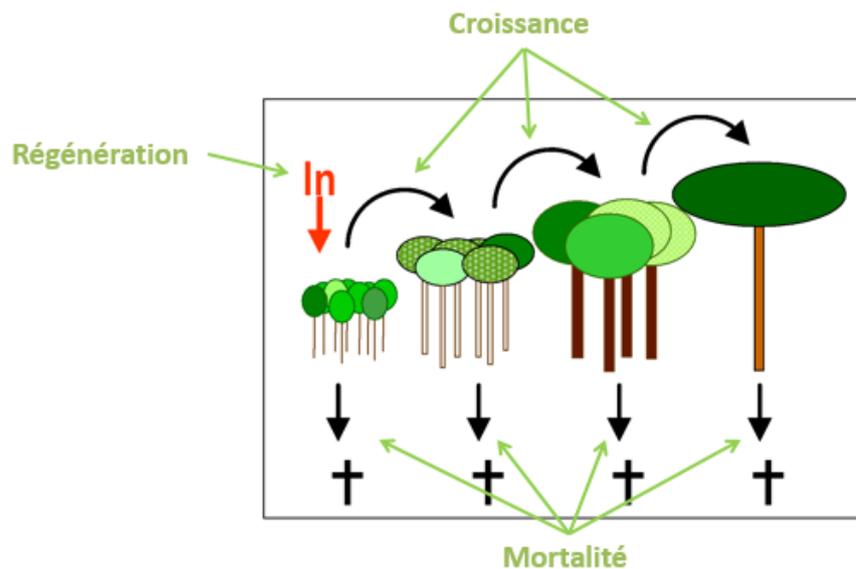


FIGURE 1.1 – Les processus de la dynamique forestière du modèle « **DafMod** » [ROS15].

Représentation du peuplement forestier dans le modèle

Modéliser la dynamique forestière revient tout d'abord à trouver une représentation de l'état de la forêt c'est à dire la représentation du peuplement forestier. Ici on a opté pour la représentation du peuplement par une répartition des effectifs des espèces par classe de diamètre (voir la Figure 1.2), sur une surface donnée. Cette répartition peut être faite sur l'ensemble du peuplement, ou par groupe d'espèce, ou par espèce [Dyn14a].

	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 1.2 – Le représentation du peuplement forestier dans le modèle « **DafMod** »[ROS15].

Le modèle fait évoluer les arbres de chaque classe de diamètre sur un pas de temps donné avec un nombre de transition bien déterminé, décrit comme suite et représenter sur la Figure 1.3 :

- ils peuvent rester dans leur classe avec une certaine probabilité,
- ils peuvent passer dans la classe suivante en fonction de la probabilité qu'a l'espèce de l'arbre dans cette classe de changer de classe,
- ils peuvent mourir fonction de la probabilité qu'a l'espèce de l'arbre dans cette classe de mourir .

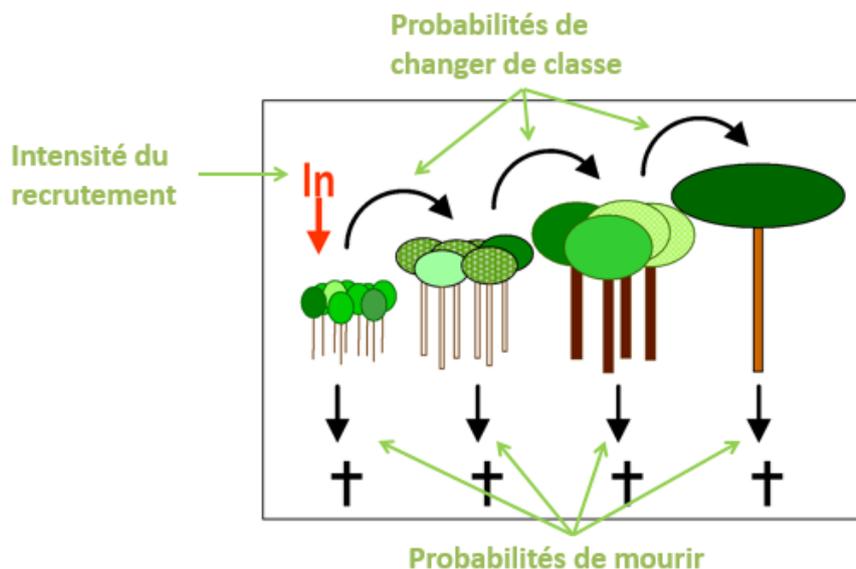


FIGURE 1.3 – L'évolution du peuplement forestier dans le modèle « **DafMod** »[ROS15].

Prise en compte de l'exploitation forestière

Pour que le modèle soit en mesure de reproduire aussi bien la dynamique post-exploitation que la dynamique des forêts non perturbées, des variables caractérisant la structure du peuplement (par exemple la surface terrière des classes diamétriques) sont intégrées dans les sous-modèles des processus[Dyn14a].

Calibration du modèle

Les données réelles sur la dynamique forestière recueillie sur le dispositif de M'Baïki pendant des inventaires sur ce dernier ont servi à calibrer le modèle du simulateur. En tenant compte des objectifs visés par le simulateur c'est à dire d mesurer l'impact de l'exploitation forestière et de la dynamique naturelle sur le peuplement forestier, l'on a mené des inventaires sur les arbres en situation non perturbée pour que le modèle reproduise le comportement de la forêt non perturbée et en situation perturbée après une exploitation forestière pour que le modèle puisse reproduire le comportement de la forêt après une perturbation[Dyn14a].

1.1.2 FONCTIONNEMENT DU SIMULATEUR

Le simulateur de la dynamique forestière nommé **DynAfForSIMulateur**, en abrégé **DafSim** développé dans le cadre du projet **DynAfFor** a pour principal objectif de mesurer l'impact de l'exploitation d'une forêt sur la dynamique de son peuplement[Dyn14c].

Principe

Le simulateur **DafSim** basé sur le modèle **DafMod**, représente l'état du peuplement forestier par une distribution des effectifs d'arbres par classe de diamètre, sur une superficie bien donnée (généralement celle de l'inventaire)[Dyn14c].

Son fonctionnement est construit autour de trois modules : l'exploitation, dégâts d'exploitation et dynamique naturelle. Il prédit l'évolution d'un peuplement forestier avec un pas de temps fixe (annuel par exemple), en appliquant sur ce dernier les trois modules cités ci-dessus comme suite :

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

La figure 1.4 résume de manière schématique le principe de fonctionnement de ce simulateur.

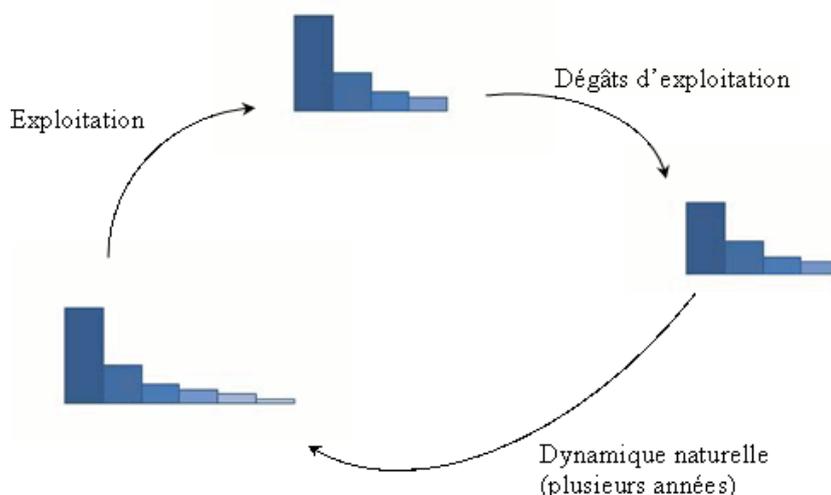


FIGURE 1.4 – Le principe de fonctionnement du simulateur « **DafSim** »[Dyn14c].

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[Dyn14c] :

1. Il faut calibrer le modèle **DafMod** avec les données issues des parcelles ou de sentiers, représentatifs du peuplement ou de la population à simuler,
2. Il faut fournir l'état du peuplement sous forme d'une distribution des effectifs par classe de diamètre du peuplement, du groupe d'espèces ou de l'espèce sur lesquels l'on veut réaliser les simulations,
3. Il faut fournir la liste des essences à exploiter et de leur DMA respectif, intensité de prélèvement, durée de rotation, . . .
4. Il faut fournir le vecteur de dégâts post-exploitation par classe de diamètre.

Sorties du simulateur

Le simulateur produit en sortie des données décrivant les états prévisionnels du peuplement forestier sur la durée de la simulation à partir desquelles l'on pourra obtenir l'évolution, toujours sur la plage temporelle de la simulation de différents indicateurs pour le peuplement, les groupes d'espèces ou une espèce particulière[Dyn14c].

Validité des simulations

Le modèle 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. La validité des simulations est encore plus importante lorsque nous constatons que le peuplement n'est pas loin de celui des données de calibration[Dyn14c].

1.2 ÉTAT DES LIEUX SUR LA MÉTHODE ET LES OUTILS UTILISES

1.2.1 Présentation de la méthode de Monte Carlo

Description de la méthode

Les techniques de simulation de **Monte Carlo** sont utilisées pour simuler des systèmes déterministes avec des paramètres ou des entrées stochastiques. 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[Bon09].

Parmi les pionniers des méthodes **Monte Carlo** nous retrouvons E. Fermi, J. Neumann, S. Ulam, N. Metropolis.

Les méthodes **Monte Carlo** sont aujourd'hui utilisées pour simuler des phénomènes physiques complexes dans plusieurs domaines scientifiques et appliqués : radioactivité, physique des hautes énergies, réseaux, économétrie, logistique, écologie. Elles s'appuient sur l'échantillonnage des distributions de quantités incertaines. Elles peuvent être visualisées comme une boîte noire où entre un flux de nombre pseudo-aléatoire (c'est à dire générés par l'ordinateur) et un flux de nombre sort ; l'estimation de la quantité d'intérêt est obtenue, en analysant l'output. Comme décrit sur la Figure 1.5

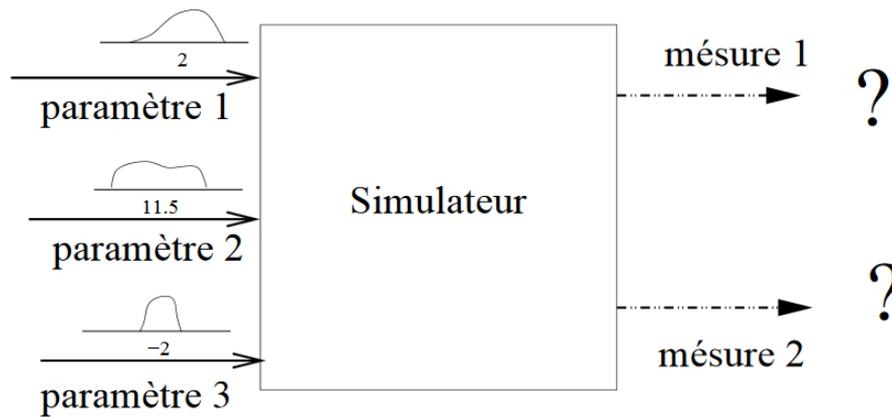


FIGURE 1.5 – Schéma de description de la méthode Monte Carlo[Bon09].

les composantes d'un algorithme de Monte Carlo

Un algorithme de **Monte Carlo** est composé minimalement des composants suivants[Bon09] :

1. **Description probabiliste** : un modèle stochastique du problème.
2. **Générateur uniforme de nombres aléatoires** : un générateur de nombres aléatoires uniformément distribués sur l'intervalle $[0, 1]$.
3. **Simulateur** : une technique pour échantillonner une distribution de probabilité générique.
4. **Loi d'échantillonnage** : un simulateur déterministe qui renvoie l'output quand tous les paramètres sont connus.
5. **Collecteur des outputs** : structure des données pour stocker tous les outputs de la simulation.
6. **Analyseur de l'output** : ensemble de technique statistique qui permettent de tirer conclusion à partir des données générées par le simulateur.
7. **Estimateur d'erreur** : ceci permet d'associer à chaque quantité estimée à partir de l'output une indication sur l'erreur ou sur la confiance (par exemple en fonction du nombre de répétitions).

1.2.2 Présentation du logiciel R

Présentation générale

Le logiciel **R** est un logiciel statistique 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[Lar15].

R est un langage orienté vers le traitement de données et l'analyse statistique dérivé du langage S. Il est développé depuis une vingtaine d'années par un groupe de volontaire de différents pays. C'est un logiciel libre¹, publié sous licence GNU/GPL.

1. Pour plus d'information sur ce qu'est un logiciel libre, voir : <http://www.gnu.org/philosophy/free-sw.fr.html>

L'utilisation de R présente plusieurs avantages :

- c'est un logiciel multiplateforme, qui fonctionne aussi bien sur des systèmes **Linux**, **Mac Os** ou **Windows** ;
- c'est un logiciel libre, développé par ses utilisateurs et modifiable par tout un chacun ;
- c'est un logiciel gratuit ;
- c'est un logiciel très puissant, dont les fonctionnalités de base peuvent être étendues à l'aide de plusieurs milliers d'extension ;
- c'est un logiciel dont le développement est très actif et dont la communauté d'utilisateurs ne cesse de s'élargir ;
- les possibilités de manipulation de données sous R sont en général largement supérieures à celles des autres logiciels ;
- c'est un logiciel avec d'excellentes capacités graphique et de nombreuses possibilités d'export ;
- avec **Rmarkdown**, il est devenu très aisé de produire des rapports automatisés dans divers format (Word, PDF, HTML) ;
- **R** est de plus utilisé dans tous les secteurs scientifiques, y compris dans le domaine des analyses d'enquêtes et, plus généralement, des sciences sociales.

Comme rien n'est parfait, on peut également trouver quelques inconvénients :

- le logiciel, la documentation de référence et les principales ressources sont en anglais. Il est toutefois parfaitement possible d'utiliser R sans spécialement maîtriser cette langage ;
- il n'existe pas encore d'interface graphique pour R équivalente à celle d'autre logiciel comme SPSS ou Modalisa. R fonctionne à l'aide de scripts (de petits programmes) édités et exécutés au fur et à mesure de l'analyse.
- comme R s'apparente davantage à un langage de programmation qu'à un logiciel proprement dit, la courbe d'apprentissage peut être un peu « raide », notamment pour ceux n'ayant jamais programmé auparavant.

Philosophie de R

Quelques points particuliers dans le fonctionnement de **R** peuvent parfois dérouter les utilisateurs habitués à d'autres logiciels[Lar15] :

- Sous R, en général, on ne voit pas directement les données sur lesquelles on travaille ; on ne dispose pas en permanence d'une vue sur des données sous forme de tableau. Ceci peut être déroutant au début, mais on se rend vite compte qu'on n'a pas besoin de voir en permanence les données pour les analyser.
- Sous R, la production d'une analyse génère un grand nombre de résultats de toutes sortes avec un affichage réduit au minimum et c'est l'utilisateur qui demande à voir des résultats supplémentaires ou plus détaillés.
- Sous R, les résultats des analyses sont stockés dans les objets et sont dès lors manipulables.

Inhabituel au début, ce fonctionnement permet en fait assez rapidement de gagner le temps dans la conduite des analyses[SGFVFABH98].

Notion d'extension

L'installation par défaut du logiciel R contient le cœur du programme ainsi qu'un ensemble de fonction de base fournissant un grand nombre d'outils de traitement de données et d'analyse statistique[Lar15].

R étant un logiciel libre, il bénéficie d'une forte communauté d'utilisateurs qui peuvent librement contribuer au développement du logiciel en lui ajoutant des fonctionnalités

supplémentaires. Ces contributions prennent la forme d'extension (*packages*) pouvant être installées par l'utilisateur et fournissant alors diverses fonctionnalités supplémentaires. Il existe un très grand nombre d'extension (plus de 6500 à ce jour), qui sont diffusées par un réseau baptisé CRAN.

La liste de toutes les extensions disponibles sur CRAN est disponible ici : <http://cran.r-project.org/web/packages/>.

Pour faciliter un peu le repérage des extensions, il existe un ensemble de regroupements thématiques (économétrie, finance, génétique, données, spatiales...) baptisés *Task views* : <http://cran.r-project.org/web/views/>.

Outils de création des interfaces graphiques sous R

De manière native R n'offre pas d'outils de création des applications avec interfaces graphique comme des langages de programmation classiques tels que : java, c, VBA, etc... Mais heureusement la communauté autour de R est massive et très active. Elle participe à l'évolution du langage et à la simplification de la programmation en développant des packages permettant de développer des applications avec interfaces graphiques avec R à l'instar de : **RTcltk** et **shiny**.

↳ **RTcltk** :

Tcl-Tk est la combinaison des langages Tcl et Tk[VER14] :

Tcl : Tool Command Language (abréviation : Tcl) est un langage de scripts conçu par John Ousterhout et son équipe à l'université de Californie à Berkeley (multiplateformes, extensible, facile à apprendre).

Tk : C'est une extension développé toujours par John Ousterhout est une bibliothèque pour créer des interfaces graphiques portable.

Tcltk : Bibliothèque disponible dans R qui contient les principales commandes Tcl et widgets Tk.

Tcltk2 : Extension de la bibliothèque tcltk qui permet d'accéder à des styles et des fonctions supplémentaires. **Tkrplot** : Extension pour insérer des graphiques dans les widgets Tk.

Pour certaines fonctions, il peut être nécessaire d'installer des applications supplémentaires (ActiveTcl).

RTcltk permet de créer les interfaces utilisateur pour votre application.

Inconvénients L'inconvénient majeur réside dans la qualité de l'aide proposée dans les packages pour utiliser les fonctions. Rcltk n'offre pas aussi la possibilité de créer des applications en mode client-serveur pouvant fonctionner à distance.

↳ **shiny** :

Shiny est un package de R, qui permet de créer facilement des applications web. Ces applications web permettent de présenter les résultats des analyses, ou de proposer un outil statistique directement dans le navigateur. Shiny tout comme R est totalement gratuit[RSt].

Les applications développées avec shiny peuvent être utilisées en local sur le PC, ou sur la plateforme d'hébergement de Rstudio shinyapps.io, ou encore sur un serveur[yP14].

Pourquoi utiliser shiny ? Si le projet s'adresse à de nombreux utilisateurs, il est utile d'utiliser une application web pour présenter des résultats. Ainsi chaque utilisateur filtrera pour sélectionner les informations qui l'intéressent.

Shiny permet de faire plus qu'une présentation des résultats. On peut proposer des graphiques et des cartes dynamiques, ainsi que les outils de calculs poussés.

Shiny est simple et rapide : avec un peu d'expérience en R, l'on peut proposer des applications web pour chacun de ses projets R.

Quelle sont les limites de shiny ? Shiny étant fortement lié à R, lorsque vous manipulez un volume important de données avec des ressources limitées le plantage de R peut entraîner le plantage de votre application.

Shiny n'est qu'un outil de présentation, il ne remplace pas la synthèse des résultats. Il faut toujours faire la synthèse des données avant de les afficher.

1.3 LES MÉTHODES DE CALCUL DE CERTAINS INDICATEURS

Pendant le projet DynAffFor les experts en écologies et en modélisation de la dynamique forestière ont identifiés indicateurs pertinents de la gestion durable des forêts généralement recherchés par les gestionnaires des concessions forestières pour mieux raisonner la gestion de leurs écosystèmes.

Certains de ces indicateurs nécessitent l'établissement de leur expression mathématique à en fonction des données et des informations que nous disposons sur les arbres du peuplement forestier étudié.

1.3.1 Surface terrière

Définition

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 1,30mètre 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 de cette aire ; elle s'exprime en m^2/ha . Le nombre calculé pour un ha permet une extrapolation en surface homogène C'est un indicateur utilisé pour la gestion sylvicole ou l'étude de peuplements forestiers. Le suivi dans le temps de cette valeur donne en effet un indice précis de la productivité ligneuse d'une parcelle, via la vitesse de croissance des arbres[VIN11].

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.

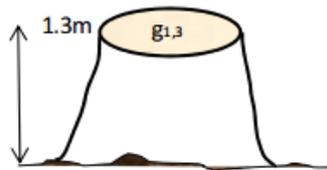


FIGURE 1.6 – Illustration de la section d'un arbre à 1,30m du sol[VIN11].

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

$$g_{1,3} = \frac{\pi}{4}d^2 \quad (1.1)$$

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

$$G = n_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_1^2 + n_2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_2^2 + \dots + n_j \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_j^2 = \frac{\pi}{4} \cdot \sum n_i d_i^2 = \sum n_i g_i \quad (1.2)$$

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.

$$\bar{g} = G/N. \quad (1.3)$$

1.3.2 Volume total 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 façon 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 : Les méthodes d'estimation du volume appelées généralement **tarifs de**

TABLE 1.1 – : Equation de cubage traditionnelles, v =volume, h =longueur, d_0 =diamètre à la base, d_m =diamètre à mi- longueur et d_f =diamètre au sommet[VIN11].

Formule de Huber	$v = \frac{\pi}{4}d_m^2 h$
Formule de Smalian	$v = \frac{\pi h}{8} / (d_0^2 + d_f^2)$
Formule du tronc de cône	$v = \frac{\pi h}{12} (d_0^2 + d_f^2 + d_0 d_f)$
Formule de Newton	$v = \frac{\pi h}{24} (d_0^2 + d_f^2 + 4d_m^2)$

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'un ou de plusieurs caractéristiques dendrométriques directement mesurables.

D'une manière générale, deux types d'équations sont cités dans la littérature ([Akc07] ; [Ron99] ; [Wes09]). Au premier type correspondent les relations linéaires de la forme.

$$v = a_0 + a_1 d^2 h, \text{ ou} \quad (1.4)$$

$$v = a_0 + a_1d^2 + a_2d^2h, \text{ ou} \quad (1.5)$$

$$v = a_0 + a_1d + a_2d^2h + a_3d^3 + a_4h + a_5d^2h, \quad (1.6)$$

Où v est le volume de l'arbre, d son diamètre de référence, h sa hauteur (totale ou partielle) et $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ sont des paramètres.

Le second type, quant à lui se compose d'équations non linéaires dont la forme est :

$$v = a_0d^{a_1}, \text{ ou} \quad (1.7)$$

$$v = a_0 + a_1d^{a_2}. \quad (1.8)$$

Les modèles linéaires peuvent être linéarisés par une double transformation logarithmique. Par exemple l'équation 1.7 se linéarise comme suit :

$$\log v = \log a_0 + a_1 \log d \quad (1.9)$$

$$v = a_0d^{a_1} \Rightarrow \log v = \log a_0 + a_1 \log d \Rightarrow v = 10^{\log a_0 + a_1 \log d} \quad (1.10)$$

1.3.3 Volume exploitable

Correspond au volume d'arbre du peuplement forestier dont le diamètre est au supérieur au DME².

1.3.4 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.

Selon [tSCW05], deux méthodes d'estimation de la biomasse ont été retenues [DOR10] :

- Estimation à partir du volume de bois fort sur écorce (callibrage 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 : Volume Expansion Factor) permettant d'extrapoler le volume de classes de diamètre manquantes.

$$AGB = VOB * WD * BEF(*VEF) [Lug92]. \quad (1.11)$$

2. Dans le code forestier il est interdit de couper les arbres dont le DBH < DME

WD est aussi appelé WSG (Wood Spécific Gravity) lorsqu'on considère les densités sèches propres à chaque espèce. On utilise également dans les calculs intermédiaires le terme BV (Biomass of inventoried volume en T), correspond à la biomasse des troncs :

$$BV = BOV * WD \text{ (d'après } BROWN, 1997 \text{)}. \quad (1.12)$$

[Lug92] propose une relation allométrique permettant de prédire le BEF à partir de la biomasse inventoriée (BV) :

$BEF = \exp(3.213 - 0.506 * \ln(BV))$ pour $BV < 190 T/ha$

ou $BEF = 1.74$ pour $BV \geq 190 T/ha$ (avec $BV = VOB * WSG$) [DOR10].

- La méthode d'estimation à partir des tables d'inventaires et des modèles allométriques.

On appelle table d'inventaire la matrice classiquement utilisée en foresterie qui présente le résultat de l'inventaire en nombre de tige par essence et par classe de diamètre. Cette méthode, mise au point par [tSCW05], permet de calculer la biomasse totale arbre par arbre à partir d'un modèle allométrique. Ce modèle peut être employé pour des inventaires de type « placettes permanentes » mais aussi à partir de données brutes d'inventaires 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 nous cherchons à estimer la biomasse totale d'un arbre (AGB) à partir d'une ou deux données d'entrée : le diamètre D 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 [tSCW05]. 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 [DOR10] :

$$AGB = WSD * \exp(-2.557 + 0.940 \ln(\rho D^2 H)) \equiv 0.776 * (\rho D^2 H)^{0.940} \quad (1.13)$$

Et l'équation suivante lorsque la hauteur n'est pas disponible (Dans le cas de note étude) [DOR10] :

$$AGB = WSD * \exp(-1.449 + 2.148 \ln(D) + 0.207(\ln(D))^3 + 0.028(\ln(D))^3) \quad (1.14)$$

1.3.5 Taux de reconstitution

La reconstitution encore appelé renouvellement est un indice indiquant le nombre d'arbre devenue exploitable après une rotation. C'est le ratio du nombre de tiges prévu dont le diamètre sera supérieur au DME à la fin du cycle à la fin d'une rotation³ sur le nombre de tiges dont le diamètre est supérieur au DME au début du cycle au début de la même rotation.

La Formule

La formule de reconstitution mise au point par Durrieu de Madron (1997) [dMEF13] 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, et du taux annuel de mortalité qui sont imposé sur la distribution du diamètre initial [GF08].

$$\%R = \left[\frac{N_f(1 - m)^T(1 - \alpha)}{N_0} \right] * 100. \quad (1.15)$$

3. La durée du cycle qui sépare deux coupes successives

ou tout simplement :

$$\%R = \left[\frac{\text{stock_après_rotation}_{\geq DME}}{\text{stock_initial_rotation}_{\geq DME}} \right] \star 100. \quad (1.16)$$

1.3.6 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 espèces confondues. Elle est porteuse d'information sur la stabilité de toutes les espèces confondues. Elle est peut être également établie par espèce et l'on parle de structure spécifique.

1.3.7 Stock d'arbres

$N = \sum n_i$ avec n_i l'effectif du groupe d'espèce dans la classe de diamètre i .

1.3.8 Stock exploitable

Correspond au stock d'arbre du peuplement forestier dont le diamètre est au supérieur au DME.

BILAN DU CHAPITRE

Dans ce chapitre il était question de vous présenter les concepts inhérents à notre problématique. Nous avons présenté dans un premier temps un état des lieux sur le simulateur existant qui constitue la base de notre travail, en présentant son principe de fonctionnement et le modèle statistique sur lequel il est fondé, puis les outils utilisés dans le cadre de son implémentation. Nous avons dans un second temps présenté les méthodes de calculs des certains éléments d'évaluation de la gestion durable des forêts appelés les indicateurs forestiers.

MÉTHODOLOGIE

INTRODUCTION

Pour mener à bien ce projet de mise en place d'un outil d'aide à la gestion des écosystèmes forestiers, il a fallu suivre une méthodologie rigoureuse en terme d'objectifs et de livrables dans le temps. Dans le cadre de ce travail nous avons adopté :

- ☞ Une méthode de développement du génie logiciel : la méthode Scrum. C'est une méthode agile s'appuyant sur le découpage du projet en itérations.
- ☞ Une méthode statistique pour l'analyse de données : la méthode de Monte Carlo. C'est une méthode utilisée pour simuler des systèmes déterministes ou stochastiques avec des paramètres ou des entrées stochastiques.

La mise en place de cet outil d'aide gestion des exploitations forestières a requis l'intégration d'une interface graphique au simulateur de prédiction de la dynamique forestière et l'ajout d'un module d'analyse de données issues de la simulation qui offrira des outils d'aide à la décision aux aménagistes forestiers.

Ce chapitre présente l'analyse des besoins de l'outil, l'étude des contraintes et sa conception. L'analyse de l'outil s'est soldée par des diagrammes de cas d'utilisation et de workflow. La phase de conception quant à elle a permis de réaliser les architectures de notre outil et le schéma de données qui seront recueillies du simulateur.

2.1 Analyse du besoin

2.1.1 Rappel de l'état des lieux

✎ L'objectif :

Partant d'un simulateur de la dynamique forestière développé dans le cadre du projet DynAffFor, notre travail consiste à développer un logiciel « prêt à l'emploi » pour les entreprises de la filière forestière qui permettra d'atteindre deux grands objectifs à savoir :

- Simuler l'évolution d'un peuplement forestier en s'appuyant sur une collecte préalable des données sur les arbres d'un dispositif et des scénarios d'exploitation que l'on applique sur ce peuplement.
- Analyser les résultats produits à l'étape précédente avec des outils d'exploration de données interactifs pour extraire l'information utile aux aménagistes de la forêt.

✎ Description de l'existant :

Le logiciel à développer sera basé sur un simulateur de la dynamique forestière existant et développé dans le cadre du projet DynAffFor comme nous l'avons décrit ci-dessus. Il a pour principal objectif de mesurer l'impact de l'exploitation d'une forêt sur la dynamique de son peuplement. Il est conçu sur la base d'un modèle mathématique bien déterminée et développé avec le langage de programmation R.

✎ Fonctionnement du simulateur :

Le simulateur DafSim utilise le modèle DafMod calibré à partir des données préalablement collectées sur un dispositif de suivi de la dynamique. A partir de ce modèle, le simulateur calcule les paramètres de dynamique forestière tels que : les probabilités de croissance et de mortalité par classe de diamètre. En plus d'un certain nombre d'informations fournies par l'utilisateur telles que : la liste des essences à exploiter et de leur DMA respectif, intensité de prélèvement, durée de rotation... Le simulateur prédit l'évolution d'un peuplement forestier en appliquant sur ce dernier les exploitations sur périodicité bien définie, les dégâts d'exploitation après chaque exploitation et la dynamique naturelle à travers les phénomènes de : croissance, mortalité et régénération à chaque pas de temps. A l'issue de cette simulation des données représentant l'état prévisionnel de la forêt sur la plage d'année préalablement précisée sont générées. Elles serviront à notre logiciel d'aide à fournir aux aménagistes de forêt des outils d'exploration interactifs de données qui constitueront des outils d'aide à la décision.

2.1.2 Besoins du système

Les besoins du système informatique représentent la description de ce que le système doit faire, des services qu'il doit offrir et des contraintes liées à ses opérations. Ces besoins sont classés en deux catégories : les besoins fonctionnels et les besoins non-fonctionnels.

Besoins fonctionnels

Le logiciel DafSim qui fait l'objet de notre travail a un double objectif. Premièrement permettre de simuler la dynamique d'un peuplement forestier à l'aide d'une simulation informatique et deuxième offrir les outils d'aide à la décision aux aménagistes forestiers à travers des indicateurs extraites à l'aide d'une analyse des données issues de la simulation. Nous pouvons par conséquent distinguer trois grands groupes de fonctionnalités à ce niveau :

1. Les fonctionnalités liées à la simulation de l'évolution du peuplement forestier.

2. Les fonctionnalités liées à la gestion des indicateurs à suivre.
3. Les fonctionnalités liées à l'exploration des données issues de la simulation.

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

Elles consistent à fournir à l'utilisateur la possibilité de simuler l'évolution d'un peuplement forestier, en fournissant les paramètres liés à la dynamique proprement dite du peuplement et ceux caractérisant l'intervention de l'homme dans la forêt à travers des exploitations forestières appelés paramètres liés à l'exploitation. Voici les détails de ces paramètres :

- Les paramètres liés à la dynamique du peuplement forestier
 - Le nombre de répétition à réaliser dans la simulation pour marquer une variabilité du phénomène.
 - L'année de début de la simulation.
 - Les parcelles sur lesquelles la simulation aura lieu.
 - La durée de la rotation (qui correspond au temps de repos laissé à la forêt avant la prochaine exploitation au même endroit).
 - Le nombre de rotations.
 - Le nombre d'années avant la première exploitation.
 - La première année de comparaison des données simulées avec les données réelles.
- Les paramètres liés à l'exploitation
 - La liste des espèces à exploiter avec les informations sur ces espèces telles que :
 - Le nom de l'espèce.
 - Le code de l'espèce.
 - Le D.M.E.
 - Le D.M.A.
 - Le taux de prélèvement.
 - 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 cohérence et conformité de données saisies par l'utilisateur sera 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 permettre de la corriger.

↳ **Les fonctionnalités liées à la définition des indicateurs :**

Dans cette section nous donnons la possibilité à un utilisateur d'ajouter ou de modifier les informations d'un indicateur qu'il voudrait suivre pendant la simulation afin de visualiser son évolution dans le temps, en fonction des espèces et des classes de diamètres. Un indicateur est caractérisé dans notre système par les informations suivantes :

- Le nom de l'indicateur
- L'expression de la fonction mathématique ou sa fonction

↳ **Les fonctionnalités liées à l'exploration des données issues de la simulation :**

Cette partie des fonctionnalités est la plus importante pour les exploitants des concessions forestières car elle consiste à fournir aux aménagistes des exploitants forestiers des informations pertinentes sur un ensemble d'indicateurs leurs permettant d'avoir une vue prévisionnelle sur un ensemble d'indicateurs pertinents de la gestion durable des écosystèmes forestiers.

Il s'agit ici de permettre à l'utilisateur de choisir dans une liste d'indicateurs préalablement définis dans l'outil et que l'on peut modifier avant une simulation, un indicateur et de visualiser une courbe d'évolution sur une plage d'année ou par classe de diamètre et les données ayant servi à tracer la courbe.

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%).

Besoins non fonctionnels

A côté des besoins fonctionnels, se trouvent les besoins non fonctionnels ; ce sont des besoins secondaires représentant des contraintes liées aux services offerts par le système. Il s'agit dans ce cas :

- Le logiciel doit comporter une interface graphique conviviale et facile d'utilisation.
- Le logiciel doit être facilement installable et pouvant fonctionner sous le système d'exploitation Windows.
- Le logiciel doit pouvoir fonctionner sur une machine en local chez un utilisateur quelconque.

2.1.3 Recensement des contraintes

Les contraintes servent de critères de définition des architectures. Elles sont de deux natures à savoir : **les contraintes exprimées** et **les contraintes existantes**.

- **Les contraintes exprimées** : extraites des besoins fonctionnelles de l'utilisateur, dans notre cas elles concernent la modularité entre le simulateur, le module d'analyse statistique des données issues de la simulation et l'interface graphique car le simulateur est destiné à évoluer mais son changement ne devrait pas entraîner le changement des autres couches.
- **Les contraintes existantes** : celle que nous avons pu recenser est liée au langage de programmation utilisé pour le simulateur. Le langage de programmation utilisé est R compte tenu de sa puissance dans les traitements statistiques. Etant données que le logiciel à développer sera distribué avec le simulateur, et que le travail d'analyse que nous ferons sur les données issues de la simulation contient aussi des traitements statistiques, il serait judicieux de continuer à travailler avec ce langage de programmation pour prévenir des problèmes d'interopérabilité.

2.1.4 Les acteurs

Dans notre système nous ne faisons pas une différence entre les acteurs 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 de notre logiciel. C'est pour cette raison que dans notre système lorsque nous désignerons un acteur, nous l'appellerons simplement « utilisateur ».

2.1.5 Les cas d'utilisation

Nous donnons dans cette section une description détaillée de tous nos cas d'utilisations accompagnée de leur représentation graphique :

Simuler la dynamique d'un peuplement forestier

La dynamique d'un peuplement forestier est régie par trois processus à savoir : la croissance, la régénération et la mortalité. Etudier l'évolution d'un peuplement forestier revient à étudier l'effet de ces trois processus sur ce peuplement. Mais cette dynamique peut être influencée par certains phénomènes tels que : l'exploitation forestière.

Dans notre cas, nous voulons étudier l'impact de l'exploitation forestière sur la dynamique des peuplements forestiers. Pour cela, simuler la dynamique d'un peuplement forestier revient à connaître les paramètres liés à l'exploitation et d'autres paramètres caractérisant la dynamique (voir Figure 2.1). Saisir les paramètres liés à l'exploitation c'est le cas d'utilisation offrant la possibilité à l'utilisateur de réaliser les scénarios d'exploitation forestière sur le peuplement forestier, en précisant : la liste des essences exploitées et leur DMA respectif, intensité de coupe, ... et la proportion des arbres morts par classe de diamètres due aux dégâts d'exploitation.

Saisir les paramètres liés à la simulation des processus de la dynamique forestière revient à préciser les paramètres tels que le nombre de simulation pour marquer la variabilité du phénomène, l'année de début de la simulation, l'année de la première rotation, les parcelles à simuler, etc...

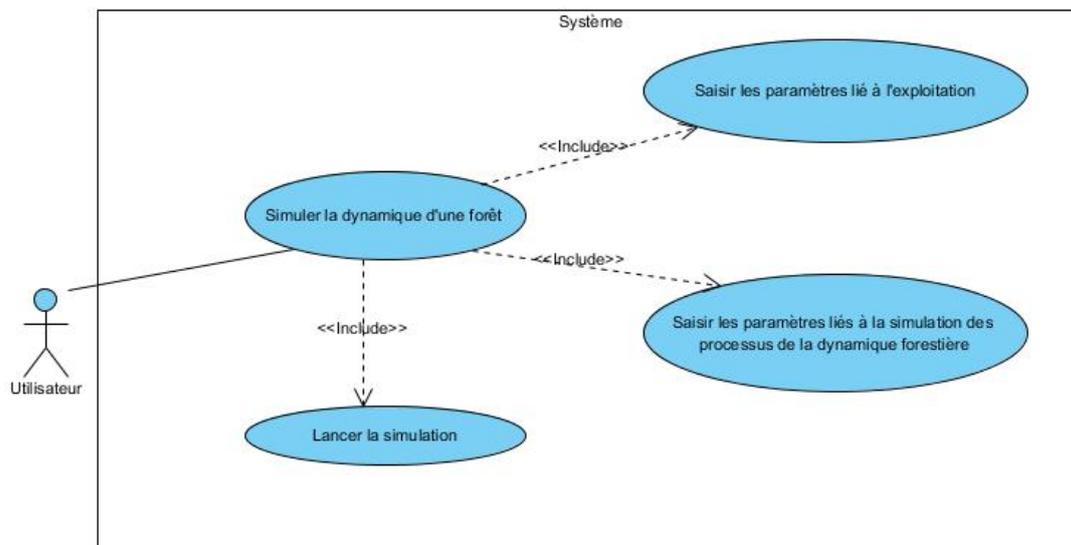


FIGURE 2.1 – Diagramme de cas d'utilisation - Simuler la dynamique d'un peuplement forestier.

Gestion les indicateurs forestiers

Pour généraliser l'extraction des informations des données simulées, nous avons ajouté la possibilité d'étendre la liste des indicateurs à suivre par l'utilisateur. Un indicateur est caractérisé par son nom et l'expression mathématique qui lui est associée. L'unicité d'un indicateur étant identifiée sur le nom de l'indicateur. Il faut noter que la généralisation des indicateurs est limitée par des mesures récoltées sur les arbres. Par exemple dans notre cas les formules des indicateurs que nous manipulons dans le système ne peuvent être que fonction du diamètre des arbres. On pourra toujours obtenir l'évolution de ces indicateurs sur la plage temporelle de la simulation, pour le peuplement, les groupes d'espèces ou une espèce particulière.

La gestion des indicateurs consiste ici à l'ajout, la modification ou même la suppression des indicateurs comme le montre la Figure 2.2.

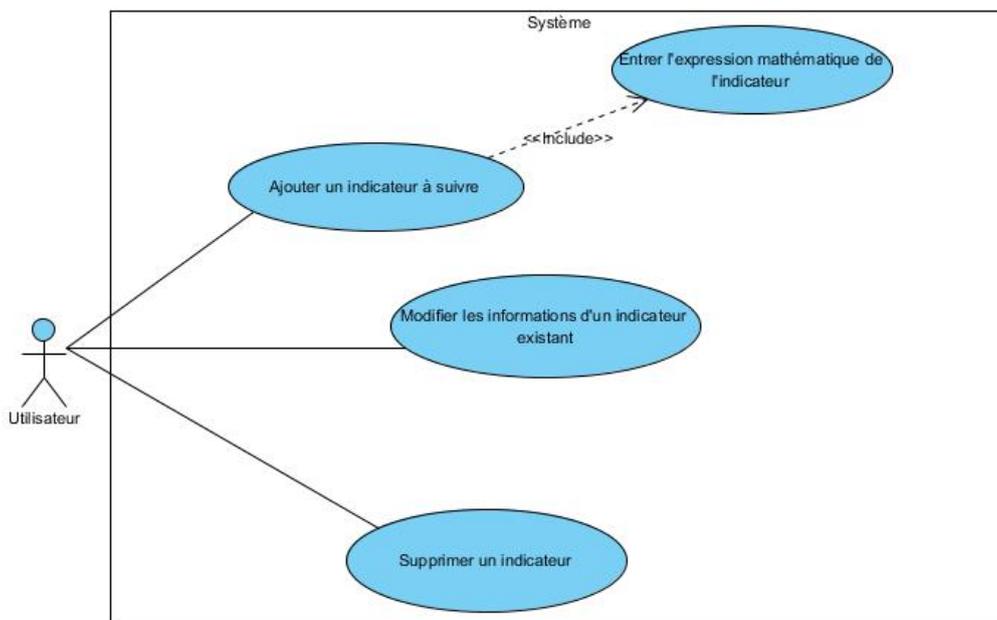


FIGURE 2.2 – Diagramme de cas d'utilisation - Gérer les indicateurs forestiers.

Visualiser un indicateur de la gestion forestière

Pour évaluer la gestion d'un écosystème forestier, les exploitants des concessions forestières peuvent se baser sur l'évolution de certains indicateurs dans le temps, de certains groupes d'espèces ou d'une espèce prioritaire et dans certaines classes de diamètre. Ceux-ci permettent par exemple d'avoir une estimation sur le taux de reconstitution du stock, l'évolution de la biomasse et de prédire le rendement économique sur la base de la prédiction du stock et du volume exploitable. Voir Figure 2.3

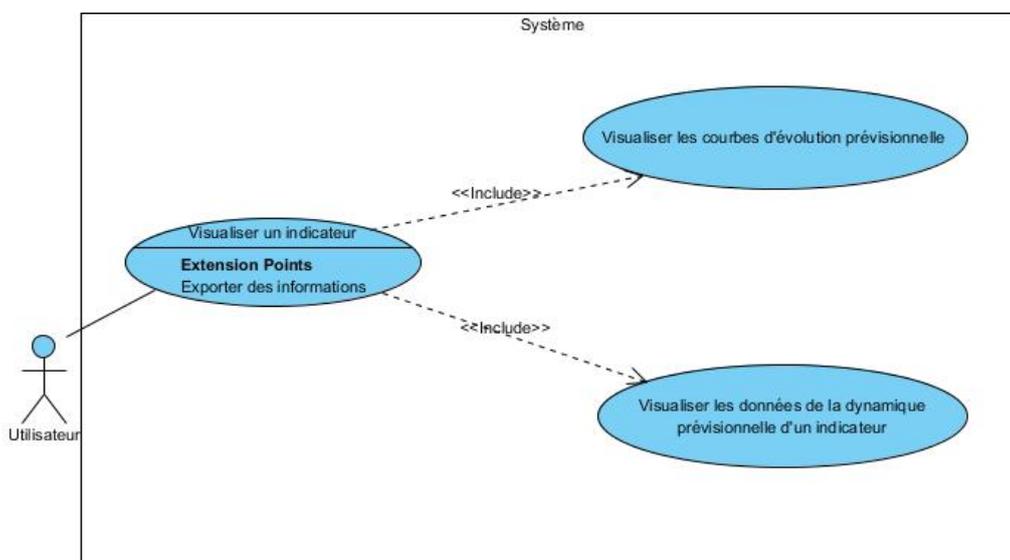


FIGURE 2.3 – Diagramme de cas d'utilisation - Visualiser un indicateur de la gestion forestière.

Exporter les informations

Dans ce cas d'utilisation il s'agit de permettre à l'utilisateur d'exporter des informations tels les courbes d'évolution des indicateurs et les valeurs de ces indicateurs obtenues après une simulation sous les formats : jpeg, PDF, csv etc... Voir Figure 2.4

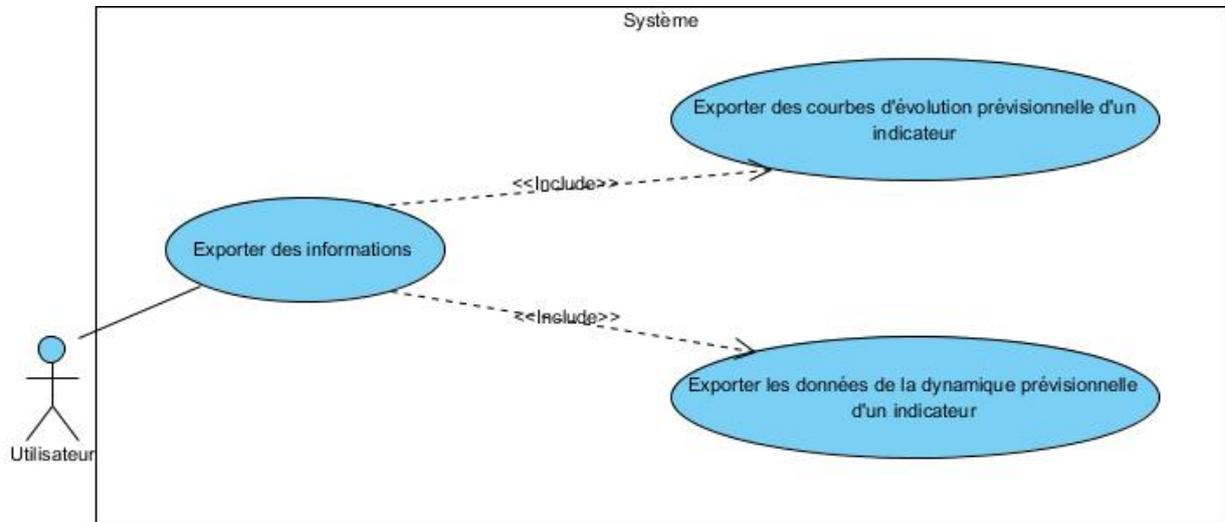


FIGURE 2.4 – Diagramme de cas d'utilisation - Exporter les informations.

2.1.6 Diagramme global de cas d'utilisation

Le Diagramme global de cas d'utilisation (voir Figure 2.5) représente une vue globale de notre système, en terme de fonctionnalités offertes à l'utilisateur.



FIGURE 2.5 – Diagramme global de cas d'utilisation.

2.1.7 Workflow

Simulation de la dynamique forestière

Le workflow de la simulation de la dynamique forestière (Figure 2.6) représente la séquence d'actions à suivre pour arriver à lancer une simulation dans notre système. Pour ce faire l'utilisateur doit saisir les paramètres liés à l'exploitation, puis les autres paramètres nécessaires à la simulation de la dynamique forestière. Une fois la simulation lancée, une validation des paramètres saisis est effectuée. La simulation est effectivement lancée lorsque cette validation se passe sans problème si non, on revient à la saisie des paramètres.

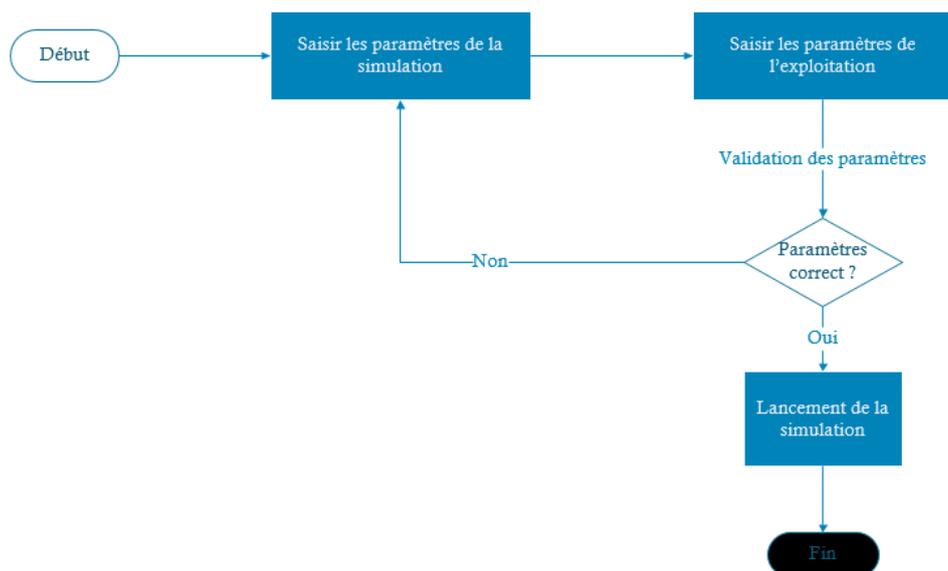


FIGURE 2.6 – Workflow - Simulation de la dynamique forestière.

Gestion des indicateurs forestiers

La gestion consiste à l'ajout, la modification et la suppression d'un indicateur. Il faut au départ choisir l'action à effectuer comme le montre la Figure 2.7. L'ajout revient à préciser le nom de l'indicateur et sa fonction mathématique et la modification à mettre à jour ces mêmes informations.

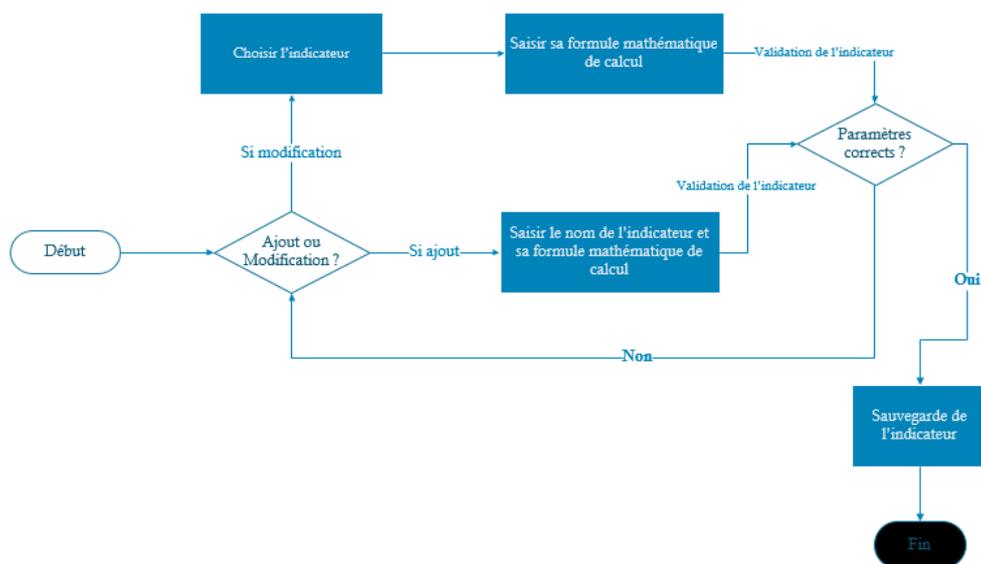


FIGURE 2.7 – Workflow - Gestion des indicateurs forestiers.

Visualiser un indicateur de la gestion forestière

Pour visualiser un indicateur forestier, le système offre une liste d'indicateurs qui peut être mise à jour dans la section gestion des indicateurs forestiers par ajout, modification ou suppression.

Une fois l'indicateur sélectionné, il faut choisir le groupe d'espèces pour lequel on veut visualiser l'indicateur, la plage de diamètre des arbres de ce groupe et la plage temporelle dans laquelle on veut visualiser l'indicateur. Après validation une vérification de la cohérence des paramètres est effectuée et la visualisation s'ensuit si et seulement si la vérification se passe sans erreurs. Si oui on retourne aux choix des paramètres de l'indicateur ou au choix d'un autre indicateur.

La suite d'actions pour effectuer ce cas d'utilisation est représentée sur la Figure 2.8

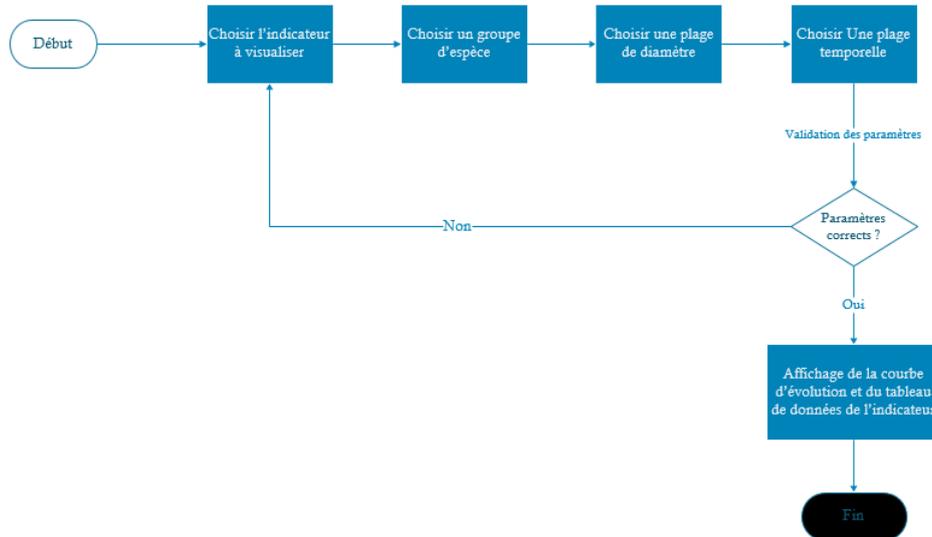


FIGURE 2.8 – Workflow - Visualiser un indicateur de la gestion forestière.

2.2 CONCEPTION

2.2.1 Choix des indicateurs forestiers

Liste des indicateurs

Nous avons pu ressortir pendant la phase d'analyse une liste de ces indicateurs que nous fournirons comme outils d'aide à la décision dans notre solution. Ces indicateurs ont été retenus pendant les recherches menées dans le cadre de ce projet comme des indicateurs les plus pertinents dans la gestion durable des écosystèmes forestiers et plus utilisés par les gestionnaires pour mesurer l'évolution de leur stock en bois. Voici ci-dessous cités les indicateurs de cette liste :

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

Les formules de calcul de ces indicateurs sont présentées dans la Table 2.1

TABLE 2.1 – : Tableau des formules des indicateurs forestiers contenus par défaut dans l’outil.

Indicateurs forestiers	Formules
Surface terrière	$G = n_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_1^2 + n_2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_2^2 + \dots + n_j \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_j^2 = \frac{\pi}{4} \cdot \sum n_i d_i^2$ où n_i et d_i représente respectivement le diamètre moyen et l’effectif de la classe de diamètre i
Volume	$V = 10^{-2.96+1.93 \log D}$ avec le D le diamètre moyen par classe de diamètre
Biomasse	$AGB = WSD * \exp(-1.449 + 2.148 \ln(D) + 0.207(\ln(D))^3 + 0.028(\ln(D))^3)$ avec le D le diamètre moyen par classe de diamètre et WSD la densité du bois.
Nombre(Stock) d’arbres	$N = \sum n_i$ avec n_i l’effectif du groupe d’espèce dans la classe de diamètre i .
Taux de reconstitution	$\%R = \left[\frac{\text{stock_après_rotation}_{\geq DME}}{\text{stock_initial_rotation}_{\geq DME}} \right] * 100.$
Volume exploitable	Volume d’arbres du groupe d’espèce dont le diamètre est supérieur ou égale au DME.
Stock exploitable	Stock d’arbres du groupe d’espèce dont le diamètre est supérieur ou égale au DME.

2.2.2 Architecture de la solution

Architecture applicative

La solution proposée s’appuie sur les données produites par le simulateur après une simulation, par contre le simulateur utilise les données collectées sur le dispositif sylvicole. En s’inspirant des composants de l’algorithme de la méthode de Monte Carlo, nous avons pu mettre en place les différents blocs de notre architecture applicative de notre solution. Nous avons opté pour une architecture en couche dans laquelle nous avons notre boîte noire, le moteur de simulation qui reçoit des paramètres rentrés par l’utilisateur à partir de notre interface graphique. Après la simulation, les données en sortie sont stockées dans une base de données par l’intermédiaire d’une couche de persistance (DAO) et analysées par notre module d’analyse de données qui utilisera notre interface graphique pour afficher les résultats obtenus. La Figure 2.9 représente le schéma de cette architecture applicative.

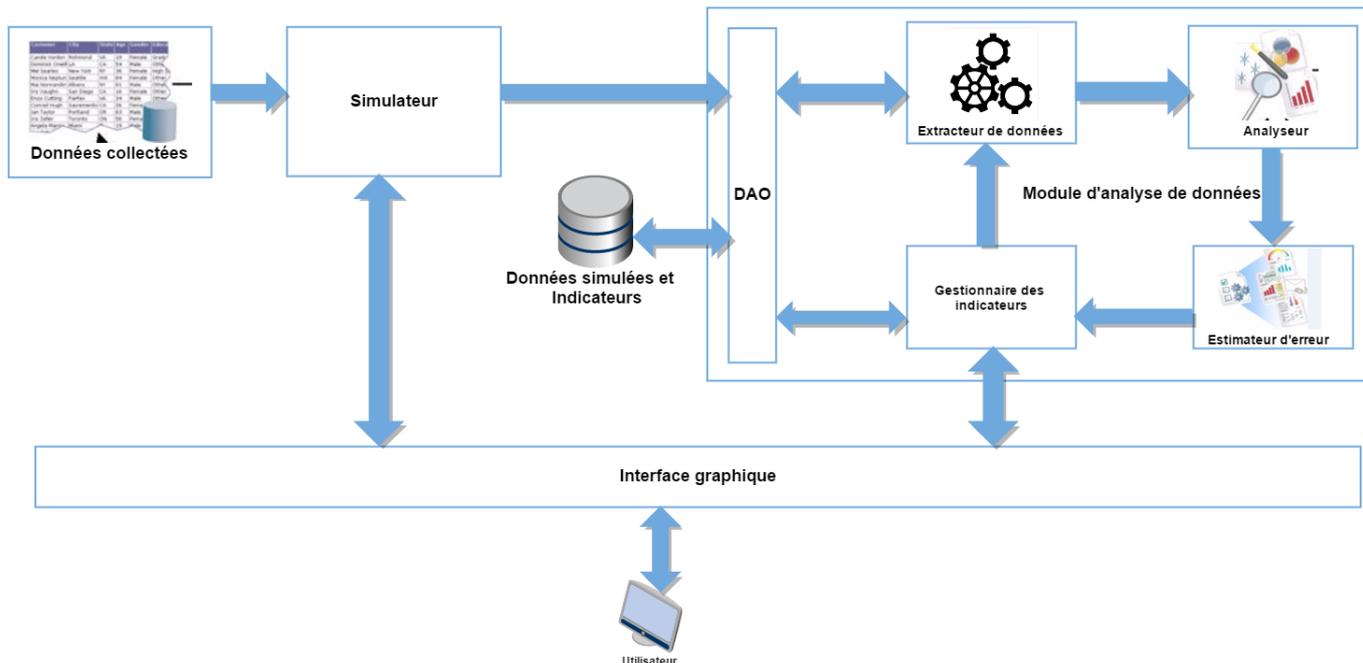


FIGURE 2.9 – Architecture applicative de notre solution.

- **L'extracteur de données** : est le bloc chargé d'extraire de l'ensemble des données en sortie du simulateur, les valeurs de l'indicateur l'on voudrait visualiser.
- **L'analyseur** : est le bloc de calcul qui utilise les méthodes de la statistique descriptive tel que : la médiane, la moyenne, etc... pour estimer la valeur de l'indicateur forestier à partir de ses valeurs des différentes simulations.
Pour chaque valeur x_{it} au temps t de la simulation i , la valeur x_t de l'indicateur au temps t est égale à la médiane de toute les valeurs x_{it} de toutes les simulations i au temps t .
- **Estimation d'erreur** : est le bloc de calcul de l'intervalle de confiance des valeurs d'un indicateur forestier donné.
Pour chaque valeur x_{it} au temps t de la simulation i , la borne supérieure de l'intervalle de confiance est le quantile à 97.5% au temps t et la borne inférieure est le quantile à 2.5% au temps t de toutes les valeurs x_{it} de toutes les simulations i au temps t .
- **Le gestionnaire des indicateurs** : est le bloc de gestion des indicateurs chargé d'enregistrer, modifier et supprimer des indicateurs et de sauvegarder toutes ces informations. C'est dans ce bloc que se passe la transformation des expressions mathématiques en une fonction correspondant au langage d'implémentation.

Architecture logicielle

En nous inspirant du patron de conception M.V.C[[Wik15](#)] et des différents blocs de notre architecture applicative, nous pouvons donc remarquer que notre outil peut être représenté de manière logicielle par une architecture en couche composée de trois couches logicielles :

- **La couche de présentation** : c'est la couche visible par l'utilisateur, elle qui reçoit les données venant de ce dernier et lui présente les résultats produits à la suite de

l'exécution d'un cas d'utilisation.

- **La couche de traitement** : elle représente la couche dans laquelle se passe tous les traitements liés à la simulation ou à l'analyse des données pour le calcul des indicateurs forestiers.
- **La couche de persistance** : elle représente la couche par laquelle toutes les données issues de la simulation et celles des indicateurs forestiers à visualiser passe avant d'être stocker dans une base de données.

Une représentation graphique de cette architecture est donnée à la Figure 2.10.

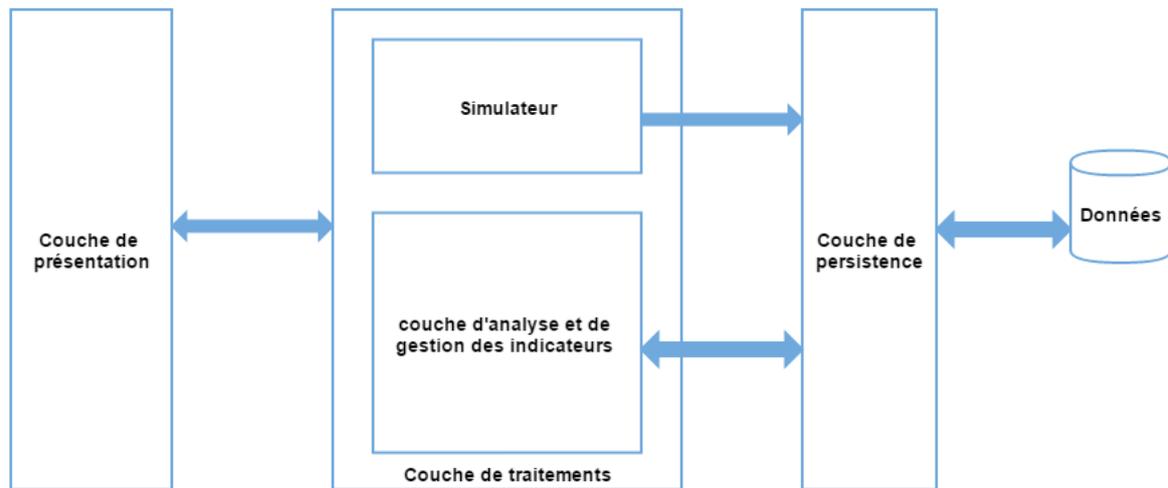


FIGURE 2.10 – Architecture logicielle de notre solution.

Architecture physique

Dans le souci de mettre en place une solution pouvant s'exécute tant bien en local sur un PC qu'en mode distribué entre plusieurs utilisateurs nous avons opté pour une architecture physique client-serveur en utilisant un serveur web pour servir les pages web de notre logiciel, serveur de base de données les données de la simulation et celles des indicateurs à visualiser et un serveur de fichiers pour stocker les fichiers de l'application. Les utilisateurs peuvent via un réseau accéder à notre application, en passant par le serveur web. Cette architecture peut aussi bien être déployée sur un PC en local, en y installant tous les outils nécessaires pour le fonctionnement de l'architecture. La représentation graphique de notre architecture est donnée à la Figure 2.11.

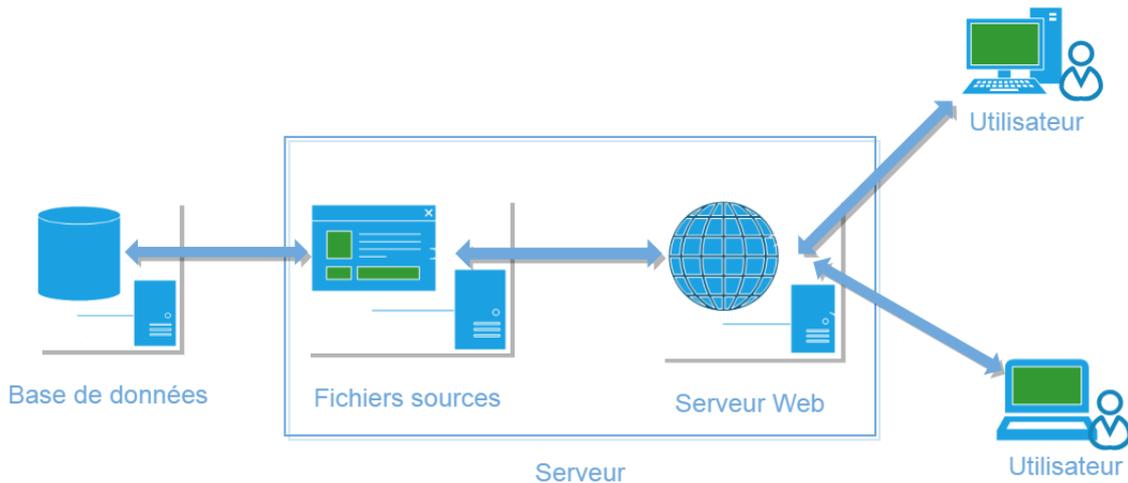


FIGURE 2.11 – Architecture physique de notre solution.

2.2.3 Modélisation des données et Diagramme de classe

Architecture des données issues de la simulation

Les données issues de la simulation ont une structure particulière basée sur les différentes structures de données que nous rencontrons dans le langage de programmation R à savoir les *dataframe*, *list*, *vecteurs*, *matrices*, etc... Nous avons ressorti la structure de ces données présentée sur la Figure 2.12

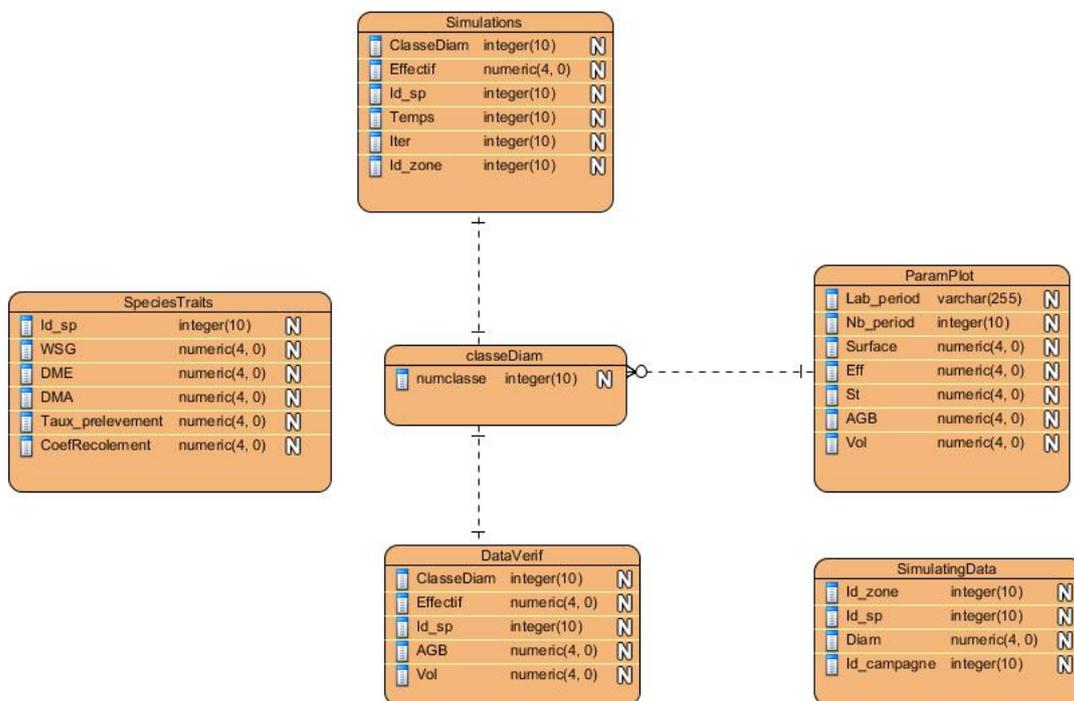


FIGURE 2.12 – Architecture des données issues de la simulation.

Diagramme global de classe du système.

Nous avons un diagramme de classe composé de deux sous diagrammes de classe correspondant aux cas d'utilisation : la simulation de la dynamique forestière et la visualisation des indicateurs forestiers. La description des classes est donnée dans le tableau 2.2 ci-dessous :

TABLE 2.2 – : Tableau de description des classes de notre système.

Nom de la classe	Description
SpecieTrait	La classe représentant une essence exploitée
Damage	La classe représentant un dégât post-exploitation d'une classe de diamètre
Param_logging	La classe représentant les paramètres de l'exploitation.
Param_simulation	La classe représentant les autres paramètres nécessaires à la simulation.
Data_simulation	La classe correspondant aux à tous les paramètres de la simulation.
AdaptateurIndicateur	L'interface permettant de faire correspondre entre l'expression mathématique à une fonction R.
I_indicateur	L'interface de généralisation des indicateurs.
IndicateurForestier	La classe concrète représentant un indicateur.

La Figure 2.13 donne la représentation graphique de ce diagramme de classe :

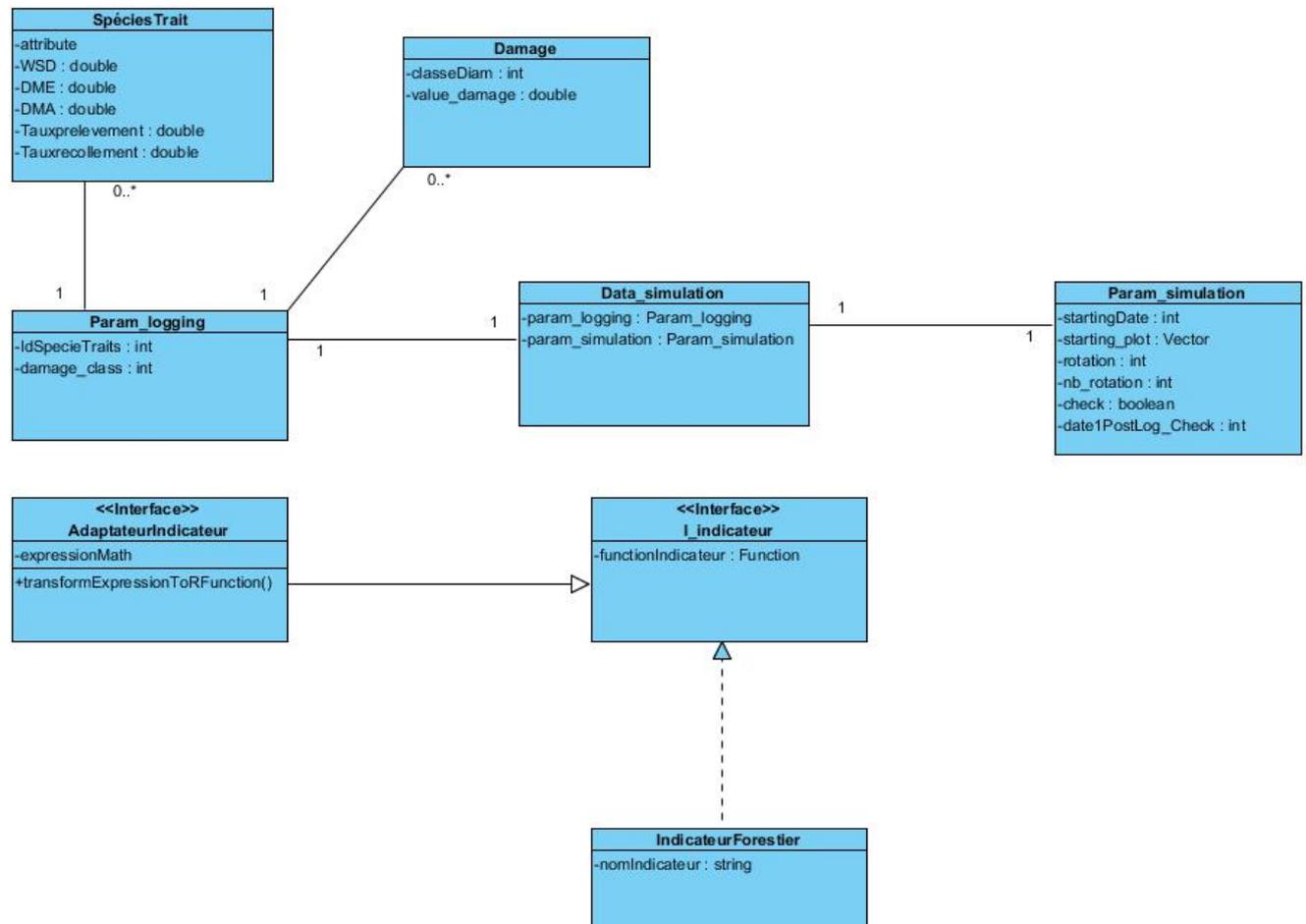


FIGURE 2.13 – Diagramme global de classe.

2.2.4 Conception de la couche de présentation

La couche de présentation est la première partie de notre application en contact directe avec notre utilisateur. Il est donc primordial de la concevoir à travers un prototypage avec un choix bien mesuré des couleurs de cette dernière. Nous avons adopté une structure simple en matière de graphisme en vue de permettre à l'utilisateur de retrouver et d'accéder facilement aux informations. L'interface comporte trois parties principales à savoir :

- **L'entête** : la bande bleue au-dessus comportant simple le nom que nous avons attribué à l'application à savoir : « DafSim ». c'est un bloc statique, il reste fixe durant toute la navigation de l'utilisateur.
- **Le bloc latéral** : la bande verticale noire comportant les différentes fonctionnalités de nos modules et les différentes rubriques de notre application. Nous les avons présentés ici sous forme de menu : « Accueil », « Simulation » (le module de simulation), « Visualisation » (le module de visualisation des résultats issus de l'analyse des données) et « Aide » (la rubrique réservée au manuel d'utilisation). Il est aussi statique.
- **Le bloc central** à l'intérieur duquel nous affichons les informations liées à chaque rubrique. C'est le seul bloc dynamique de l'application. Nous l'utiliserons le plus souvent pour interagir avec l'application.

Le prototypage dans le cadre de la conception des interfaces s'est réalisé avec le logiciel « Pencil ». le prototype général est présenté sur la Figure 2.14

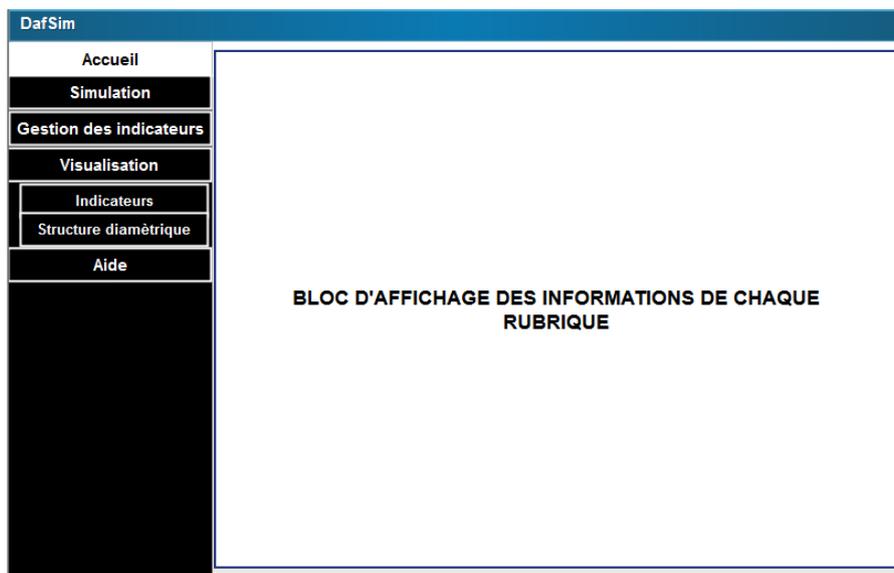


FIGURE 2.14 – Prototype de l'IHM de « DafSim ».

BILAN DU CHAPITRE

Rendu au terme de ce chapitre, nous avons défini clairement les étapes suivies de notre méthodologie pour la mise en place de cette solution après l'étude du simulateur que nous avons présenté au chapitre 1.

L'analyse des besoins du système nous a amené à suivre rigoureusement les étapes suivantes :

- L'identification et l'établissement des formules des indicateurs forestiers à suivre.
- La modélisation des données issues de la simulation et des classes entités de notre système.
- L'établissement des formats de restitution des données (courbes d'évolution, tableau de données, jpg, csv, etc...)
- La conception des architectures applicative, logicielle et physique de notre solution

D'une manière générale cette partie nous permis d'ajouter au simulateur existant une couche d'analyse des données issues du simulateur, une interface graphique pour la restitution des informations et le pilotage du simulateur et enfin une couche de persistance données qui gère la sauvegarde et la lecture des données. Nous avons ainsi acquis une base nécessaire pour l'implémentation de notre solution.

IMPLEMENTATION ET RESULTATS

INTRODUCTION

L'implémentation de la solution utilise plusieurs technologies, la plupart étant les technologies du langage de calcul statistique R que nous avons choisi comme langage d'implémentation de la solution compte tenu des contraintes recensés au chapitre2. Elle s'est basée sur les architectures de notre solution telles que présentées dans ce même chapitre2.

Nous pouvons tout simplement dire que nous disposons d'une base solide pour aborder la phase d'implémentation de cette solution et nous ne saurons la terminer sans bien évidemment présenter les résultats obtenus.

3.1 CHOIX DES OUTILS

3.1.1 Choix des outils de manipulation des données

Le choix des outils de stockage et de manipulation des données a été une tâche très difficile pour nous car compte tenu des contraintes liées au déploiement de cet outil comme nous l'avons mentionné plus haut, nous nous sommes penchés vers des solutions qui ne nécessitaient aucune configuration quelconque.

Le logiciel R utilisé dans le cadre de l'implémentation de cet outil nous offre déjà des outils de stockage de données sous le format *.RData et des packages très puissants de manipulation de ces données :

Les fichiers binaires RData

Les fichiers R portant l'extension .RData ou .rda et peuvent être lus et écrits avec respectivement les commandes `load()` et `save()`. Ils sont généralement utiles pour sauvegarder des fichiers de données dans un format compressé (prenant moins de place sur le disque), et plus rapides à charger. On peut également utiliser ce format pour enregistrer n'importe quel objet R (une variable ou un tableau par exemple), voire plusieurs variables.

Le package « data.table »

Le package `data.table` est un package développé par Matthew Dowle, un ancien de Lheman Brothers¹. C'est un package qui nous a permis de lire et de manipuler les données. Il permet d'importer des données assez volumineuses avec la fonction `fread()` et leur manipulation comme tout autre *data.frame*². L'importation des données volumineuse avec ce package est très rapide (par exemple 20Go, soit à peu près 200 millions d'individus, en 8mn alors qu'avec R ou d'autres logiciels, ça prendrait des heures).

3.1.2 Choix des outils d'implémentation de la interface graphique

Le package « shiny » : outil de création de l'interface graphique

Le package « shiny » est un nouveau package de R disponible pour tous les utilisateurs du logiciel permettant de construire des applications web interactives avec R. Il permet de construire des interfaces web avec seulement des lignes de codes depuis 4 sans l'utilisation de JavaScript. C'est une manière simple et efficace de créer des applications interactives où les sorties se mettent à jour au fur et à mesure que les entrées sont modifiées sans nécessiter un rechargement du navigateur. L'avantage de ce package est qu'il n'est pas nécessaire de connaître de langage HTML ou Java, une simple expérience avec R est requise. Il combine la puissance statistique de R et la programmation web. Il permet de laisser aux utilisateurs le choix des paramètres d'entrées à l'aide des commandes comme le curseur, les menus déroulants ou encore les champs de texte. Il est également possible d'intégrer facilement toutes sortes de sorties comme des tableaux, des graphiques, ou encore des résumés.

La conception d'une interface avec ce package R repose sur deux fichiers : un fichier pour

1. C'était une banque d'investissement multinationale créée en 1850, proposant des services financiers diversifiés, Le siège social de la firme se trouvait à New York.

2. Une structure de données sous R

l'aspect graphique de l'interface (ui.R) et un fichier pour l'aspect contenu et gestion des événements sur l'interface (server.R).

3.1.3 Choix des outils d'analyse de données

L'analyse faite sur les données dans le cadre de ce travail utilise les fonctions de la statistique descriptive telles que la médiane, le quantile, le moyenne, etc... qui sont contenues dans la moteur (package) de base de R avec plusieurs autres outils puissants de statistique et manipulation de données. Nous n'avons pas eu besoin d'une autre extension à ce niveau.

3.1.4 Choix de l'IDE.

L'interface de R est assez rudimentaire. voir Figure 3.1.

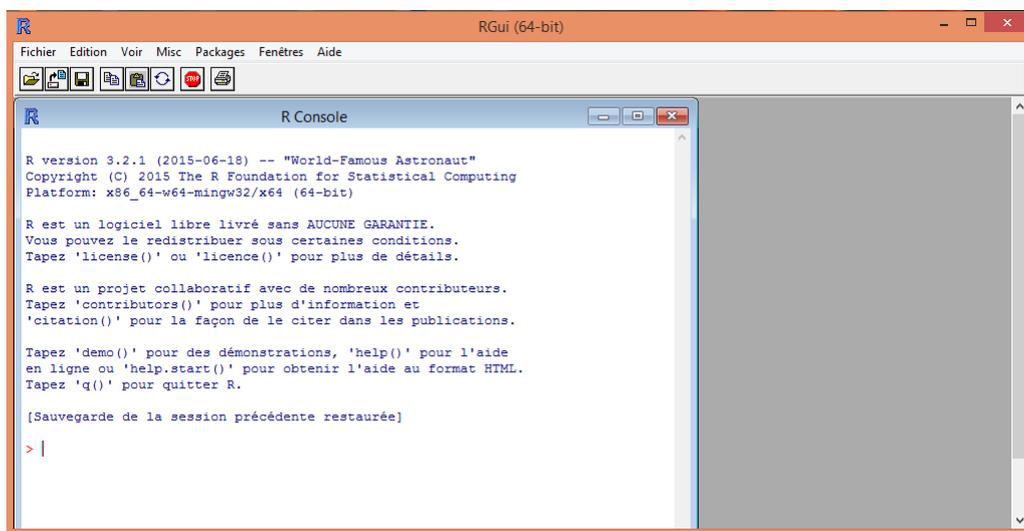


FIGURE 3.1 – Interface de R sous Windows.

RStudio(Figure 3.2) 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 simultanée 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 de base, divers outils comme par exemple la production de rapports au format **Rmarkdown**. Il est en développement actif et de nouvelles fonctionnalités sont ajoutées régulièrement. Son principal défaut est d'avoir une interface uniquement anglophone.

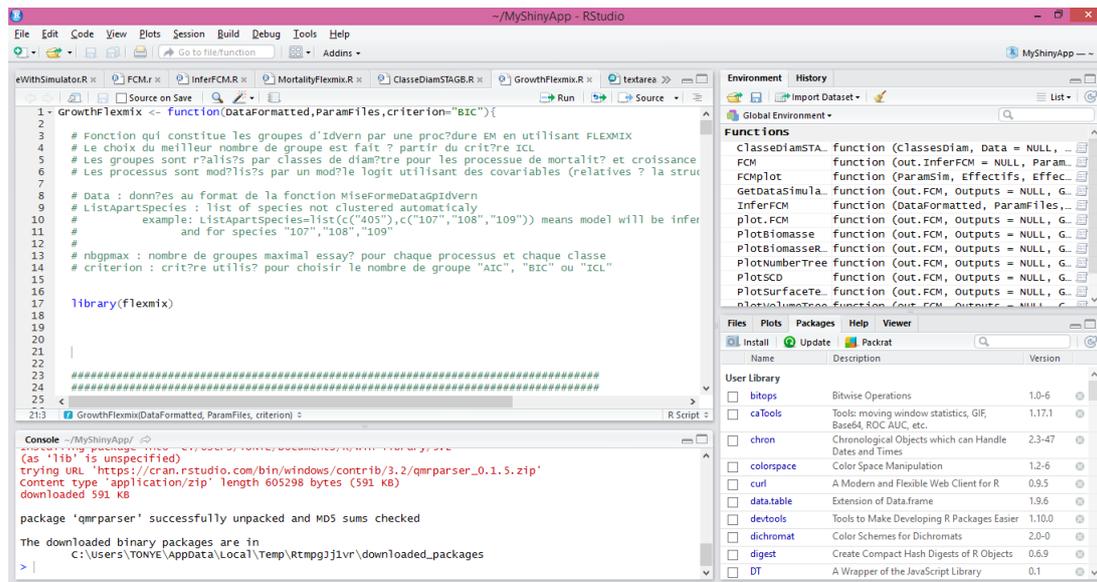


FIGURE 3.2 – Interface de RStudio sous Windows.

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**. Cependant, à part les éléments portant sur l'interface de **RStudio**, mais également de plusieurs extensions développées dans le cadre de ce projet, vous pouvez suivre le blog dédié : <http://blog.rstudio.org/>.

3.2 DEPLOIEMENT

Nous avons développé notre solution entièrement avec le langage de programmation R qui ne peut fonctionner sans l'existence du logiciel R. Nous lui avons associé une extension shiny qui nous permet de développer et d'exécuter des applications web par l'intermédiaire d'un navigateur web.

Notre architecture physique prévoit l'utilisation d'un serveur web pour servir les pages web de notre application qui ont été développées avec le package shiny et le logiciel R. Le serveur sous R qui permet de jouer ce rôle est « Shiny Server » (Combinaison entre le logiciel R et le package shiny). Nous avons conçu notre diagramme de déploiement (Figure 3.3) en prévoyant un serveur contenant « Shiny Server », un serveur de fichiers pour stocker les fichiers de l'application et les fichiers binaires constituant notre base de données et la machine du client contenant un navigateur web.

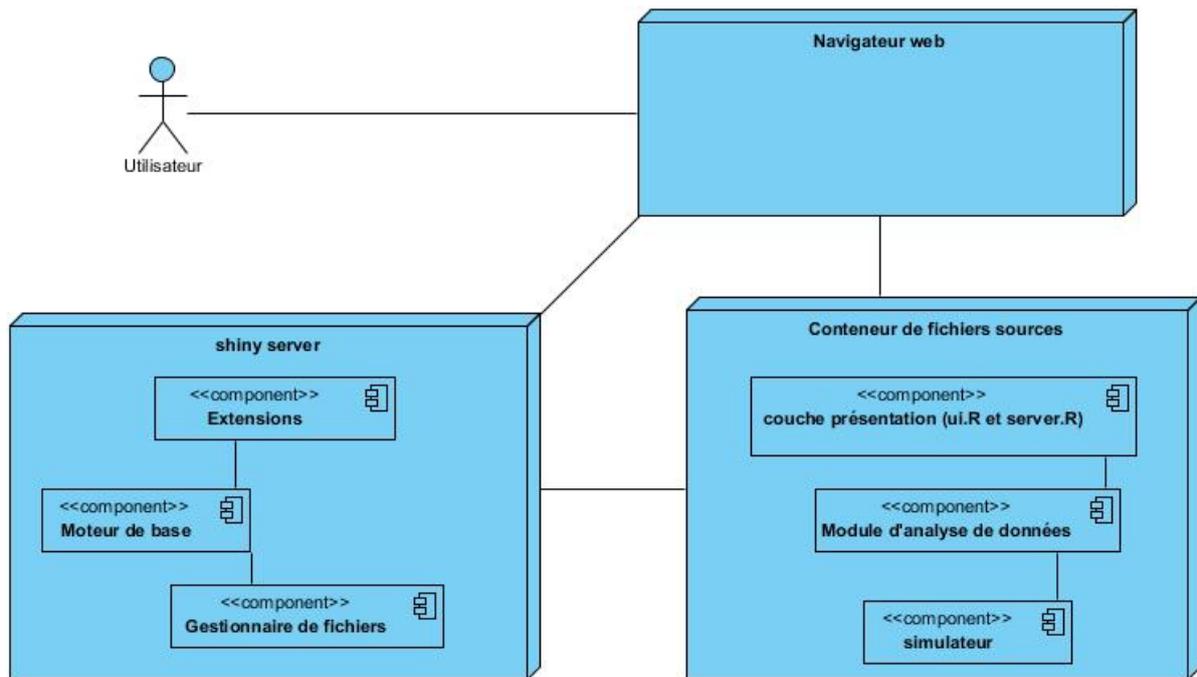


FIGURE 3.3 – Diagramme de déploiement.

3.3 PRESENTATION DE QUELQUES RESULTATS

3.3.1 Présentation du logiciel « DafSim »

Nous avons clairement présenté dans la rubrique « Conception de l’IHM » la structure que nous avons adoptée pour la construction de nos interfaces graphique, en présentant les différentes parties de notre IHM. Ces parties ressortiront dans la présentation des différents modules offrant les fonctionnalités de notre logiciel.

Page d’accueil de l’outil

C’est la page qui s’affiche dès le lancement de l’application. Elle comporte les trois comme nous l’avons évoqué ci-dessus. A l’intérieur du bloc central, le seul bloc dynamique de l’application, nous retrouvons le logo du projet DynAffor et une petite description de l’outil comme le montre la Figure 3.4



FIGURE 3.4 – Page d’accueil du logiciel « DafSim ».

Module de simulation de la dynamique forestière

Nous avons regroupé les fonctionnalités liées à ce module dans le menu « Simulation ». Pour simuler la dynamique d’une forêt ici l’utilisateur doit nous préciser un certain nombre de paramètres liés à l’étude de la dynamique de cette forêt dans le temps et dans l’espace comme le montre la Figure 3.5

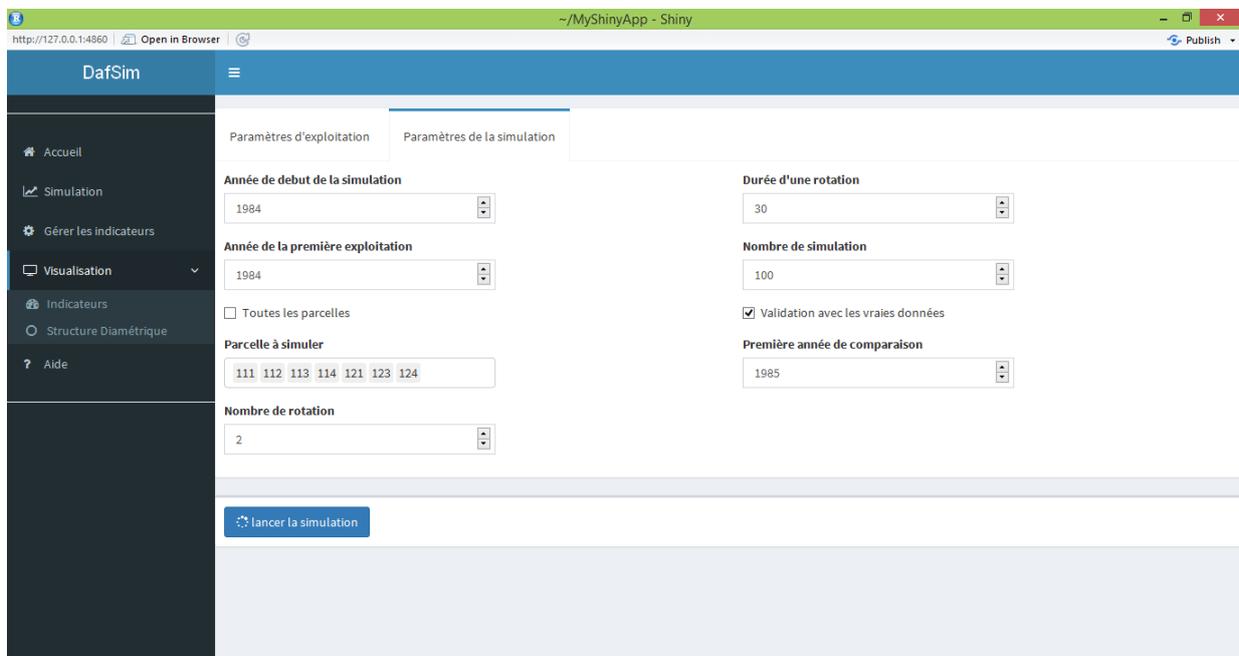


FIGURE 3.5 – Les Paramètres liés à la dynamique naturelle pour une simulation.

En plus des paramètres liés au temps et à l’espace, l’étude de la dynamique forestière dans le bassin du Congo vise aussi à mesurer l’impact des perturbations tel que : l’ex-

pl exploitation forestière sur la dynamique des peuplements forestiers, nous donnons aussi la possibilité à l'utilisateur de spécifier les paramètres liés à l'exploitation forestière comme représenté sur la Figure 3.6

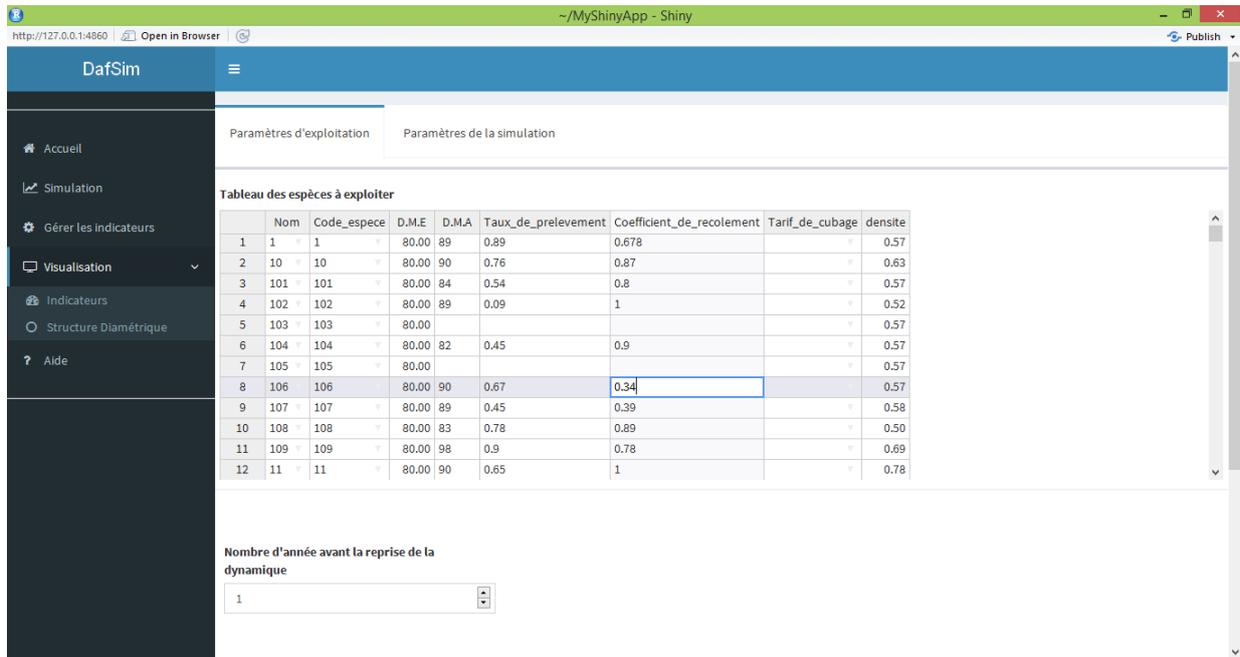


FIGURE 3.6 – Les Paramètres de l'exploitation - Tableau des espèces à exploiter.

Chaque ligne de ce tableau représente une espèce. Exploiter une espèce ici revient à spécifier sur sa ligne correspondante ses différents paramètres comme indiquer sur l'entête de ce tableau. Pour finir vous pouvez aussi spécifier le vecteur des intensités des dégâts causés par l'exploitation forestière sur le peuplement forestier en fonction des classes de diamètre comme le montre la capture d'écran de la Figure 3.7

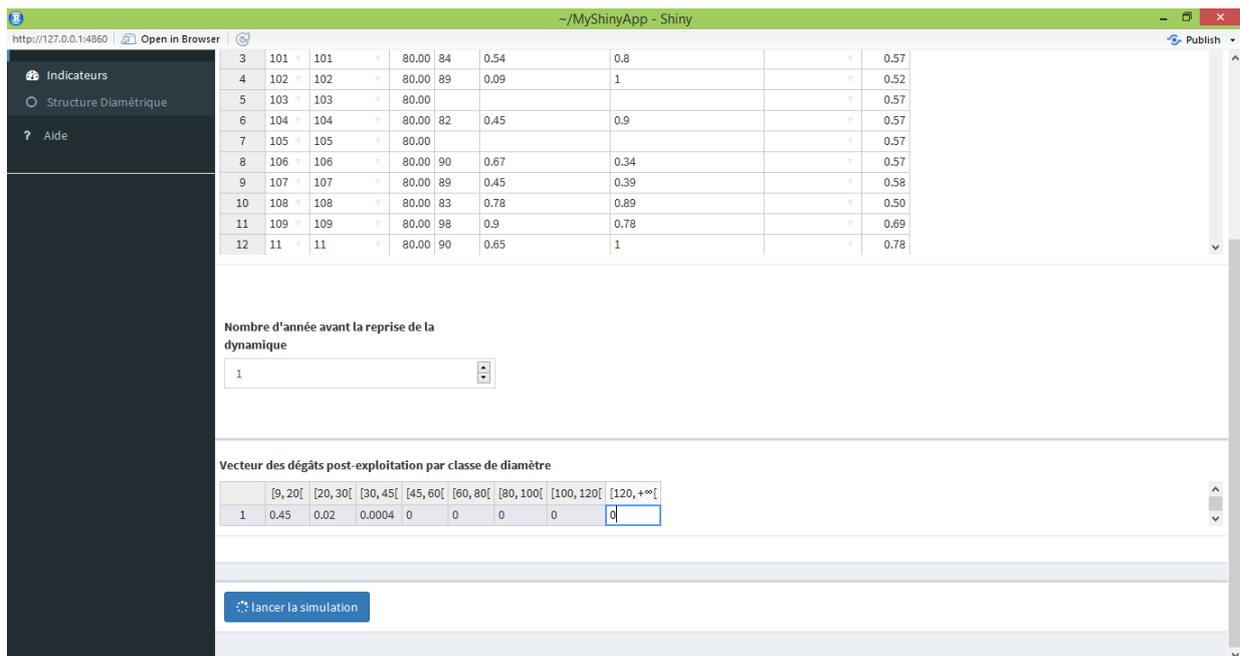


FIGURE 3.7 – Les Paramètres de l'exploitation - Dégâts post-exploitation.

Une fois toutes les informations nécessaires à la simulation sont renseignées, on peut lancer la simulation, en cliquant sur le bouton « Lancer la simulation ».

La gestion des indicateurs

La gestion des indicateurs est la rubrique dans laquelle l'utilisateur a la possibilité de définir d'autres indicateurs en plus de ceux que nous avons implémenté par défaut en saisissant juste le nom de l'indicateur et sa fonction mathématique associées comme présenté sur la Figure 3.8

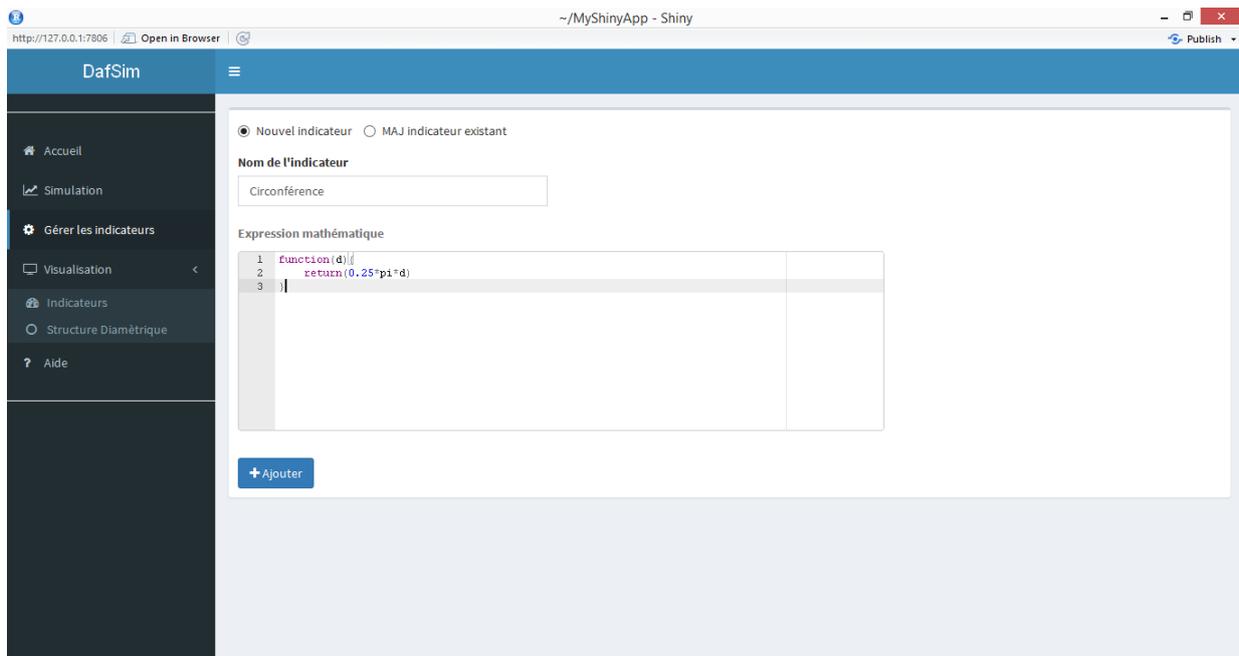


FIGURE 3.8 – Interface d'ajout d'un indicateur.

Il pourra de la même manière modifier un indicateur, en le choisissant de la liste des indicateurs disponible pour la modification et mettre à jour ses informations. Son interface se présentée sur la Figure 3.9 :

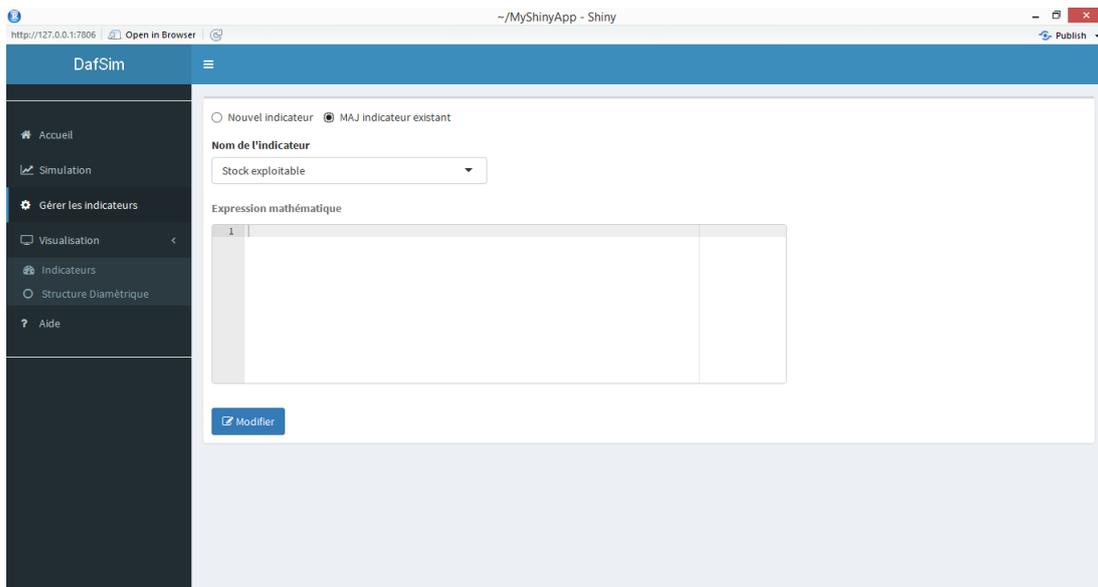


FIGURE 3.9 – Interface de modification d’un indicateur.

Visualisation des indicateurs forestiers

Nous avons séparé la partie de visualisation des indicateurs en deux sous-parties « Indicateur » et « Structures diamétrique » car la structure diamétrique est un indicateur particulier qui ne se calcule pas comme les autres et est souvent divisé en structure diamétrique cumulée et structure diamétrique sous forme d’effectif repartie par classe de diamètre.

La structure diamétrique cumulée montre l’évolution de la proportion des effectifs des arbres pour chaque classe de diamètre sur la plage temporelle de la simulation(voir Figure 3.10)

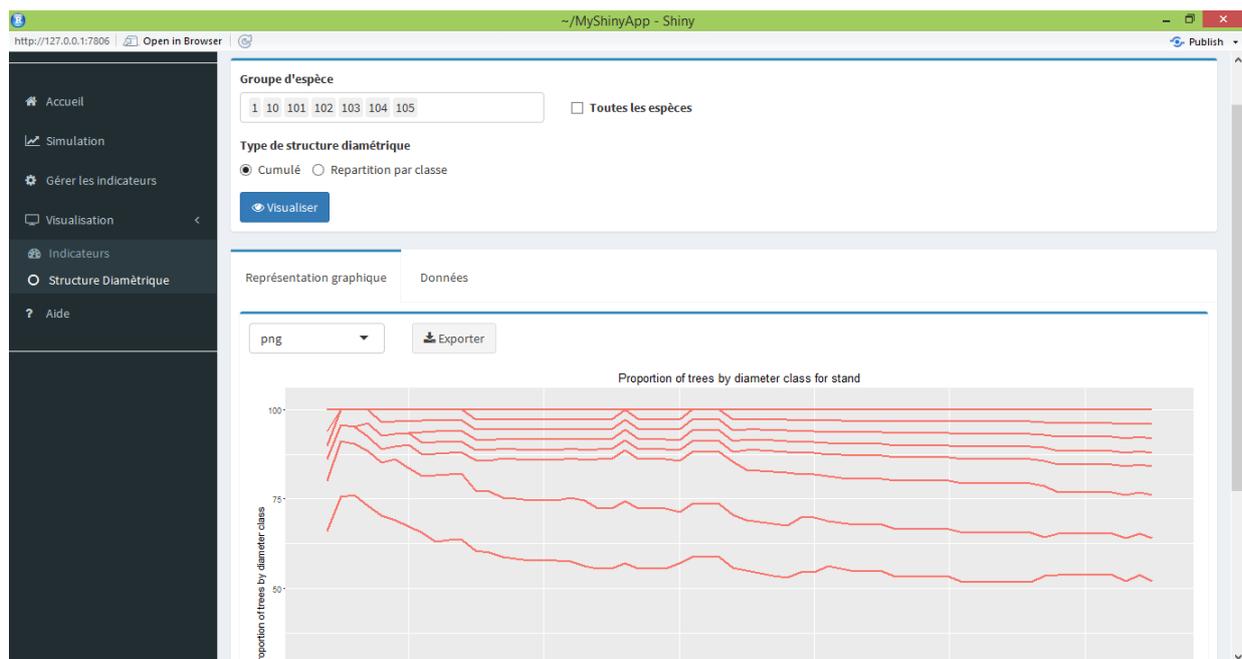


FIGURE 3.10 – Structure diamétrique cumulée.

L'autre structure diamétrique permet pour une année donnée de visualiser sous forme diagramme à bande la répartition des effectifs des arbres dans chaque classe de diamètre (voir Figure 3.11)

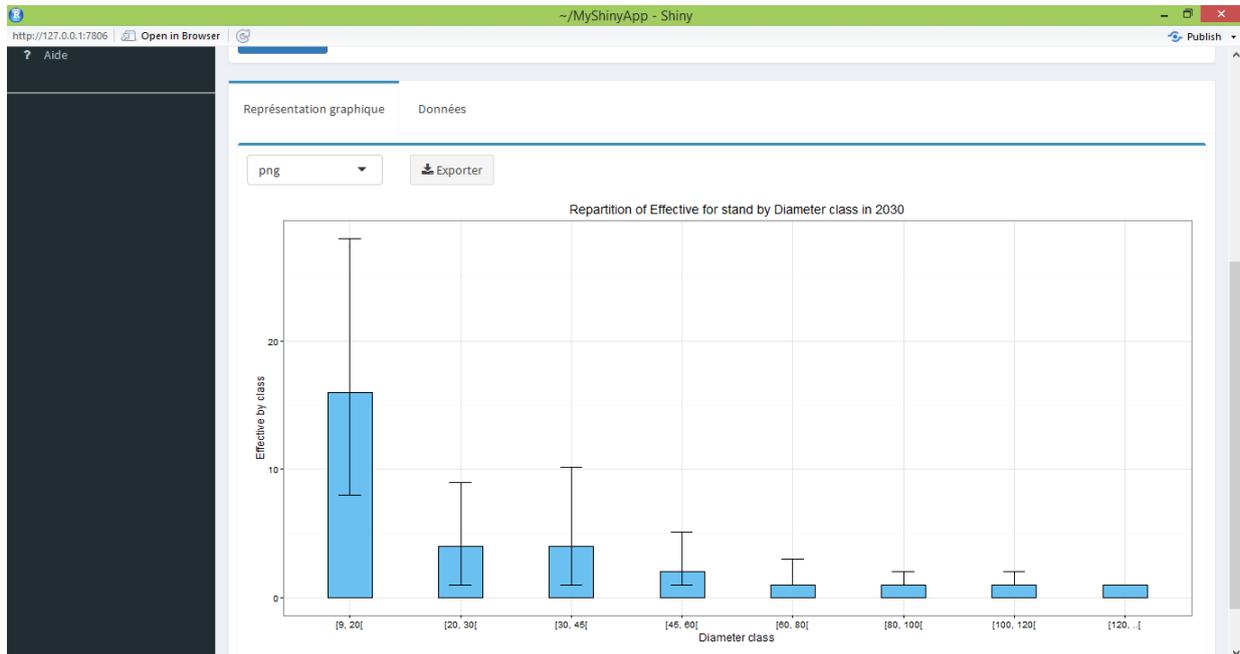


FIGURE 3.11 – Structure diamétrique pour une année par classe de diamètre.

Les autres indicateurs peuvent être visualisés dans la rubrique « Indicateurs ». Il faut choisir le groupe d'espèce pour lequel l'on veut visualiser l'évolution de l'indicateur, la classe de diamètre et la plage temporelle à visualiser (voir Figures 3.12 et 3.13).

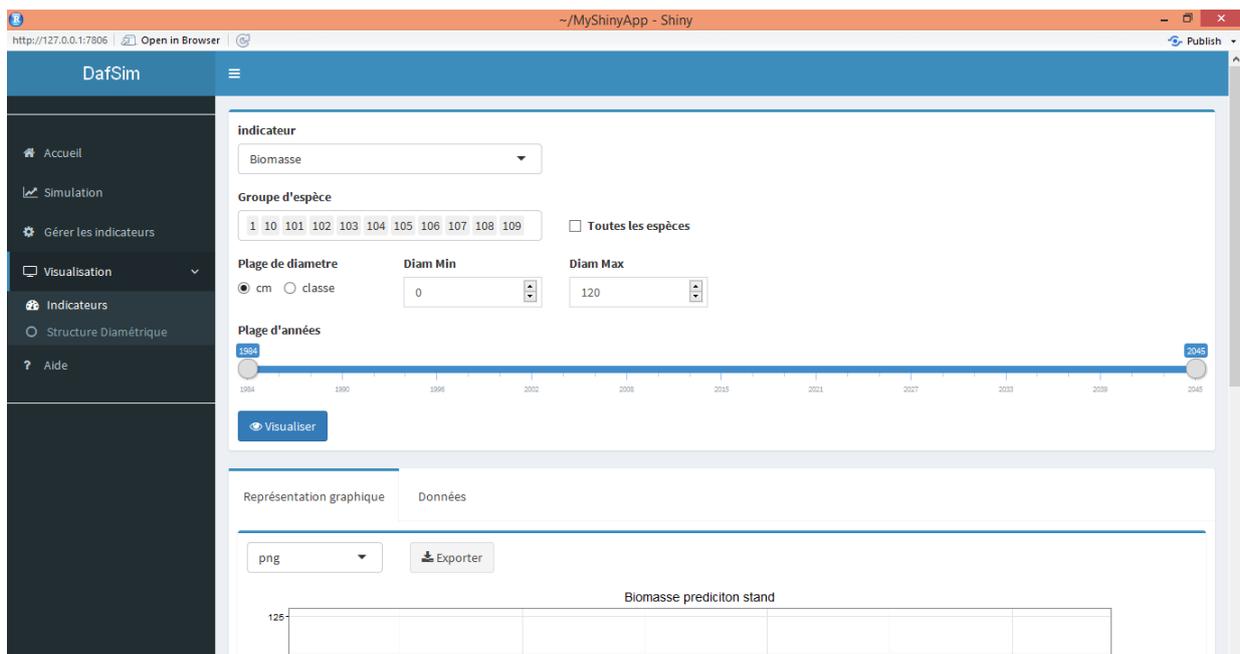


FIGURE 3.12 – Les paramètres de l'indicateur à visualiser.

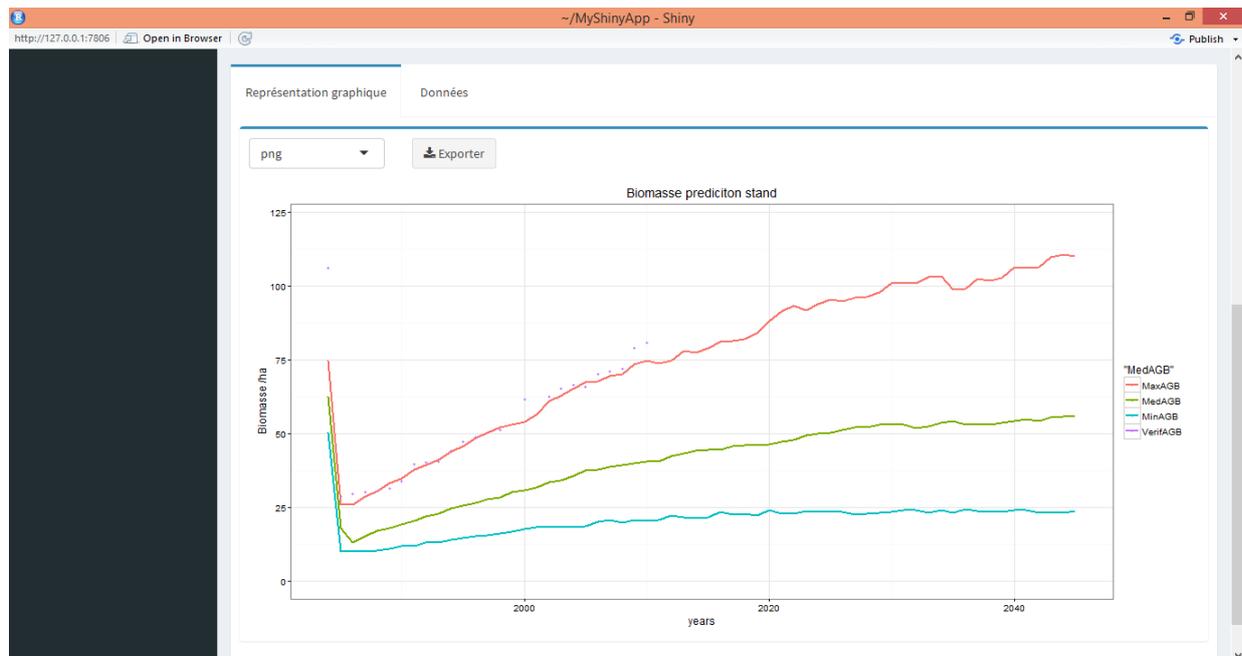


FIGURE 3.13 – Évolution de l'indicateur « Biomasse ».

3.3.2 Gains de la solution

Gains au niveau d'une concession forestière

Chaque entreprise forestière avant d'entrer en possession d'une concession forestière doit réaliser un plan d'aménagement dans lequel l'administration forestière de l'état en question lui impose des éléments à fournir concernant la concession qu'il désire exploiter généralement appelés les paramètres d'aménagement. Ces éléments peuvent par exemple être :

- Les assiettes annuelles de coupe,
- Une estimation du taux de reconstitution du stock,
- Une estimation de stock exploitable avec une précision suffisante
- Une estimation du volume brute des tiges des essences exploitables.

Ces estimations sont généralement faites à l'aide des calculs manuels par ces concessionnaires, en s'appuyant même sur des résultats issues d'autres concessions, ou en utilisant des données sur des arbres d'une autres forêts. L'utilisation de DafSim les amènera tout d'abord avoir une base de données sur les arbres de leurs propres concessions forestières car pour l'utiliser comme nous l'avons dit, il faut calibrer le modèle avec des données réelles récoltés sur le terrain. Ce qui peut leur être d'une très grande utilité et aussi pour les exploitants futurs dans les différents calculs à réaliser pour la mise en place d'un plan d'aménagement.

Le logiciel DafSim permet aux exploitants de réaliser les estimations sur le taux de reconstitution du stock, le stock exploitable, le volume brut des arbres, la biomasse, etc... avec une précision fixé à 95%. Ce qui les affranchit du travail manuel qu'ils réalisaient auparavant pour ces estimations.

Les plans d'aménagement sont établis, en respectant les règles et les normes fixées par l'administration forestière du pays concerné à savoir par exemple :

- Interdiction d'exploitation de certaines essences forestières,
- Etablissement d'un DME pour chaque essence exploitable,
- Les années de rotation dans une concession, etc...

DafSim permet à un exploitant forestier de réaliser des scénarios d'exploitation forestière, en intégrant toute ses règles et normes de l'administration forestière du pays concerné afin de prédire l'évolution et le comportement du peuplement à long ou moyen terme. Une telle estimation peut lui permettre de mesurer le gain économique à travers l'estimation du stock, du volume et de la biomasse de peuplement.

Une concession forestière est attribuée à exploitant forestier pendant un temps bien limité et la gestion de la ressource forestière doit être raisonnée afin de ne pas nuire aux populations riveraines et de permettre aux exploitants qui vous précéderont de pour pouvoir exploiter aussi du bois. C'est ce que l'on appelle la gestion durable. L'homme seul avec sa connaissance ne peut pas arriver à concilier toutes contraintes qui s'imposent. Il doit donc être assisté au quotidien d'un outil d'aide à la gestion.

Gains au niveau de l'administration forestière

Toute forêt relève du domaine forestier national et constitue la propriété exclusive de l'Etat. Il a donc le devoir de les protéger afin qu'elles continuent à servir de réservoir de ressources naturelles maintenant et pour les générations futures. Mais pour y arriver elle doit avoir une connaissance sur l'état actuelle de la ressource et de sa dynamique prévisionnelle et ceci passe par l'étude de la dynamique de ces forêts. DafSim constitue un outil d'aide à cette étude car l'administration forestière doit simplement procéder à mise en place des dispositifs de suivi de la dynamique forestière afin d'avoir les données nécessaires pour calibrer le modèle de dynamique forestière **DafMod** de **DafSim**. Une fois cela fait elle pourra étudier la dynamique de leur forêt et anticiper sur la dégradation de celle-ci, en instaurant des plans d'aménagement qui correspondent à l'état de leurs forêts et de juger la pertinence et la cohérence les éléments d'un plan d'aménagement fournis par une entreprise forestière.

BILAN DU CHAPITRE

Dans ce chapitre il était question après la conception de la solution que nous avons présentée précédemment dans le chapitre2 de détailler la phase d'implémentation de notre solution. Cette phase d'implémentation a consisté aux choix d'outils d'implémentation, à la mise en place de solution en utilisant les outils choisis, et en respectant les architectures applicative et logicielle adoptées dans le cadre de la conception. Elle s'est soldée par le déploiement sur la base l'architecture physique de la solution.

CONCLUSION GENERALE

Rappel du problème et synthèse de la solution

Le problème qui nous a été posé dans le cadre de ce stage que nous avons réalisé au CIRAD était de mettre à la disposition des entreprises forestières du bassin du Congo un logiciel d'aide à la gestion des exploitations forestières en utilisant le simulateur de la dynamique forestière développé dans le cadre du projet DynAffFor.

Pour mener à bien ce travail il a fallu dans un premier temps étudier le fonctionnement de ce simulateur, en ressortant clairement ses entrées et ses sorties. Cette étude de l'existant s'est soldée par un état des lieux sur ce dernier.

La suite du travail a consisté à l'analyse des besoins et la conception du logiciel à réaliser. Cette phase nous permis de ressortir les fonctionnalités de notre logiciel et de concevoir un module d'analyse des données issues de la simulation et une interface graphique permettant de lancer des simulations et de visualiser les résultats de l'analyse de données puis de les connecter au simulateur. La conception de ces couches logicielles s'est faite en respectant la contrainte de modularité qui nous a été exprimée.

Pour terminer, l'implémentation de cette solution s'est effectuée à l'aide du langage de calcul statistique R, en respectant les architectures de la solution mises en œuvre dans la phase de conception. Le déploiement de la solution a eu lieu dans un environnement contenant le logiciel de calcul statistique R, dans lequel nous installé toutes les extensions (packages) nécessaires pour le fonctionnement de notre logiciel.

Perspectives

A court terme, nous envisageons de finaliser les tests du logiciel pour s'assurer de sa bonne compatibilité avec le moteur de simulation utilisé et les systèmes d'exploitation généralement utilisés tels que : Windows et Linux. Puis de finaliser la rédaction du manuel d'utilisation.

Le logiciel mis en place dans le cadre de ce stage a comme objectif d'aider les gestionnaires forestiers dans la prise de décision en matière de gestion forestière durable ou la réalisation des plans d'aménagement forestier. Ceci a été fait en couplant un simulateur de la dynamique forestière et un module d'analyse de données. Mais nous pouvons à long terme, améliorer son aide aux gestionnaires forestiers en lui ajoutant un module expert qui pourra à partir des estimations produites par module d'analyse de données sur les indicateurs forestiers, proposer des plans d'aménagement ou des itinéraires de gestion forestière en vue d'assurer un prélèvement durable de la ressource naturelle.

Recommandations

DafSim est principalement basé sur des simulations informatiques du phénomène de la dynamique des peuplements forestiers. La simulation informatique des phénomènes naturels étant généralement basée sur des algorithmes complexes, il est nécessaire pour cela de disposer pour l'exécution de ce logiciel, d'un serveur ou un cluster permet d'atteindre une

bonne puissance de calcul afin d'assurer son bon fonctionnement et d'éliminer les risques de plantage.

Bibliographie

- [Akc07] A. Van Laar ; A. Akca. *Forest Mensuration*. Springer, 2007.
- [Bon09] G. Bontempir. Modélisation et simulation. 2009. Département Informatique Université libre de bruxelle.
- [Bro97] S. Brown. *Estimation biomass and biomass changes of tropical forests*. FAO Forestry Paper, 1997.
- [dMEF13] Luc Durrieu de Madron ; Eric Forni. Amenagement forestier dans l'est du cameroun. http://agritrop.cirad.fr/389267/1/document_389267.pdf, 2013. Structure du peuplement et périodicité d'exploitation.
- [DOR10] W. DORVILLE. *Evaluation de la biomasse et des stocks de carbone sur les placettes forestiers en forêts tropicale humide de Guadeloupe*. Novembre 2010.
- [Dyn14a] DynAffFor. modele de la dynamique, 2014.
- [Dyn14b] DynAffFor. Quantifier les processus, 2014.
- [Dyn14c] DynAffFor. Simulateur d'exploitation forestière, 2014.
- [Fou14] The R Foundation. The r project for statistical computing, 2014.
- [GF08] Nicolas Picard ; Sylvie Gourlet-Fleury. *Manuel de référence pour l'installation de dispositifs permanent en forêt de production dans le Bassin du Congo*. Novembre 2008.
- [GF13] S. Gourlet-Fleury. *Dynamique des forêts du bassin du Congo*. Cirad, 2013.
- [Lar15] J. Larmarange. Introduction à l'analyse d'enquêtes avec r et rstudio. <https://larmarange.com>, juillet 2015.
- [Lug92] S. Brown ; A. E. Lugo. *Abroveground biomass estimates for tropical moist forest of brazilian amazon*. Intercercia, 1992.
- [Ron99] J. Rondeux. *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*. 2e éd. Gembloux : Les presses agronomiques de Gembloux., 1999.
- [ROS15] Vivien ROSSI. Présentation powerpoint : Projet dynaffor vers un simulateur de la dynamique forestière appropriable par tous, 2015.
- [RSt] RStudio. Shiny, a web application framework for r.
- [SGFVFABH98] H. Dessardl S. Gourlet-Fleury ; V. Favrichon ; A. Bar-Hen. Parcelles permanentes de recherche en forêt dense tropicale élément pour une méthodologie d'analyse de données. 1998. Montpellier.
- [tSCW05] J. Chave ; H.C. Muller-Landau ; T.R. Baker ; T.A. Easdale ; H. ter Steege ; C.O. Webb. *Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 Neotropical tree species*. Ecological Application, 2005.
- [VER14] Thomas VERRON. R tutoriel interfaces graphiques. <http://r2014-mtp.sciencesconf.org/file/>, 2014.
- [VIN11] D. VINCKE. *Elaboration d'une méthodologie d'estimation de la biomasse ligneuse aérienne de population d'espace commerciales du Sud-Est du Cameroun*. Novembre 2011.

- [Wes09] P. W. West. *Tree and Forest Measurement*. 2nd ed. Dordrecht : Springer., 2009.
- [Wik15] Wikipédia. Modèle-vue-contrôleur, 2015.
- [yP14] yohann Par. transform-your-presentation-web-app, 2014.