



**HAL**  
open science

## Evaluation de la cohérence et des performances de RReShar, un modèle de dynamique forestière

Willem Palie

► **To cite this version:**

Willem Palie. Evaluation de la cohérence et des performances de RReShar, un modèle de dynamique forestière. 2014, 14 pp + annexe. hal-01268690

**HAL Id: hal-01268690**

**<https://hal.science/hal-01268690>**

Submitted on 5 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITE BLAISE PASCAL  
CLERMONT II  
UFR Sciences et Technologies

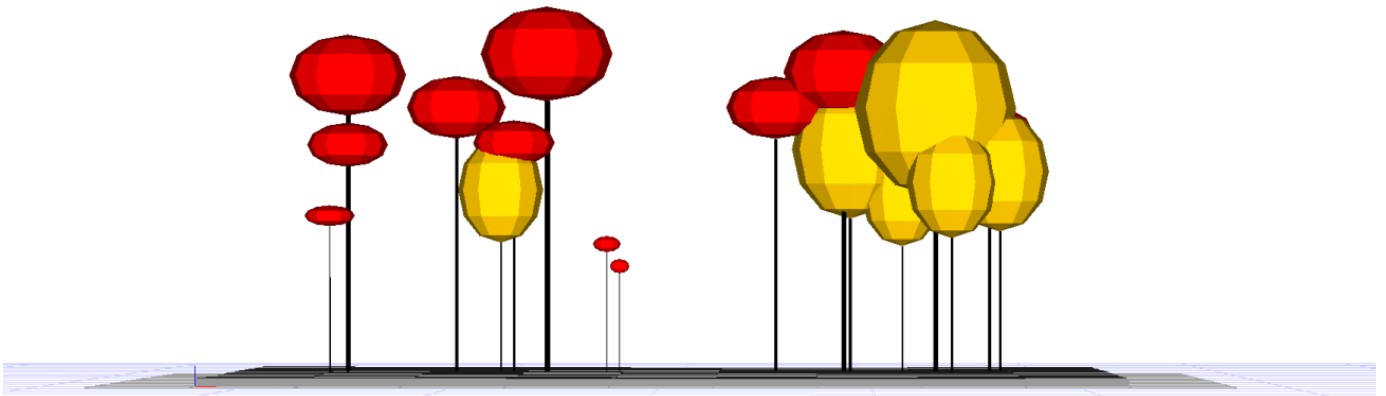
**Master 1 Biologie et environnement**

Spécialité : Génomique Ecophysiologie et Production Végétale

Soutenu le : 3 Septembre 2014

Par **Willem PALIE**

# Evaluation de la cohérence et des performances de RReShar, un modèle de dynamique forestière



Jury :

Nathalie Fournier

Philippe Malagoli

Saïd Mouzeyar





Institut National de la Recherche Agronomique  
Centre INRA de Clermont-Ferrand – Theix

Unité Mixte de Recherche 547 Physique et Physiologie Intégratives de l'Arbre Fruitier et Forestier  
(UMR PIAF, INRA – Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand)

INRA Site de Crouël

5, chemin de Beaulieu

63039 Clermont-Ferrand cedex 2

France

Tél :+33 4 73 62 43 73

Fax :+33 4 73 62 44 54

Maitres de stage : Nicolas Donès (INRA) et Philippe Balandier (IRSTEA)



## Résumé

La disponibilité des ressources en sous-bois est indispensable pour la réussite de la régénération de la forêt. Toutefois, à la création d'une trouée, une végétation opportuniste entre en compétition avec les semis des arbres principalement pour la lumière et l'eau. De plus, le changement climatique apporte une difficulté supplémentaire à la gestion forestière. Un modèle de dynamique forestière intégrant le partage des ressources (RReShar, Regeneration and Resource Sharing) a donc été développé afin de pouvoir tester l'efficacité, sur 20 à 50 ans, de différents modes de gestion, sous différentes hypothèses de climat, sur la réussite de la régénération. Un nombre important de processus a été implémenté dans RReShar. Il a été éprouvé lors de cette étude, notamment en termes de cohérence et de précision des simulations.

Le développement des différentes strates de végétation et leur impact sur les ressources disponibles ont été simulés et évalués par comparaison à des données mesurées. Des tests ont été effectués au niveau de l'influence des dimensions des scènes et du nombre de cellules et de végétaux présents. Les simulations réalisées par RReShar sont cohérentes sur de nombreux points. Une absence de bornage des courbes de taux de recouvrement des végétations interférentes causent des erreurs aux faibles niveaux d'éclairement. Malgré la simplicité des houppiers des arbres, il donne des résultats d'interception de la lumière acceptables mais sans doute améliorables. Ainsi, la divergence entre valeurs réelles et simulées est principalement causée par l'absence de définition d'une zone tampon par rapport au bord de la scène. Il semblerait que la mortalité exponentielle décroissante des semis serait à moduler en fonction de leur âge de leur arbre-mère. Des pistes d'amélioration du modèle RReShar sont proposés, tels que l'optimisation des temps de calcul, en fonction du nombre de cellules par scène.

Mots clés : modélisation, dynamique forestière, forêt mixte, régénération, compétition, ressources, changement climatique, évaluation

## Summary

The availability of resources in the understory is essential for the successful regeneration of the forest. However, upon the creation of a gap, an opportunistic vegetation competes with trees seedlings, for light and water mainly. Moreover, climate change subjoins an additional challenge to forest management. A forest dynamics model incorporating resource sharing (RReShar, Regeneration and Resource Sharing) has been developed in order to test the effectiveness on regeneration success of different management methods on regeneration success, over a period of 20 to 50 years and under different climatic scenarios. It implements a large number of processes. RReShar was assessed in this study, paying attention to the consistency and accuracy of the simulations.

The development of different vegetation layers and their impact on the resources available were simulated and evaluated through the comparison with experimental data. The influence of the sizes of scenes and number of cells and of vegetation were tested. Simulations by RReShar are consistent in many ways. The absence of constraint on the response curve of the density of the interfering vegetations to the transmitted irradiance by the above canopy causes errors at low light levels. Despite simplicity of tree crowns, it gives acceptable estimates of the intercepted light though probably improvable. Thus the difference between experimental and simulated values is mainly caused by the lack of definition of a buffer zone at the edge of the scene. The decreasing exponential seedling mortality could also be adjusted according to the age of their mother-tree. Avenues for improving the RReShar model are proposed, such as the optimization of computational time, as a function of the number of cells per scene.

Keywords: modeling, dynamic forest, mixed forest, regeneration, competition, resources, climate change, assessment



## Liste des abréviations

Capsis : Computer-Aided Projection of Strategies In Silviculture

CRPF : Centre Régional de la Propriété Forestière

DBH : Diameter at Breast Height

ECOGER : Ecologie pour la Gestion des Ecosystèmes et de leurs ressources Responsable

ETP : Evapotranspiration Potentielle

ETR : évapotranspiration réelle

G : Surface terrière

HYDRO : Hydraulique et résistance à la sécheresse des arbres

I : Rayonnement

$I''$  : Lumière disponible sous la végétation interférente et donc pour la régénération basse

$I_0$  : Rayonnement du soleil et de la voute céleste

IDF : Institut pour le Développement Forestier

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

IRSTEA : Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

k : Coefficient d'extinction de la lumière

MEA : Micro-environnement et arbre

MECA : Mécanique et activité des zones en croissance

ONF : Office National des Forêts

P : Pluviométrie

PIAF : Physique et Physiologie Intégratives de l'Arbre Fruitier et Forestier

$R^2$  : coefficient de détermination

RReShar : Regeneration and Resource Sharing

RU : réserve utile en eau du sol

SWC : Soil Water Content

$SWC_p$  : teneur en eau du sol potentielle

$SWC_t$  : à l'instant t

WSI : Water Stress Index





## Liste des figures

**Fig. 1.** Schéma de l'évolution des risques de dépérissement des forêts en fonction de l'intensité et de la durée des sécheresses dans le monde

**Fig. 2.** Schéma de fonctionnement du modèle RReShar

**Fig. 3.** Illustration du processus d'interception de la lumière, notamment par le modèle SAMSARA

**Fig. 4.** Illustration de la distribution de l'eau entre les différentes strates par le modèle d'eau

**Fig. 5.** Visualisations 3D, sous Capsis, de la répartition de la végétation pour le dispositif utilisé

**Fig. 6.** Visualisations 3D, sous Capsis, de la répartition des arbres pour le dispositif utilisé en vue de l'observation de la végétation interférente

**Fig. 7.** Visualisations 3D, sous Capsis, de la répartition des placettes situées aux positions des capteurs de lumière pour les parcelles 61M, 240F et 216C

**Fig. 8.** Répartition des transmittances des houppiers sur la placette sur Capsis et sous Excel

**Fig. 9.** Comparaison des hauteurs (a) et des taux de recouvrement (b) entre les différentes espèces de végétation interférente en fonction de leur éloignement du centre de la placette

**Fig. 10.** Comparaison des taux de recouvrement (à gauche) et de l'énergie parvenant au-dessus de la végétation interférente (à droite) entre les différentes espèces de végétation interférente

**Fig. 11.** Comparaison entre le taux de recouvrement et la transmittance pour chacune des espèces de végétation interférente

**Fig. 12.** Impact de la hauteur des jeunes pins sur leur diamètre et sur l'incrément de hauteur

**Fig. 13.** Variation de l'énergie parvenant sous la cohorte en fonction de l'effectif

**Fig. 14.** Impact du nombre de jeunes pins sur l'énergie parvenant sous les cohortes

**Fig. 15.** Influence de l'occupation de la cellule sur l'énergie parvenant sous les classes de cohortes

**Fig. 16.** Comparaison de l'indice de stress hydrique (WSI) et du contenu en eau du sol (SWC) en fonction de l'effectif des classes de cohortes

**Fig. 17.** Efficience des simulations d'interception de la lumière

**Fig. 18.** Influence du nombre d'arbres et du nombre de cellules sur le temps de simulation de 20ans de dynamique



# Table des matières

## Résumé

## Liste des abréviations

## Liste des figures

## Présentation de la structure ..... 1

## Synthèse bibliographique ..... 2

### 1. Changement climatique ..... 2

### 2. Les dépérissements forestiers ..... 2

#### 2.1. Un phénomène d'échelle mondiale ..... 2

#### 2.2. Des arbres résistants plus si résistants que cela ?! ..... 3

#### 2.3. La gestion des forêts : un véritable défi ..... 3

### 3. La modélisation ..... 4

## Matériel ..... 5

### Modélisation de la végétation ..... 5

### Gestion des bibliothèques ..... 6

### Les données d'entrée ..... 7

### Les données de sortie ..... 7

## Méthodes ..... 8

## Résultats-Discussion ..... 9

### 2. Sensibilité de la végétation interférente à différents paramètres ..... 9

#### 2.1. Variation de la taille et du taux de recouvrement des végétations interférentes en fonction de l'éclairement ..... 9

#### 2.2. Variation de la lumière interceptée en fonction du taux de couverture de la végétation interférente ..... 10

### 3. Evaluation de la cohérence d'ensemble de l'évolution des cohortes de semis ..... 10

#### 3.1. Loi de croissance des cohortes ..... 10

#### 3.2. Impacts des cohortes sur l'énergie parvenant aux strates inférieures ..... 11

#### 3.3. Impact des cohortes sur la teneur en eau du sol ..... 11

### 4. Efficience des simulations d'interception de la lumière ..... 12

### 5. Evaluation de la vitesse de simulation en fonction de la complexité de la scène ..... 13

## Conclusion – Perspectives ..... 13

## Réflexion personnelle

## Bibliographie

## Annexes



## Présentation de la structure

Le PIAF (Physique et Physiologie Intégratives de l'Arbre Fruitier et Forestier) est une unité mixte de recherche (UMR 547) qui se répartit sur deux sites géographiques : l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) de Crouël à Clermont-Ferrand et le campus universitaire des Cézeaux à Aubière. Il a pour objectif la sélection de géotypes, d'écotypes et de méthodes de gestion, des vergers et des forêts, en vue d'accroître la résistance des végétaux aux épisodes climatiques extrêmes, de limiter le développement des bio-agresseurs et de s'adapter aux changements climatiques.

Le PIAF se compose des équipes :

- HYDRO (Hydraulique et résistance à la sécheresse des arbres), qui étudie, chez l'arbre, l'influence des différences, inter- et intra-espèces, de systèmes de transport hydrauliques, dans la résistance à la sécheresse et à l'embolie
- MECA (Mécanique et activité des zones en croissance) qui travaille sur la réponse architecturale des arbres face au vent et à la gravité
- MEA (Micro-environnement et arbre) qui s'attache à comprendre les mécanismes de résistance face au gel et aux bio-agresseurs, les dynamiques de répartition des réserves carbonées et azotées dans les différents compartiments du végétal et l'interaction entre l'activité photosynthétique et l'architecture du houppier

Ces 3 équipes ont donc toutes pour objet d'étude la réponse de l'arbre aux sollicitations de l'environnement.

Le modèle RReShar (Regeneration and Resource Sharing), qui est l'objet de mon stage, est issu de l'association entre l'équipe MEA, spécialisée dans la mesure et la modélisation de la physique du milieu, et l'IRSTEA (Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture), travaillant sur la biologie et l'écologie des forêts. Il a été initié dans le projet ECOGER (Ecologie pour la Gestion des Ecosystèmes et de leurs Ressources) sur les forêts mélangées, puis son implémentation s'est poursuivie dans le cadre du projet IMPREBIO (Impact de l'intensité des prélèvements forestiers sur la biodiversité). Les utilisateurs potentiels finaux sont l>IDF (Institut pour le Développement Forestier), le CRPF (Centre Régional de la Propriété Forestière), l'ONF (Office National des Forêts) et le ministère de l'agriculture.



# Synthèse bibliographique

## 1. Changement climatique

La pérennité des forêts, tout comme celle de nombreux écosystèmes, est fortement dépendante de la stabilité du climat. Cependant, la forte augmentation des températures enregistrée au niveau mondial a de quoi être inquiétante. Une première estimation de la tendance au réchauffement a été réalisée pour la période 1901-2000. Cette dernière est de 0,6°C alors que la même estimation faite sur l'intervalle 1906-2005 montre un réchauffement plus rapide de 0,74°C (GIEC(1), 2007).

De plus, l'augmentation mondiale des températures à l'horizon 2100 est estimée entre 0,3 et 1,7°C pour les modèles les plus optimistes et entre 2,6 et 4,8°C pour les plus alarmistes (GIEC, 2013). Une augmentation de 4 à 7°C est assez fréquente en fin de période glaciaire. Toutefois, ce changement de températures s'installe généralement sur une période de près de 5000 ans (GIEC (2), 2007). En outre, il est très probable que le réchauffement de la planète entraîne une intensification et une augmentation des événements extrêmes tels que les périodes de sécheresse et les fortes précipitations (GIEC (1), 2007).

La singularité du changement climatique actuel soulève donc de nombreuses questions relatives à l'adaptation des écosystèmes.

## 2. Les dépérissements forestiers

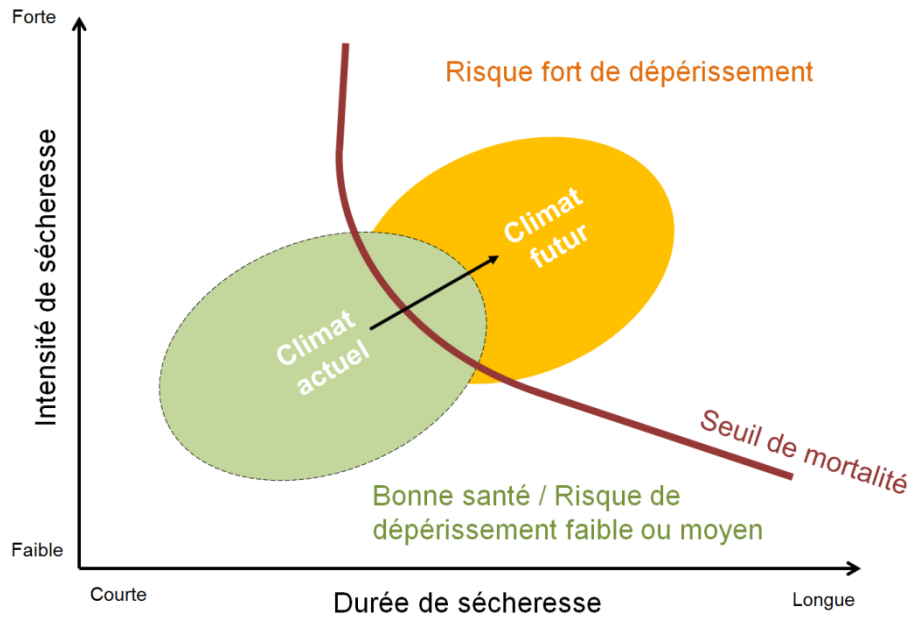
### 2.1. Un phénomène d'échelle mondiale

Ces cent dernières années, de plus en plus de dépérissements de forêts ont été enregistrés. L'augmentation d'autres éléments tels que les moyens mis en œuvre dans l'observation des massifs forestiers et leur nombre empêche toutefois de conclure à une relation directe entre l'accroissement des dépérissements répertoriés et l'augmentation des températures. Cependant, il a été montré par Adams (2009), sur des jeunes pins, que des températures plus chaudes réduisent le temps de survie des arbres lors de périodes de sécheresse. A grande échelle, cela a donc probablement un effet sur la fréquence des dépérissements survenant à la suite des épisodes secs.

Des répercussions sans précédent ont été constatées dans le monde se concluant par le déclin de nombreuses forêts (Allen et al., 2010). L'augmentation conjointe de la demande évaporative et des épisodes secs est souvent avancée afin d'expliquer ce phénomène. Cela ne fait que rendre les arbres plus vulnérables à d'autres facteurs tels que les attaques de pathogènes et les maladies fongiques et virales (Chrysopolitou, 2013).



Fig. 1. Schéma de l'évolution des risques de dépérissement des forêts en fonction de l'intensité et de la durée des sécheresses dans le monde. Le cercle vert représente l'état de santé des forêts au climat actuel et le cercle orange leur état de santé estimé dans le climat futur (d'après Allen et al., 2010)



## 2.2.Des arbres résistants plus si résistants que cela ?!

Des arbres reconnus comme résistants présentent peu à peu une sensibilité à certains facteurs biotiques et abiotiques. Par exemple, parmi les essences de chêne, le sessile est reconnu comme étant résistant à la sécheresse. En Europe, les dépérissements des années 1920 et des années 1930 ont montré une forte mortalité des chênes pédonculés ne touchant que peu les chênes sessiles. Toutefois, de 1946 à 1949, des cas de dépérissement de sessiles sont répertoriés en Roumanie. La cause avancée est une mortalité due à l'affaiblissement du sessile lors de la sécheresse persistante de 1945-1946 (Delatour, 1983).

Aucun facteur n'a pu être désigné comme étant la cause principale des dépérissements. Certaines études avancent un phénomène additif entre différents facteurs défavorables. Les attaques de pathogènes, les maladies virales et fongiques et les fortes densités sont des contraintes auxquelles les arbres étaient déjà soumis. Avec l'augmentation des températures et l'accroissement conjoint de l'intensité et de la durée des sécheresses, certaines études supposent que les dépérissements actuels marqueraient le dépassement progressif du seuil de tolérance des forêts (Fig.1).

## 2.3.La gestion des forêts : un véritable défi

Les arbres, comme tout être vivant, ne sont pas éternels. Ainsi, la pérennité de la forêt dépend de la régénération, un processus qui va de la production de graines à l'arbre adulte. C'est une étape critique et qui peut durer plusieurs dizaines d'années. Les idéaux productivistes ont longtemps dirigé la gestion des forêts (Bürgi et al., 2003). Il était assez courant d'acheter les plants en pépinière et d'éliminer les jeunes arbres déjà présents sur la parcelle au même titre que le reste de la végétation de sous-bois. Les forêts souffraient donc d'une forte perte en diversité génétique. Toutefois ces dernières années la gestion de la forêt a pris un tout autre sens. On note la mise en place, par la commission internationale, d'une réglementation orientant les gestionnaires vers une gestion plus durable de la forêt (commission européenne, 2013). D'où le revirement des gestionnaires vers l'utilisation de la régénération naturelle pour renouveler leur forêt et le maintien de la végétation de sous-bois.

Du point de vue du gestionnaire, la régénération naturelle peut s'avérer être source de difficultés. Certaines années, la production de graines peut être très importante mais ne donne aucune précision sur la quantité et la qualité de la régénération car le taux de survie des plantules est extrêmement faible. Durant les premières années, le nombre de semis d'une même cohorte décrit une chute exponentielle (Debain et al., 2007). Cette forte mortalité peut être la conséquence de l'herbivorie, des conditions pédoclimatiques du lieu de germination ou de la concurrence inter- et intra-spécifique pour les ressources du milieu (Zlatanov et al., 2013).



En effet, dans le sous-bois, le principal frein à la croissance et au développement des semis est le faible accès à la lumière. Ce ralentissement a pour effet d'allonger la durée d'exposition des semis aux conditions défavorables du milieu. L'éclaircissement des cimes apporte une plus grande luminosité aux étages inférieurs améliorant ainsi l'accès à cette ressource et donc les chances d'atteindre l'âge adulte.

Toutefois, cela reste théorique. Le sous-bois se compose de bien d'autres espèces végétales qui bénéficient également des avantages de cet apport de lumière. Ces espèces sont souvent héliophiles et ont la particularité d'avoir un niveau de croissance tel que la compétition qu'elles exercent peut mener à la mort des jeunes arbres (Gaudio et al., 2011). A titre d'exemple, des études ont montré une corrélation négative entre la présence d'un couvert de fougère ou de ronce et l'établissement des semis d'if, de charme, de noisetier, d'aubépine, de chêne, de frêne, de bouleau et de houx (Harmer et al., 2005).

Le défi que doit relever le gestionnaire est donc de créer des trouées permettant l'installation des jeunes arbres mais d'une dimension suffisamment faible afin de limiter le développement de la végétation interférente.

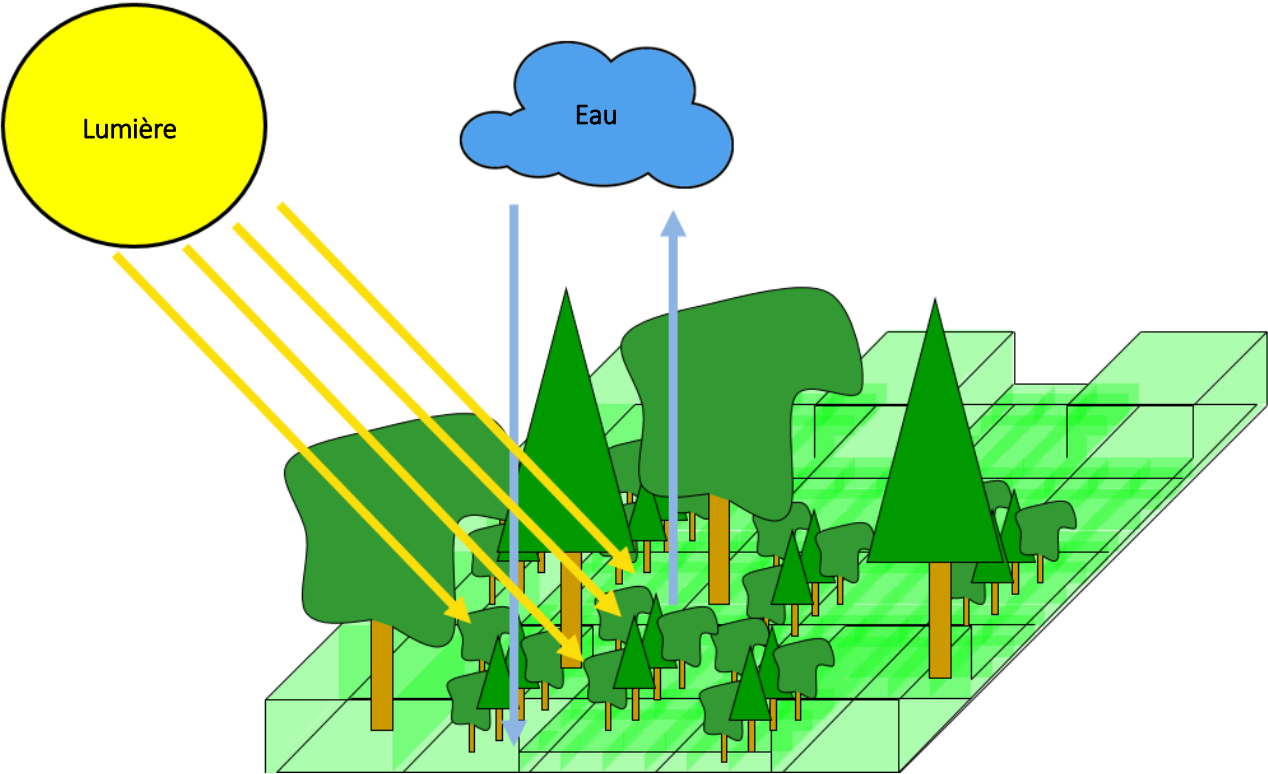
### 3. La modélisation

L'utilité de la modélisation n'est plus à démontrer. Elle permet de simuler des phénomènes complexes et longs dans un laps de temps relativement réduit. Cette dernière caractéristique est celle qui justifie son importance en foresterie dans la mesure où les processus à observer se déroulent généralement sur plusieurs dizaines d'années (Courbaud, 1995). Elle constitue donc un bon outil de prédiction et d'aide à la décision.

Plusieurs types de modèles ont été développés (Vanclay, 1995) :

- Les modèles globaux permettent de simuler la croissance d'un peuplement tout en étant peu exigeants en données d'entrées. Ces modèles permettent de prédire la croissance des peuplements ou des rendements à partir de variables générales telles que la surface terrière ou le nombre d'arbres par hectare. Chaque arbre est donc considéré comme étant un arbre moyen. Ce type de modèles est donc assez peu adapté aux peuplements hétérogènes ou non-équiennes.
- Dans les modèles de distribution, le peuplement est fragmenté en classes pour une ou plusieurs variables (diamètre, hauteur, etc.). Le peuplement peut également être séparé en cohortes ou en classes de cohortes (c'est-à-dire en lots d'individus présentant des caractéristiques communes) ce qui lui confère une plus grande souplesse.
- Les modèles individu-centrés permettent de suivre l'évolution du peuplement à l'échelle de l'arbre. Les coordonnées des arbres peuvent être à préciser suivant la prise en compte, ou non, de la compétition des arbres pour les ressources. L'hétérogénéité du peuplement est donc bien représentée par ce type de modèles. En général, les modèles individu-centrés regroupent, dans leur fonctionnement, un modèle de croissance, un de mortalité et un de régénération.

Fig. 2. Schéma de fonctionnement du modèle RReShar



Dans le contexte du changement climatique et des dépérissements forestiers de ces dernières années, un modèle de régénération forestière et de partage des ressources a été créé : le modèle RReShar (Regeneration and Resource Sharing). Il considère la dynamique de la forêt en réponse au climat (eau et lumière), à la modification de son organisation (ex : formation de trouée) et aux interactions avec une végétation interférente.

Un certain nombre de processus biologiques et environnementaux a été implémenté dans RReShar. Le recrutement, c'est-à-dire le passage de la graine à l'arbre adulte, pouvant durer plusieurs dizaines d'années, cet outil a pour but d'effectuer des prévisions d'évolution des peuplements en interaction avec la gestion pour différentes hypothèses de changement de climat sur des échelles de temps de l'ordre de 20 à 50 ans. A cette fin, une étape préalable de validation du modèle est requise. L'objectif de cette étude est une première étape d'évaluation de la robustesse et de la sensibilité à différents paramètres du modèle RReShar et d'identifier les pistes d'améliorations.

## **Matériel**

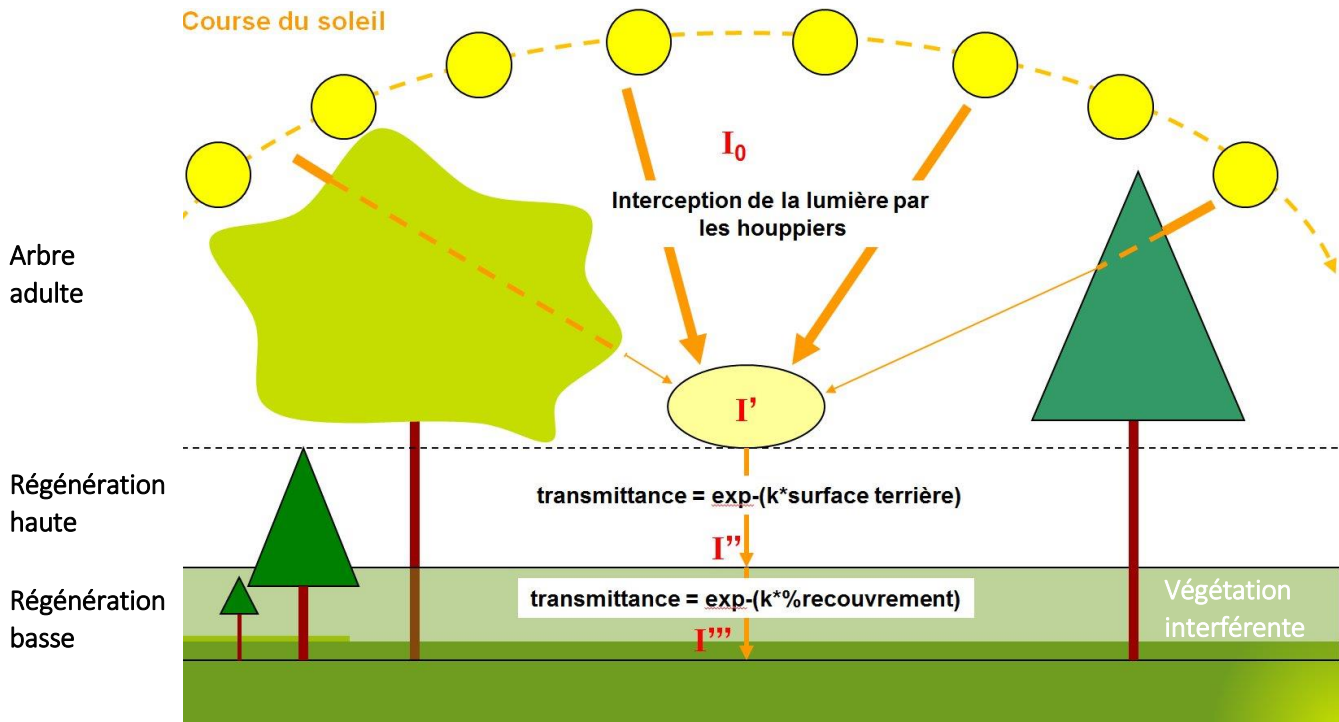
Les équations et les paramètres des processus implémentés actuellement sous RReShar sont issus des expérimentations effectuées en forêt d'Orléans (Nogent-sur-Vernisson - Gaudio, 2010). Le modèle RReShar a été développé en Java sous la plateforme partagée Capsis (De Coligny, 2003). Ce modèle de régénération et de partage des ressources repose sur le noyau Capsis pour le développement des arbres, plusieurs bibliothèques publiques (c'est-à-dire des modèles mis à disposition des utilisateurs de Capsis moyennant l'acceptation d'une charte d'utilisation) pour le partage de la lumière et le développement de la régénération et d'un code propre, par exemple pour la distribution de l'eau (Annexe 1). De ces variables dépendent le développement des jeunes arbres et de la végétation interférente.

### **Modélisation de la végétation**

Le modèle RReShar crée une placette de dimension variable (typiquement quelques centaines de mètres) selon l'utilisateur et divisée en cellules. Les arbres, les cohortes de régénération et la végétation interférente y évoluent à un pas de temps annuel (Fig.2).

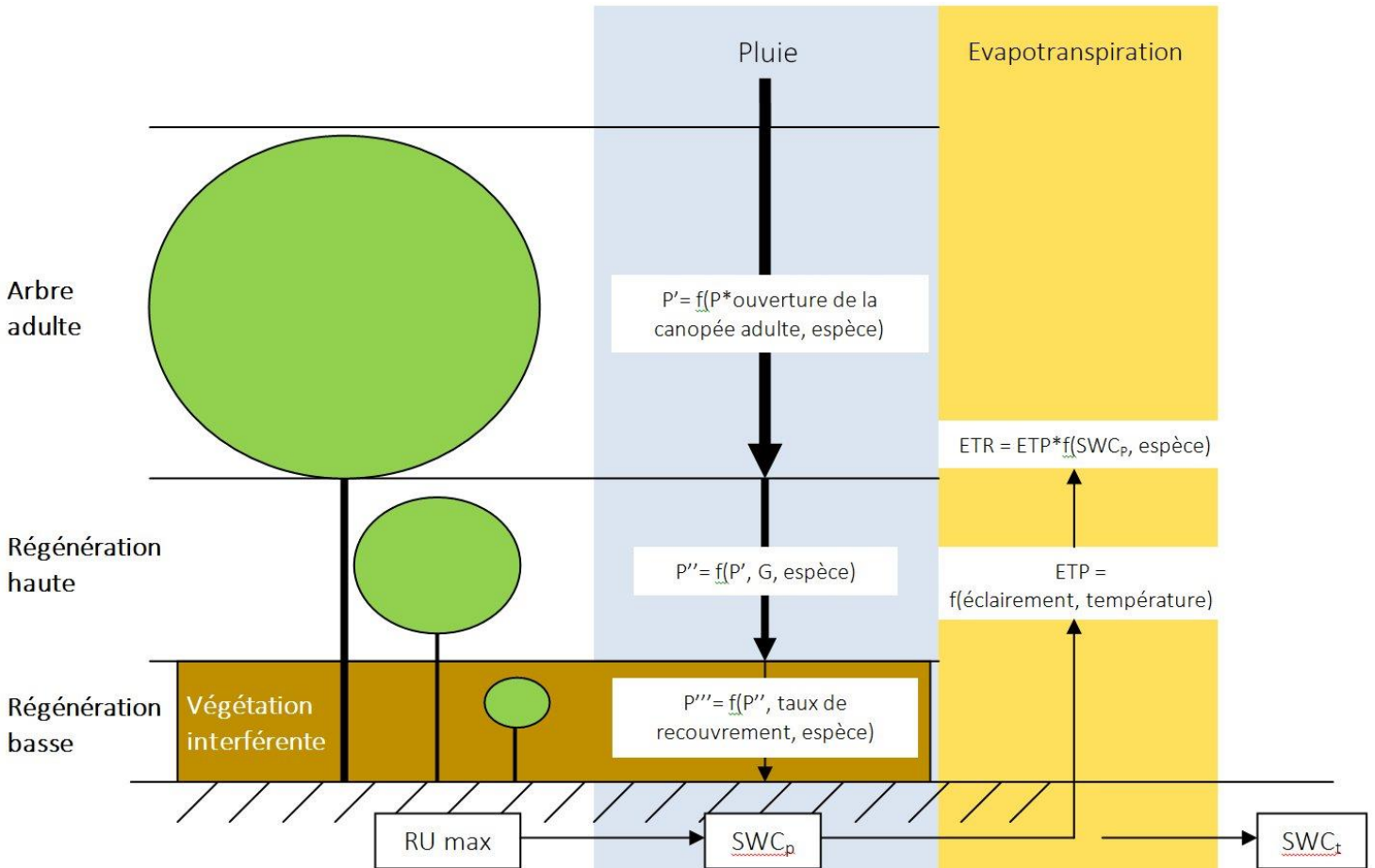
Le modèle permet de simuler la croissance de différentes espèces d'arbres. Actuellement, les équations implémentées sont celles du pin et du chêne. C'est un modèle individu centré spatialisé, les arbres sont donc disposés de façon précise sur la placette. Ils sont constitués d'un tronc et d'un houppier. Ce dernier est considéré comme un milieu turbide, plus ou moins poreux selon l'espèce, afin de rendre compte de la densité du feuillage et des branchages. Les houppiers sont sous la forme d'ellipsoïdes. La croissance des arbres adultes est actuellement implémentée sous la forme d'une fonction empirique dépendant d'un indice de compétition (Bieng et al., 2013 ; Pérot et al., 2010 ; Pérot et al., 2011).

Fig. 3 : Illustration du processus d'interception de la lumière, notamment par le modèle SAMSARA



I : Rayonnement ( $I_0$  : Rayonnement du soleil et de la voûte céleste,  $I''$  : Lumière disponible sous la végétation interférente et donc pour la régénération basse),  $k$  : Coefficient d'extinction de la lumière

Fig. 4 : Illustration de la distribution de l'eau entre les différentes strates par le modèle d'eau



P : pluie ; ETP : évapotranspiration potentielle ; ETR : évapotranspiration réelle ; RU : réserve utile en eau du sol ; SWC : teneur en eau du sol, potentielle ( $SWC_p$ ), à l'instant t ( $SWC_t$ ) ; G : surface terrière

Les cohortes de régénération sont définies à l'échelle de la cellule mais ne sont pas spatialisées. Les équations relatives à la régénération du pin ont été implémentées dans le modèle. Les semis apparaissent comme étant le résultat d'une pluie virtuelle de graines et sont divisés en différentes classes de taille (histogramme fréquentiel des diamètres et des hauteurs des semis). Conformément à la littérature, le nombre d'individus par classe de cohortes diminue chaque année de façon exponentielle pour rendre compte de divers aléas biotiques (prédation, maladie, ...). Une mortalité due à une insuffisance en eau ou en lumière est également implémentée. Une hauteur de passage à l'âge adulte marque le recrutement des jeunes pins. Ils acquièrent alors un houppier et une localisation sur la visualisation 3D et sont dès lors gérés par le modèle de croissance des arbres adultes.

Actuellement, les équations implémentées pour la végétation interférente sont celles de 3 espèces : callune (*Calluna vulgaris*), fougère (*Pteridium aquilinum*) et molinie (*Molinia caerulea*). Cette végétation est représentée sous la forme d'une couche poreuse spécifique à chaque cellule, caractérisée par l'espèce, son pourcentage de couvert, et sa hauteur. Cette couche est une structure très simplifiée de la végétation mais est assez proche de ce qui peut être observé dans une trouée.

Pour gérer les effets de bordure, chaque placette générée est considérée comme adjacente à elle-même (Annexe 2). La végétation du haut de la placette est comme étant voisine de celle du bas, de même que la végétation du bord droit est considérée comme voisine de celle du bord gauche. Cet effet appelé effet de tore permet de simuler le fait que, dans la réalité, la placette se trouve au milieu d'un peuplement qui lui est semblable. Cela a une importance en particulier dans le calcul d'interception de la lumière où des rayons lumineux peuvent provenir de l'extérieur de la placette considérée.

### **Gestion des bibliothèques**

L'évolution des différentes végétations est relative à l'espèce mais également à l'environnement de la végétation considérée. Ces éléments sont modélisés par des bibliothèques

La bibliothèque SAMSARA Light permet de simuler l'interception de la lumière par les arbres adultes. Pour chaque pas de temps, elle envoie, cellule après cellule, une succession de rayons à partir des positions possibles du soleil et du rayonnement diffus. Les houppiers des arbres sont assimilés à des milieux troubles dans lesquels les feuilles représentent les particules en suspension. L'énergie qui les traverse est alors déduite par application de la loi de Beer-Lambert (Fig.3). Selon le même principe les autres couches de végétation (régénération, végétation interférente) interceptent à leur tour la lumière.

Le modèle d'eau (implémenté dans RReShar) simule au pas de temps journalier le partage de l'eau de pluie P entre les différentes states ainsi que les pertes par évapotranspiration ETP (Fig.4). Un fichier climatique lu par le programme regroupe les valeurs de P et ETP journalières pour un certain nombre d'années. L'eau de pluie est interceptée par le feuillage des arbres, des cohortes et de la végétation interférente, suivant leur porosité (fraction de trous). Une fois arrivée au sol, elle complète l'eau déjà





présente dans le compartiment sol de la cellule. L'eau présente dans la cellule ne peut excéder la capacité au champ et n'est pas transmise d'une cellule à une autre. L'eau est évaporée en fonction de l'ETP mais ne peut pas passer en-dessous du point de flétrissement permanent.

### **Les données d'entrée**

Un fichier « scène » permet à l'utilisateur de spécifier les caractéristiques de départ de la placette. Dans ce fichier, sont précisées les caractéristiques :

- De la placette. Ses dimensions et celles des cellules qui la composent.
- Des arbres. Ils sont définis par leur âge, leur DBH (diamètre du tronc à 1m30), leur hauteur, leur position sur la placette (x et y en mètres) et un identifiant qui leur est propre.
- Des classes de cohortes de semis. Actuellement, seules les lois de croissance des cohortes de régénération de pin sont implémentées dans Capsis. Elles peuvent, soit apparaître de façon aléatoire et donc la fréquence d'apparition doit être précisée, soit être définies une à une dans le fichier d'entrée. Dans ce dernier cas, les variables entrées sont l'identifiant de la classe de cohortes, sa position sur la placette (ligne et colonne de la cellule), son âge, sa hauteur, le diamètre des individus qui la compose et leur nombre. La hauteur de passage à l'âge adulte renseigne sur le moment où le jeune arbre acquière un houppier, sur la visualisation 3D de Capsis et donc qu'il est reconnu en tant qu'arbre adulte.
- De la végétation interférente. L'espèce, la position sur la placette (ligne et colonne de la cellule), la hauteur et le pourcentage de couverture y sont renseignés.
- Du sol. Position de la cellule, quantité d'eau contenue dans le sol à l'initiation de la scène, capacité au champ et point de flétrissement permanent.

Un fichier lumière et un fichier eau sont exploités par les modèles qui leurs sont propres. Le fichier eau présente la pluviométrie et l'ETP par jour alors que le fichier lumière renseigne sur le rayonnement total et le pourcentage de rayonnement diffus par heure, par jour ou par mois, selon le pas désiré.

### **Les données de sortie**

Suite à une simulation, les données propres aux arbres adultes, aux classes de cohortes de semis et à la végétation interférente peuvent être extraites. Le fichier de sortie des classes de cohortes, apporte des informations sur l'éclairement de la cellule, l'éclairement au-dessus et au dessous de la classe de cohortes, le pourcentage de lumière qui lui parvient, le contenu en eau du sol, l'indice de stress hydrique, le diamètre, la hauteur, l'accroissement de hauteur et l'effectif des individus qui compose la classe considérée.

Pour la végétation interférente, ce fichier apporte des valeurs de quantité d'eau contenu dans le sol, d'éclairement de la cellule et de pourcentage de lumière qui y parvient, d'éclairement au-dessus et au

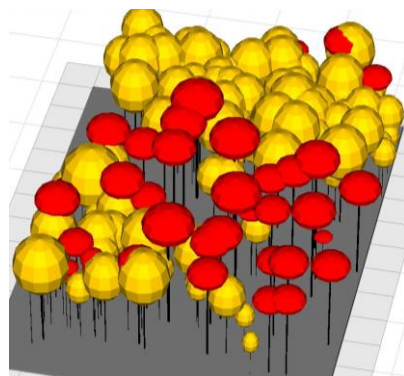


Fig. 5. Visualisations 3D, sous Capsis, de la répartition de la végétation pour le dispositif utilisé. Les caractéristiques de la forêt générée proviennent des données prélevées sur la parcelle 216C de Lorris. La surface grise rend compte de la hauteur de la végétation interférente. Les chênes sont représentés en jaune et les pins en rouge.

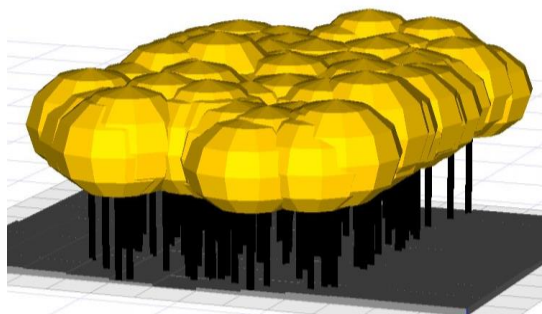


Fig. 6. Visualisations 3D, sous Capsis, de la répartition des arbres pour le dispositif utilisé en vue de l'observation de la végétation interférente. Des chênes, de houppiers de grandes tailles, ont été disposés de façon aléatoire au centre de la parcelle. La surface grise rend compte de la hauteur de la végétation interférente.

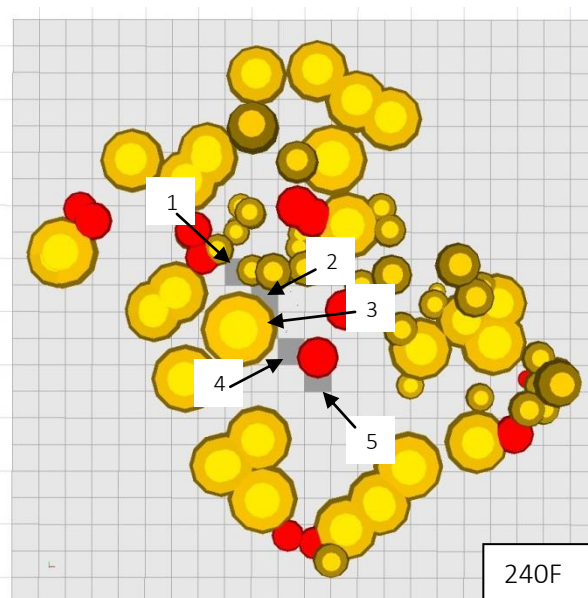
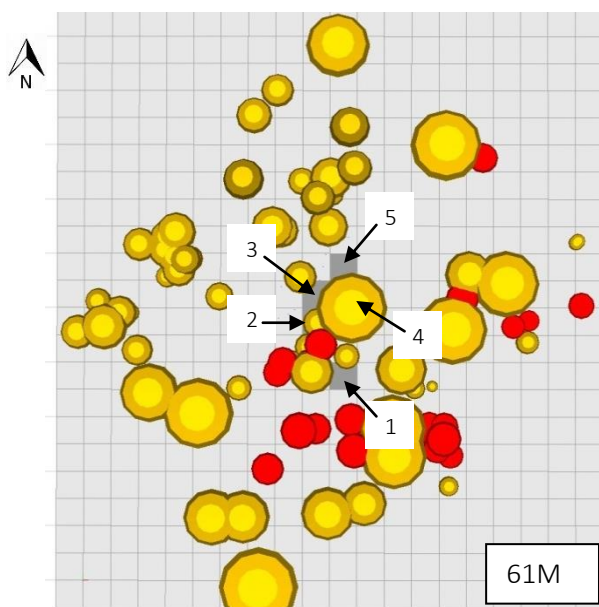
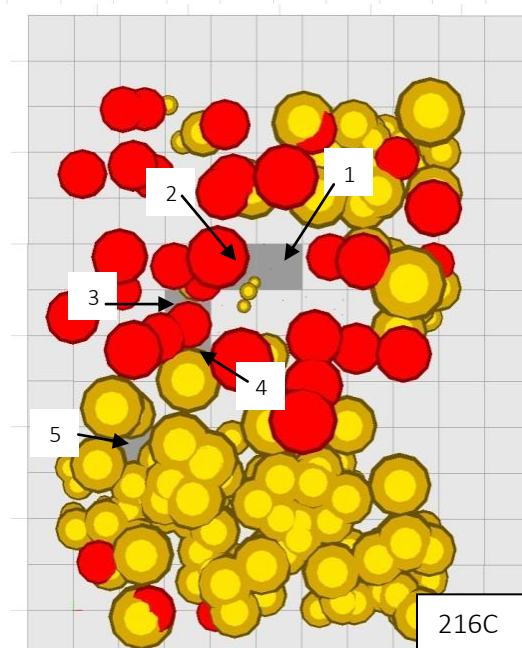


Fig. 7. Visualisations 3D, sous Capsis, de la répartition des placettes situées aux positions des capteurs de lumière pour les parcelles 61M, 240F et 216C. Parcelles en vue aérienne. Les carrés gris représentent les placettes enherbées au-dessus desquelles sont placés les capteurs. Elles sont numérotées de la placette la plus éclairée à la moins éclairée. La taille des cellules est de 5x5m. Les cercles jaunes sont des chênes et les rouges des pins. La flèche indique le nord.



dessous et de pourcentage de lumière qui atteint la végétation interférente, sa hauteur, son accroissement de hauteur et son taux de recouvrement.

## **Méthodes**

### **Vérification du bon fonctionnement de la visualisation 2D et 3D**

Pour vérifier le bon affichage par la visualisation 2D et 3D de Capsis des valeurs générées par le modèle, un fichier scène a été créé avec les données réelles provenant de la placette 216C du massif de Lorris en forêt d'Orléans. Dans ce dernier, seules les positions et la nature de la végétation interférente ont été modifiées (Fig.5). Quelques cellules au centre de la placette présentent de la callune alors qu'il y a, sur toutes les autres, de la molinie.

### **Observations de la végétation interférente**

Afin de vérifier la cohérence du développement des végétations interférentes, un fichier scène a été créé présentant une placette avec une ligne de chênes de forte densité allant de part et d'autre de la placette (Fig.6). Une ligne de molinie, une de fougère et une de callune ont été disposées perpendiculairement à la ligne de chêne. De plus, chaque chêne possède un houppier exagérément important afin d'accentuer la différence de luminosité entre le centre et les bords de cette petite forêt. Concernant les apports en eau, ils sont identiques quelle que soit la cellule de la placette.

### **Observation des cohortes**

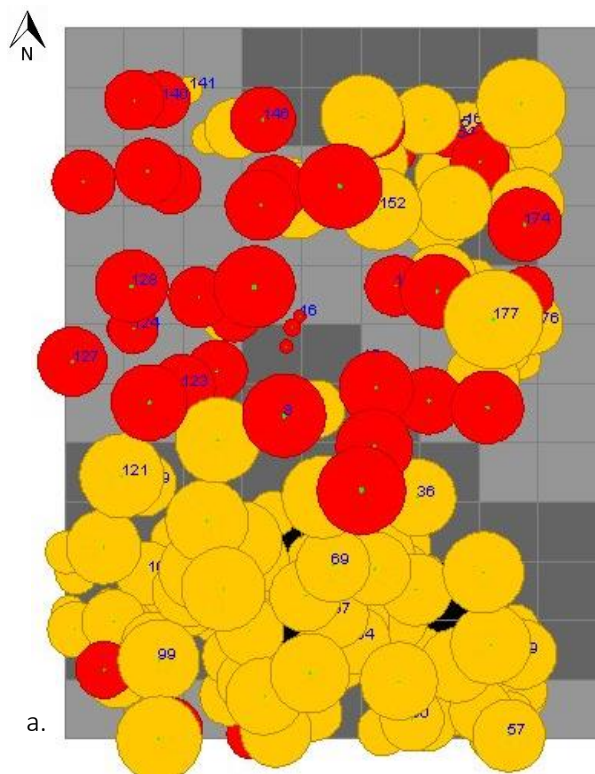
Ici, la réaction des cohortes a été étudiée en prenant en compte ou pas les mécanismes liés à l'eau. Pour cela, une placette vierge a été générée. Seule la moitié de celle-ci bénéficie d'un apport d'eau à l'initiation de la scène, avec une teneur en eau (SWC ou Soil Water Content) de 80mm, une capacité au champ de 100mm et un point de flétrissement de 20mm. Ainsi, la dépendance entre les cohortes et la SWC peut être étudiée.

### **Efficiences des simulations d'interception de la lumière**

Pour vérifier la cohérence des valeurs d'éclairement obtenues en sous-bois, 3 parcelles du massif de Lorris ont été modélisées à partir de leurs données réelles (Fig.7). L'une présente de la fougère (240F), une de la callune (216C) et une autre de la molinie (61M). Des valeurs d'éclairement ont été mesurées au centre des parcelles au niveau de placettes enherbées et désherbées juxtaposées. Les capteurs ont été disposés au-dessus de la végétation interférente pour les placettes enherbées. Les valeurs simulées et observées ont été comparées pour les placettes enherbées.

### **Evaluation de la vitesse de simulation en fonction de la complexité de la scène**

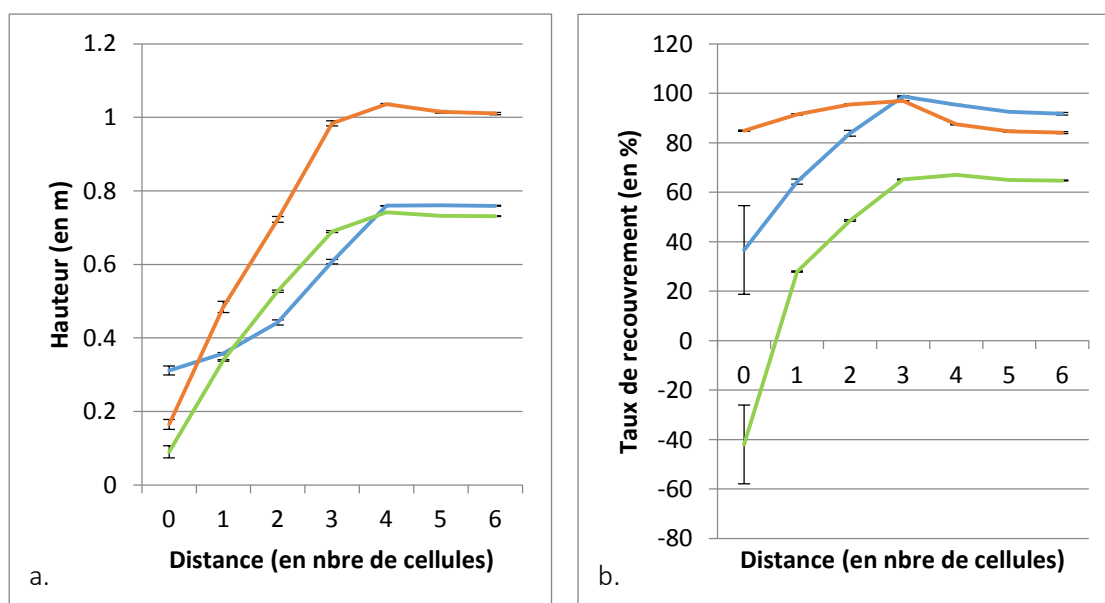
Afin d'évaluer le poids qu'exercent les éléments de la scène sur la vitesse de simulation, plusieurs densités d'arbres et tailles de cellules ont été testées en interaction. Les arbres ont été choisis car l'interception de la lumière par leur houppier est un processus gourmand en temps de calcul. Le nombre



b.

35.25	40.54	29.09	25.88	22.6	24.22	21.9	26.11	40.62
37.63	34.87	34.24	28.61	25.87	19.34	22.01	23.38	31.32
39.73	36.68	37.84	33.23	32.49	30.18	26.26	28.05	37.04
39.56	39.65	37.9	43.05	36.23	34.46	29.41	30.78	38.1
42.48	39.13	36.24	31.69	29.63	32.53	24.14	32.58	37.09
38.15	32.08	30.99	29.96	30.5	33.79	35.67	40.52	41.79
35.25	30.54	29.96	24.54	28.57	29.25	31.94	36.28	38.41
28.51	23.74	15.87	16.54	16.19	17.76	27.1	33.1	31.28
19.58	16.18	10.95	11.75	9.728	12.51	23.85	28.18	27.7
21.89	18.17	9.523	7.942	6.458	9.377	12.17	20.59	25.83
27.34	25.51	19.04	15.74	14.55	14.68	12.08	19.87	27.48
34.93	34.96	36.51	29.78	30.68	25.5	24.25	30.62	31.95

**Fig. 8. Répartition des transmittances des houppiers sur la parcelle sur Capsis et sous Excel.** Sur la 2D (a), les cellules en niveau de gris renseignent sur la proportion de lumière qui parvient sous les houppiers, le noir pour les valeurs les plus faibles et le blanc pour les plus élevées. Les chênes sont représentés en jaune et les pins en rouge (les nombres sont leurs identifiants). Sur Excel (b), ce paramètre est traduit en un dégradé de couleurs allant du bleu pour les valeurs les plus faibles jusqu'au rouge pour les valeurs les plus élevées. La flèche indique le nord.



**Fig. 9. Comparaison des hauteurs (a) et des taux de recouvrement (b) entre les différentes espèces de végétation interférante en fonction de leur éloignement du centre de la parcelle.** La callune (en vert), la molinie (en bleu) et la fougère (en rouge) ont des hauteurs indiquées en mètre, le taux de recouvrement étant un pourcentage. Leur éloignement du centre de la parcelle est compté en nombre de cellules. De 0 à 1 = faible éclaircissement (27 à 68 Mj) ; de 2 à 3 = éclaircissement moyen (110 à 256 Mj) ; de 4 à 6 = fort éclaircissement (527 à 612 Mj). Barres d'erreur : écarts types.

d'arbres présents était de 0 puis de 4 et a ensuite été doublé à chaque simulation. Pour les cellules, c'est surtout l'effet de leur nombre qui a été évalué. A chaque simulation, leurs côtés ont été divisés par deux tandis que l'aire de la placette était conservée. La durée simulée est de 20 ans.

## **Résultats-Discussion**

### **1. Vérification du bon fonctionnement de la visualisation 2D et 3D : interception de la lumière par les arbres**

Suite au passage des rayons lumineux à travers les houppiers des arbres, l'énergie à la sortie de ceux-ci diminue créant ainsi une ombre plus ou moins intense sur la végétation sous-jacente. Capsis utilise ces données pour établir une cartographie de l'éclairement sur la base de différentes classes de couleurs, allant du blanc au noir, afin de rendre compte, de façon qualitative, de l'ombre portée sur la végétation située en-dessous des pins et des chênes adultes.

Afin de vérifier la correspondance entre les données générées et le rendu visuel obtenu sur Capsis, des dégradés de couleurs en accord avec l'importance des valeurs ont été créés grâce à Excel. Ainsi, une certaine corrélation (non vérifiée statistiquement) a pu être observée entre la répartition des transmittances (pourcentage de lumière parvenant aux strates inférieures par rapport à la lumière totale traversant les houppiers) obtenue sous Excel (Fig.8b), et la répartition des arbres et les niveaux de gris sous-jacent, sous Capsis (Fig.8a). Un décalage de l'ombre portée est observé du fait de la hauteur des arbres. Une légère différence est à noter entre les 2 rendus de l'éclairement relatif mais celle-ci semble être due à la différence de précision du jeu de couleur, avec 4 classes de couleurs pour Capsis contre 12 classes pour Excel.

### **2. Sensibilité de la végétation interférente à différents paramètres**

#### **2.1. Variation de la taille et du taux de recouvrement des végétations interférentes en fonction de l'éclairement**

Au centre de la placette, une zone de faibles niveaux d'éclairement est observée du fait de la présence des chênes adultes (cf. paragraphes « méthodes »). Dans cette zone, des tailles et des taux de recouvrement différents sont observés en fonction de l'espèce de végétation interférente considérée (Fig. 9). Dans la zone de faibles éclaircissements, la molinie présente des tailles relativement importantes au regard de celles de la fougère et de la callune (Fig.9a). Toutefois, à des éclaircissements moyens et forts, des tailles similaires sont trouvées pour la callune et la molinie. Dans cette gamme, la fougère se démarque par son amplitude avec une taille maximale de 1/4 plus importante que les 2 premières.

Comme pour la taille, le taux de recouvrement est plus faible dans les zones à faible éclaircissement (Fig.9b). Cependant, de fortes disparités sont observées entre les différentes espèces. Dans cette zone, la fougère présente un taux de recouvrement supérieur à celui de la molinie qui montre elle-même un taux supérieur

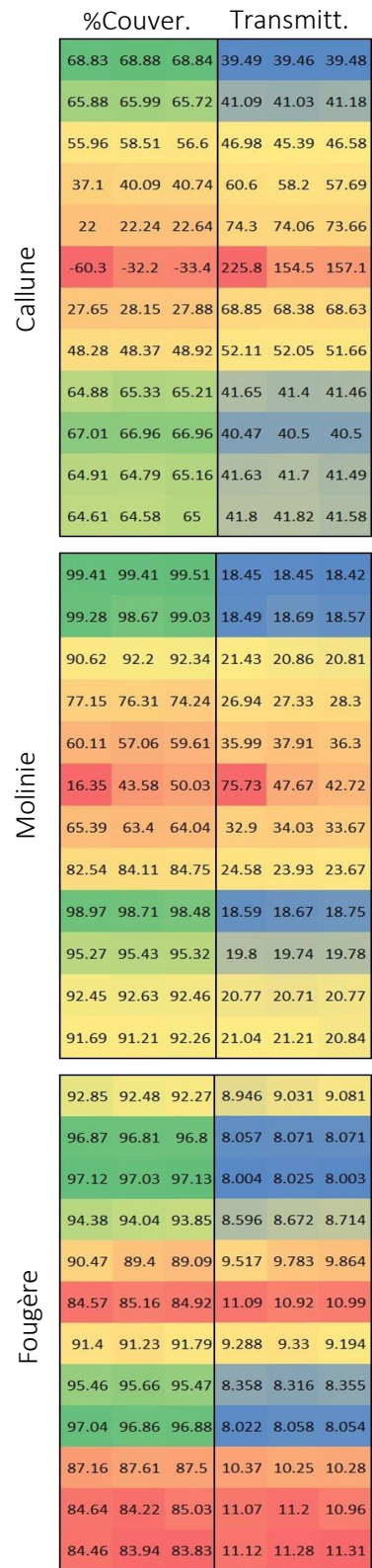
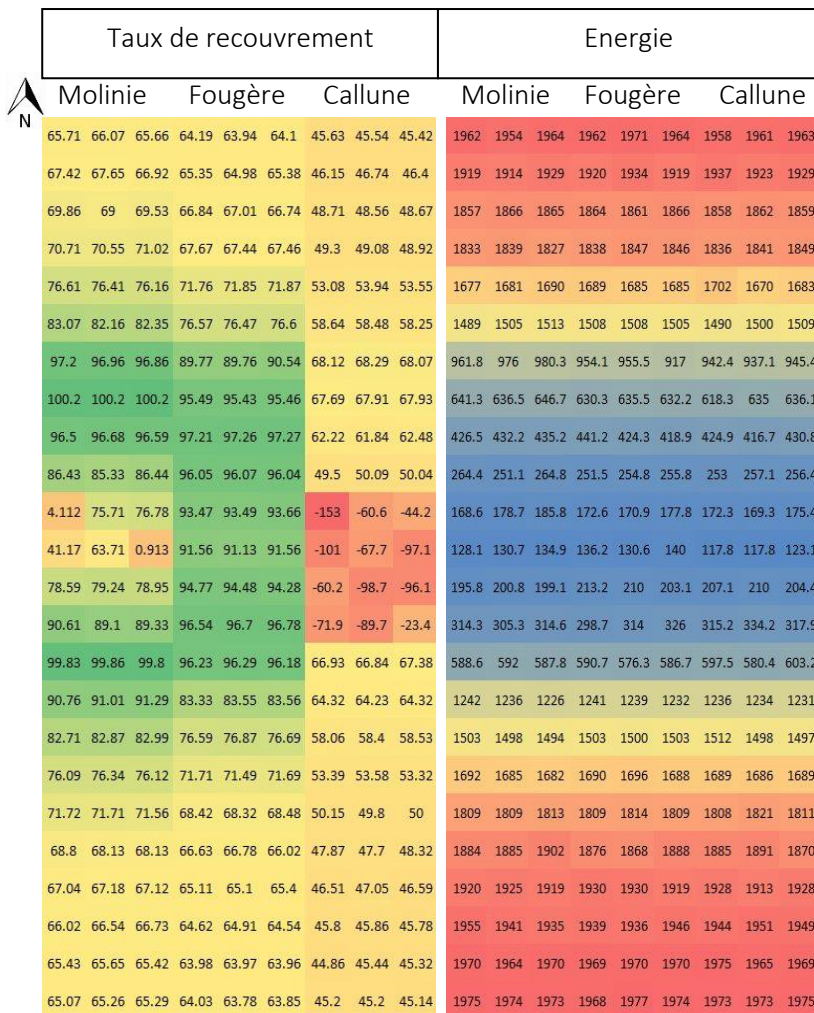


Fig. 10. Comparaison des taux de recouvrement (à gauche) et de l'énergie parvenant au-dessus de la végétation interférente (à droite) entre les différentes espèces de végétation interférente. Les classes de couleurs vont du rouge pour les taux de recouvrement les plus faibles au vert pour les plus élevés, et du bleu pour les niveaux d'énergie les plus faibles au rouge pour les plus élevés. Le taux de recouvrement est en pourcentage et l'énergie en mégajoule. La flèche indique le nord.

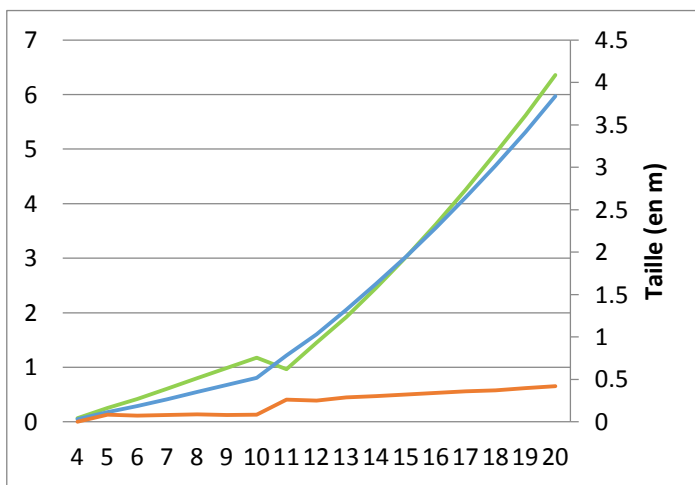


Fig. 12. Impact de la hauteur des jeunes pins sur leur diamètre et sur l'incrément de hauteur. L'axe de droite est associé aux courbes de hauteur (en bleu) et d'incrément de hauteur (en rouge). La courbe verte représente les variations de diamètre.

Fig. 11. Comparaison entre le taux de recouvrement et la transmittance pour chacune des espèces de végétation interférente. Les classes de couleurs sont propres à chacune des espèces et vont du rouge pour les taux de recouvrement les plus faibles au vert pour les plus élevés, et du bleu pour les transmittances les plus faibles au rouge pour les plus élevées. Le taux de recouvrement et la transmittance sont en pourcentage.

à celui de la callune. A de faibles valeurs d'éclairiments, la callune possède des taux de recouvrement négatifs. A des éclairiments moyens à forts, la callune présente une forte amplitude mais reste, pour ses plus fortes valeurs, un peu au-dessus des valeurs minimales de la molinie. La molinie ne présente des valeurs proches de celles de la fougère que lors de forts éclairiments.

Cette placette a également été allongée afin d'éliminer, en partie, l'effet de tore et de faire des observations sur des éclairiments plus importants (Fig. 10). Ainsi, pour des éclairiments de près de 95% de l'énergie générée par le fichier lumière (extrémités de la placette), des taux de recouvrement cohérents sont observés. Des erreurs sont, à l'inverse, présentes pour de faibles éclairiments pour la callune mais également pour la molinie. A de très faibles éclairiments, les taux de recouvrement semblent ne plus dépendre de l'énergie reçue.

En général, les végétations interférentes réagissent de façon relativement cohérente même si des valeurs négatives sont observées pour le taux de recouvrement à de très faibles éclairiments. Cela serait dû au fait que la dépendance du taux de recouvrement à l'éclairiment est sous la forme d'une courbe logarithmique définie pour une gamme de données mais qui se révèle fautive pour de faibles éclairiments. Cependant, cela n'est pas visible sur la visu 3D. Un bornage des courbes d'évolution des taux de recouvrement des végétations interférentes est donc à envisager pour les versions futures du modèle.

## 2.2. Variation de la lumière interceptée en fonction du taux de couverture de la végétation interférente

Une forte corrélation (non vérifiée statistiquement) a été observée entre les taux de recouvrement des végétations interférentes et leurs transmittances, quelle que soit l'espèce (Fig. 11). Ainsi, plus la végétation a un taux de recouvrement important plus elle capte de lumière, ce qui est cohérent et en adéquation avec les équations implémentées dans le modèle.

## 3. Evaluation de la cohérence d'ensemble de l'évolution des cohortes de semis

### 3.1. Loi de croissance des cohortes

Dans le code, deux lois de croissance sont définies : une pour les semis inférieurs à 0,5m et une pour les semis supérieurs à 0,5m. La comparaison entre la hauteur, le diamètre et l'accroissement de hauteur des cohortes permet d'observer une augmentation synchronisée de la croissance en diamètre et en hauteur (Fig. 12). Ces modifications se déroulent lorsque la cohorte atteint une hauteur supérieure à 0,5 m, ceci en accord avec les règles de croissance entrées dans le code. L'augmentation de l'incrément de hauteur concorde avec une accélération de la croissance.

Toutefois, une décroissance transitoire du diamètre peut être notée suite au passage d'une loi à l'autre. Elle n'est visible que suite à l'extraction des données. Cette erreur peut être due à la dépendance croisée



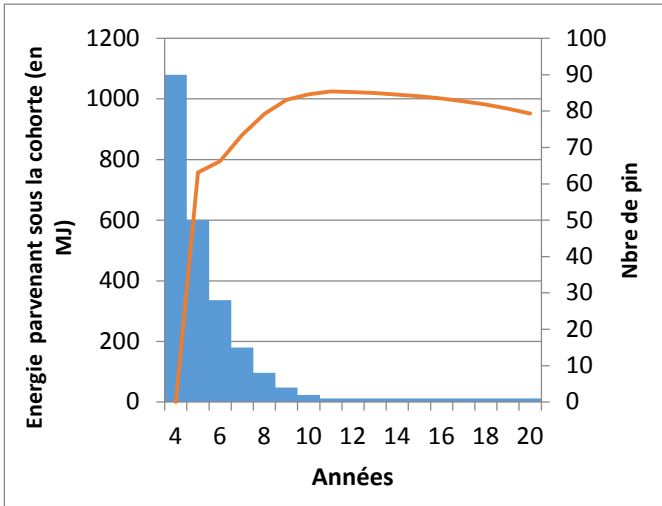


Fig. 13. Variation de l'énergie parvenant sous la cohorte en fonction de l'effectif. L'histogramme représente le nombre de pins présents dans la classe de cohortes. La courbe orange présente la variation de l'énergie en mégajoule parvenant sous la cohorte.

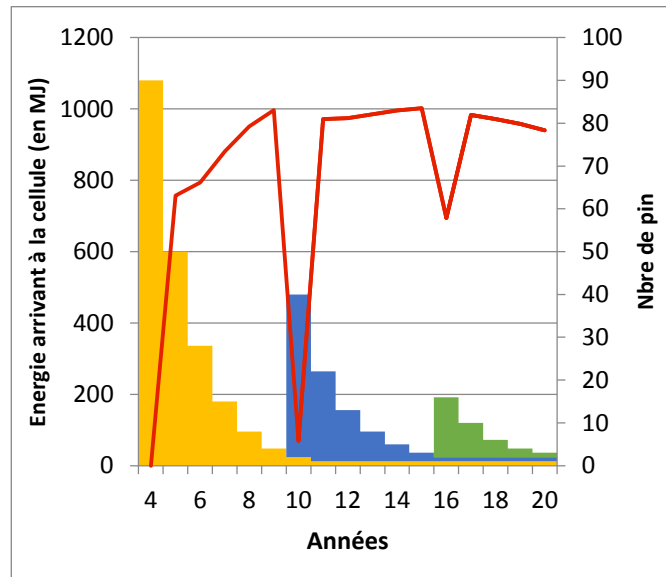


Fig. 14. Impact du nombre de jeunes pins sur l'énergie parvenant sous les cohortes. L'histogramme représente le cumul du nombre de pins apparaissant par classe de cohorte sur une même cellule. Sont représentées en jaune, en bleu et en vert les classes de cohortes suivant leur ordre d'apparition. La courbe rouge présente la variation de l'énergie parvenant sous les cohortes en mégajoules.

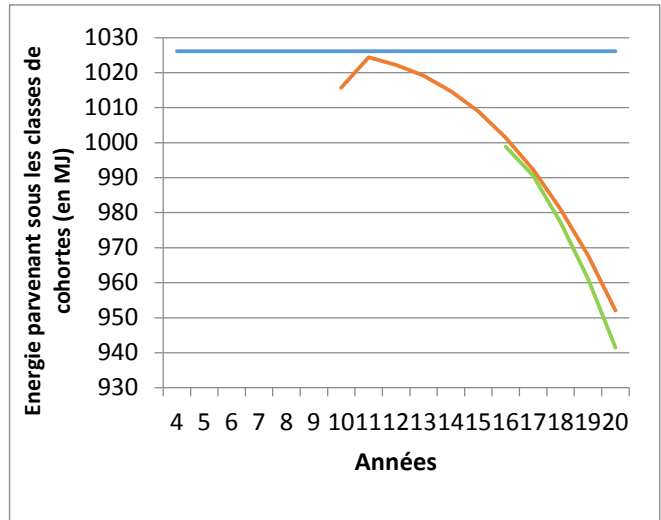


Fig. 15. Influence de l'occupation de la cellule sur l'énergie parvenant sous les classes de cohortes. Est représentée en bleu, en orange et en vert l'énergie en mégajoule parvenant sous chacune des classes de cohortes suivant l'ordre d'apparition de ces dernières.

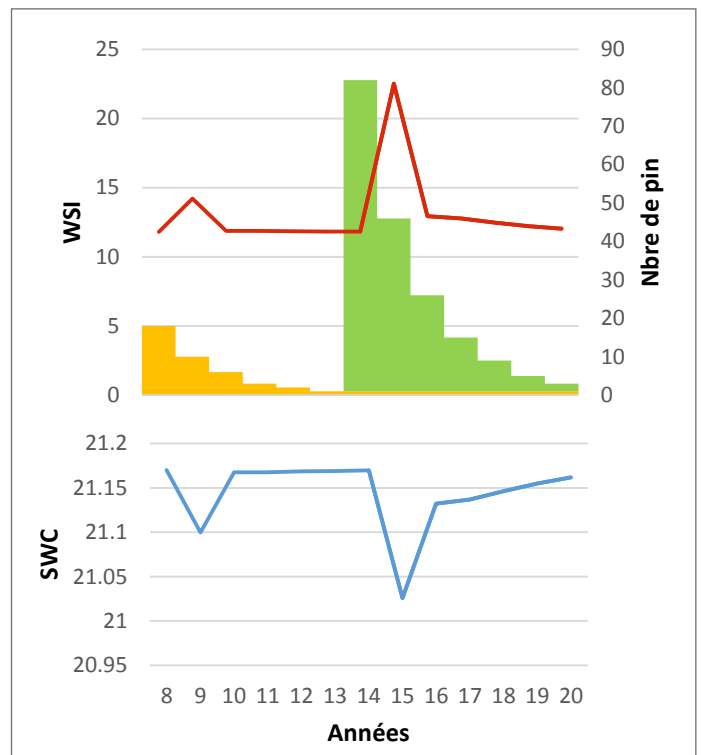


Fig. 16. Comparaison de l'indice de stress hydrique (WSI) et du contenu en eau du sol (SWC) en fonction de l'effectif des classes de cohortes. L'histogramme représente le cumul du nombre de pin apparaissant sur la cellule. Sont représentées en jaune et en vert les cohortes suivant leur ordre d'apparition. La courbe rouge présente la variation de l'indice de stress hydrique et la bleu l'eau contenu dans le sol.

entre les données de croissance en hauteur et celles de croissance en diamètre. Il serait donc intéressant de modifier dans le code les règles de dépendance de ces paramètres.

### 3.2. Impacts des cohortes sur l'énergie parvenant aux strates inférieures

A l'apparition d'une cohorte, il y a une forte diminution de l'énergie parvenant sous cette dernière (Fig.13). Il y a ensuite une forte croissance de cette énergie jusqu'à l'atteinte d'une valeur maximale, ceci de manière conjointe avec la décroissance du nombre d'individus présents dans la cohorte, ce qui est cohérent. Par la suite, le jeune pin "survivant" commence à développer son houppier d'où la décroissance progressive mais faible de l'énergie transmise avec les années.

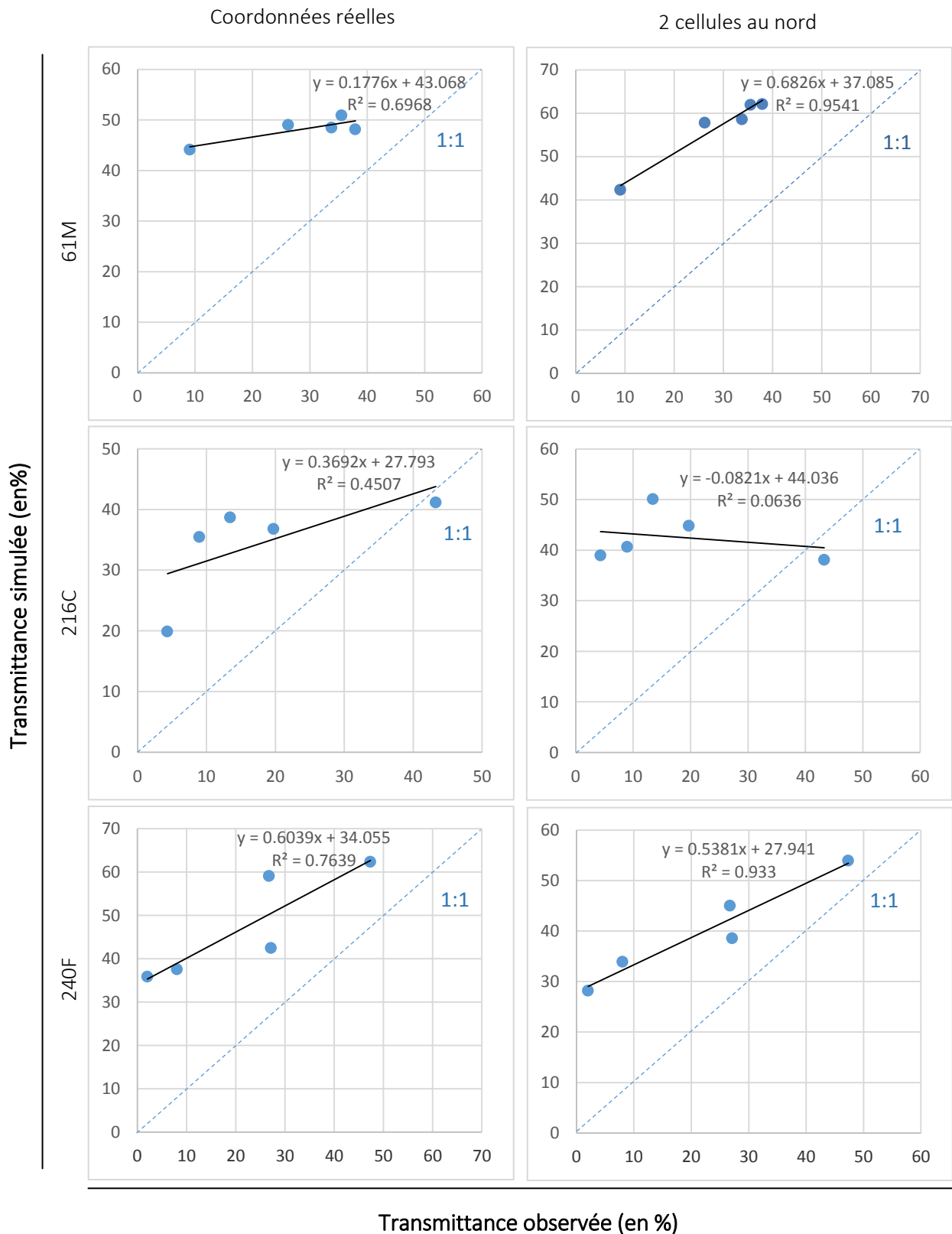
L'énergie parvenant sous la cohorte décrit des pics transitoires de tailles variables (Fig.14), en relation avec la taille des cohortes nouvellement apparues : les pics générés étant d'autant plus importants que l'effectif de la cohorte est grand. L'ordre d'apparition des cohortes jouent également un rôle sur l'énergie qui leur parvient (Fig. 15). Ainsi, la première cohorte apparue bénéficie de la totalité du rayonnement solaire tout au long de sa croissance du fait de sa taille plus importante, contrairement à celles apparues plus tardivement et qui lui sont subordonnées.

### 3.3. Impact des cohortes sur la teneur en eau du sol

La taille des cohortes a un effet direct sur la teneur en eau du sol. En effet, plus la taille de la cohorte est importante plus la réserve utile diminue et plus l'indice de stress hydrique augmente (Fig. 16).

De plus, la croissance des cohortes est plus rapide dans la zone pour laquelle les processus liés à l'eau ne sont pas pris en compte. Cela peut être vérifié par la comparaison du nombre de semis recrutés pour chacune des zones. Ainsi une précocité de 3ans est à noter pour les individus dont la croissance n'est pas dépendante des quantités d'eau présentes sur la placette.

Une valeur de teneur en eau du sol est défini à chaque début de simulation. Elle a pour fonction de rendre compte de l'eau disponible en début de printemps après la fonte des neiges. Toutefois, au début de chaque année le contenu en eau du sol n'est pas remis à sa valeur initiale. Cela devrait être corrigé dans le code car chaque année la SWC débute au niveau de la SWC de l'année précédente. La SWC est donc en permanence au point de flétrissement.



**Fig. 17. Efficacité des simulations d'interception de la lumière.** La précision de simulation des transmittances du dessus de la végétation de sous-bois par le modèle est évaluée en confrontant les valeurs générées par RREShar à celles relevées sur le terrain pour les parcelles 61M, 216C et 240F. Cela est effectué aux coordonnées réelles des capteurs de lumière et à 2 cellules plus au nord de chacune de ces positions. Les coefficients de détermination ( $R^2$ ) sont obtenus suite à une régression linéaire. La ligne discontinue représente la simulation optimale (valeurs simulées = valeurs observées).

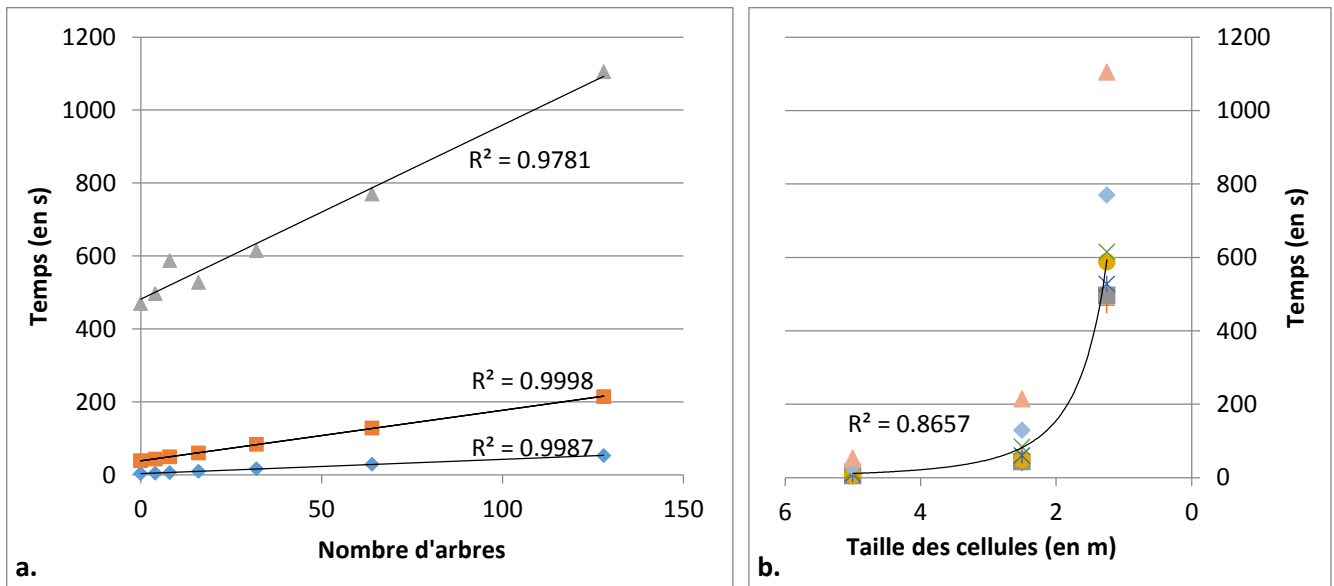
#### 4. Efficience des simulations d'interception de la lumière

Suite à la modélisation des parcelles 61M, 240F et 216C, les transmittances relevées sur le terrain et celles simulées par RReShar ont été confrontées (Fig.17). Les pentes des régressions linéaires (générées par la méthode des moindres carrés par Excel) sont variables suivant la parcelle considérée. Les  $R^2$  sont élevés pour les parcelles 61M (0,6968) et 240F (0,7639) et moyen pour la 216C (0,4507). L'estimation de la transmittance aux positions des capteurs est donc peu fiable hormis pour la parcelle 240F qui a à la fois une pente relativement proche de 1 (0,6039) et un  $R^2$  élevé.

Dans la mesure où un décalage est observé, sur la visualisation 3D, entre l'emplacement des arbres et l'ombre portée sur les cellules, les valeurs de transmittance ont été relevées 2 cellules plus au nord de leurs positions respectives, pour chacune des parcelles (Fig.17). Cette expérience révèle que quel que soit le point d'observation, les transmittances sont systématiquement surestimées par le modèle. Elle montre aussi un rapprochement des transmittances simulées aux valeurs réelles pour la parcelle 61M et 240F ainsi qu'une amélioration des tendances des courbes générées. Les  $R^2$  sont très proches de 1 (respectivement 0,9541 et 0,933) et la pente pour la parcelle 61M est grandement améliorée même si un léger abaissement de cette pente est observé pour la 240F. Il est probable que ce décalage dans l'espace des positions des valeurs générées soit dû au fait que la hauteur du capteur de mesure ne soit pas prise en compte lors de cette expérience. La valeur simulée est donc d'autant plus éloignée du capteur que celui-ci est élevé au-dessus du sol.

Toutefois, une moins bonne corrélation est obtenue pour la parcelle 216C. Les valeurs prises 2 cellules au nord des positions réelles des capteurs montrent des valeurs de pente et de  $R^2$  proches de 0. Les valeurs générées n'ont donc plus rien à voir avec les valeurs réelles. Cela peut s'expliquer par le fait que les cellules observées sont à proximité du bord de la parcelle. Elles sont donc davantage soumises à l'effet de bord qui est normalement un moyen de rapprocher les valeurs d'éclairement de la réalité. Mais, il ne peut pas être efficace pour des parcelles aussi hétérogènes que celles prises en compte ici.

En outre, des études ont montré que la forme des houppiers a une part non négligeable dans l'exactitude du calcul d'interception de la lumière (Da Silva et al., 2012). Même si la taille des houppiers est fonction des caractéristiques dendrométriques des arbres précisées dans le fichier d'entrée, les houppiers ellipsoïdaux simulés ici sont probablement bien trop éloignés de la réalité pour une simulation optimale. Pour pallier ce problème Da Silva (2012) a mesuré le rayon de l'extension maximale du houppier dans 4 directions opposées. Cette mesure de terrain permet de modéliser des houppiers asymétriques plus proches des houppiers de la parcelle échantillonnée.



**Fig. 18. Influence du nombre d'arbres et du nombre de cellules sur le temps de simulation de 20ans de dynamique.** Influence du nombre d'arbres sur le temps de simulation (a). Les observations se sont faites sur des tailles de cellules de 5 (losanges), 2.5 (carrées) et 1.25 m (triangles) de côté. Influence de la taille des cellules sur le temps de simulation (b). Les observations se sont faites sur des parcelles de 0 (plus), 4 (carrées), 8 (ronds), 16 (étoiles), 32 (croix), 64 (losanges) et 128 arbres (triangles). Régression linéaire (a) et régression puissance (b).

Il faut aussi savoir que les transmittances relevées dans le modèle sont relatives à des cellules de 5x5m ce qui excède largement la taille d'un capteur de lumière. Cela génère une incertitude entre les 2 types de valeurs comparées dont l'un est ponctuel (capteurs) et dont l'autre est une moyenne de transmittance faite sur 25m<sup>2</sup> (issu du modèle). Pour se rapprocher des conditions de relevé de mesure réalisés sur le terrain, les cellules ne devraient être inférieures à 0,5x0,5m. Toutefois, cela expose l'utilisateur à une des limites du modèle : le temps de calcul (voir partie 5).

## **5. Evaluation de la vitesse de simulation en fonction de la complexité de la scène**

Pour une même taille de cellules, l'augmentation du nombre d'arbres sur la scène a pour effet d'augmenter linéairement le temps de calcul (Fig.18a.). Le graphique généré présente une pente d'autant plus importante que la taille des cellules est faible. Pour un même nombre d'arbre sur la placette, la diminution de la taille des cellules, et donc l'augmentation de leur nombre, accroît le temps de calcul selon une courbe de tendance quasi exponentielle (Fig. 18b.). De plus, il est à noter que le nombre d'arbres a bien moins d'influence sur la dispersion des valeurs que le nombre de cellules.

Avant de lancer un nombre important de simulations, il est donc important que l'utilisateur définisse les dimensions de la placette et des cellules qui la compose afin d'optimiser au mieux les temps de simulation. Ce calibrage est propre aux performances de chaque ordinateur.

## **Conclusion – Perspectives**

Cette étude a principalement été axée sur une première évaluation de l'efficacité du modèle RReShar à simuler le partage et l'utilisation des ressources par différentes strates de végétation. Hormis des valeurs négatives de taux de recouvrement générées aux faibles niveaux d'éclairement pour les végétations interférentes, la croissance et le développement des différentes composantes se réalisent de façon assez cohérente.

La simulation de l'interception de la lumière par les houppiers est relativement proche des valeurs observées dans la réalité. Cependant, les valeurs simulées sont souvent surestimées. Cela note la probable nécessité d'un réglage au niveau des valeurs de porosité et/ou de taille des houppiers. Les effets de bord, malgré l'effet de tore, se sont révélées être des sources d'erreurs principalement dans le partage de la lumière (une variable de laquelle dépend l'évolution de l'ensemble des composantes du modèle). Il serait donc intéressant que davantage de placettes soient modélisées afin de déterminer les tailles optimales des zones simulées ainsi que le retrait minimal du bord de la scène à respecter (zone tampon). Un petit mur cylindrique opaque faisant le tour de la zone à observer pourrait être créé afin de remplacer l'effet de tore (Da Silva et al., 2012). Ce mur, dont l'opacité est calibrée selon l'hétérogénéité du peuplement, permet d'éliminer les rayons lumineux rasants qui pourraient parvenir au centre de la placette modélisée.



En outre, la forme des houppiers a aussi, probablement, une part non négligeable dans les erreurs générées. La distorsion de formes simples par le modèle de lumière permettrait de se rapprocher de la réalité. Cela impliquerait d'intégrer sur le terrain, une mesure des houppiers dans différentes directions et pour chaque arbre, ce qui peut s'avérer être très contraignant.

La mortalité des semis est un processus important dans la régénération mais qui a peu été éprouvée lors de cette étude, principalement à cause du faible nombre de publications traitant du sujet et de données disponibles. Ainsi dans le modèle, chaque classe de cohortes présente une mortalité annuelle de ses semis sous la forme d'une exponentielle décroissante (Debain et al., 2007), correspondant aux aléas biotiques. Toutefois, selon Amm et al. (2012), le recrutement fait également intervenir l'âge des arbres-mères. Ainsi, le recrutement peut aller, pour 100m<sup>2</sup>, de 1,3semis/an pour les arbres-mères les plus âgés, à 122semis/an pour les plus jeunes. La prise en compte de cette variable, par le modèle, supposerait l'élimination de la « pluie de graines » en faveur d'une distribution des semis centrée sur l'arbre dont ils proviennent. Une bibliothèque est actuellement créée en ce sens par une autre équipe et sera donc susceptible d'être utilisée par RReShar.

Ainsi, RReShar fonctionne de façon assez cohérente mais certains points restent à affiner. La partie la plus longue et incompressible est à venir, à savoir, obtenir des relevés sur 10 à 20 ans afin d'éprouver le modèle dans sa fonction première : la prévision.





## Réflexion personnelle

Je tiens à adresser mes remerciements à l'ensemble du PIAF pour l'accueil ainsi que pour l'aide apportée. Cette expérience professionnelle m'a permis de me faire une idée plus claire de mon avenir. J'ai pu voir comment sont réellement traités les sujets de recherche et j'ai également assimilé une méthodologie que je n'aurais pas pu, à mon sens, obtenir au travers de ma formation universitaire seule. Cette sortie du cadre scolaire a vraiment été enrichissante et m'a permis d'apprendre de différents champs disciplinaires, dans et hors des limites de mon thème de stage. A réitérer !

## Bibliographie

**Adams, H. D., Guardiola-Claramonte, M., Barron-Gafford, G. A., Villegas, J. C., Breshears, D. D., Zou, C. B., Troch, P. A. and Huxman, T. E.** (2009). Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality portends increased regional die-off under global-change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. **106**: 7063-7066.

**Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H. et al.** (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*. **259**: 660-684.

**Amm, A., Pichot, C., Dreyfus, P., Davi, H. and Fady, B.** (2012). Improving the estimation of landscape scale seed dispersal by integrating seedling recruitment. *Annals of Forest Science*. **69**: 845-856.

**Bieng, M. A. N., Perot, T., de Coligny, F. and Goreaud, F.** (2013). Spatial pattern of trees influences species productivity in a mature oak–pine mixed forest. *European Journal of Forest Research*. **132**: 841-850

**Burgi, M. and Schuler, A.** (2003). Driving forces of forest management - an analysis of regeneration practices in the forests of the Swiss Central Plateau during the 19th and 20th century. *Forest Ecology and Management*. **176**: 173-183.

**Chrysopolitou, V., Apostolakis, A., Avtzis, D., Avtzis, N., Diamandis, S., Kemitzoglou, D., Papadimos, D., Perlerou, C., Tsiaoussi, V. and Dafis, S.** (2013). Studies on forest health and vegetation changes in Greece under the effects of climate changes. *Biodiversity and Conservation*. **22** : 1133-1150.

**Commission européenne** (2013). COMMUNICATION DE LA COMMISSION AU PARLEMENT EUROPÉEN, AU CONSEIL, AU COMITÉ ÉCONOMIQUE ET SOCIAL EUROPÉEN ET AU COMITÉ DES RÉGIONS: Une nouvelle stratégie de l'UE pour les forêts et le secteur forestier. **COM (2013) 659 final**, 1-19.

**Courbaud, B.** (1996). Modélisation de la croissance en forêt irrégulière. Perspectives pour les pessières irrégulières de montagne. *Revue Forestiere Francaise*. **n° sp. 1995** : 173-181.

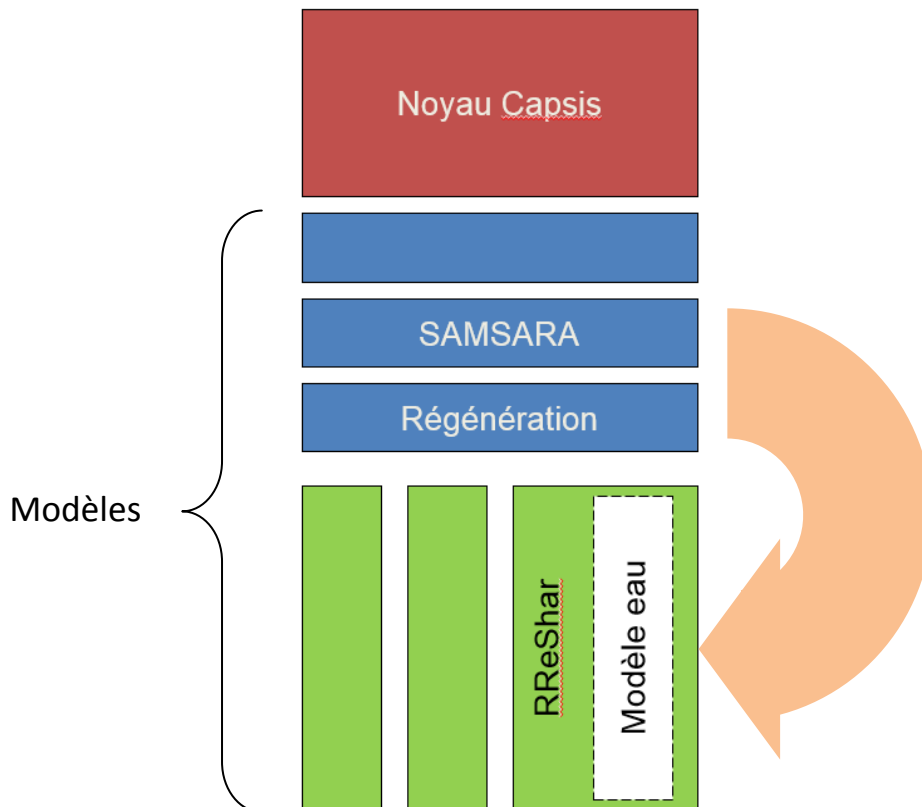


- Da Silva, D., Balandier, P., Boudon, F., Marquier, A. and Godin, C.** (2012). Modeling of light transmission under heterogeneous forest canopy: an appraisal of the effect of the precision level of crown description. *Annals of Forest Science*. **69**: 181-193.
- Debain, S., Chadoeuf, J., Curt, T., Kunstler, G. and Lepart, J.** (2007). Comparing effective dispersal in expanding population of *Pinus sylvestris* and *Pinus nigra* in calcareous grassland. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*. **37** : 705-718.
- De Coligny, F.** (2003). Capsis. <<http://capsis.cirad.fr>>. Consulter le 22/08/2014
- Delatour, C.** (1983). Les dépérissements de chênes en Europe. *Revue Forestiere Francaise*. **4** : 265-282.
- Gaudio, N., Balandier, P., Dumas, Y. and Ginisty, C.** (2011). Régénération naturelle du pin sylvestre sous couvert : contrainte de la végétation monopoliste de sous-bois en milieu acide. *Rendez-vous techniques ONF*. **33-34**: p. 18 - p. 24.
- GIEC (1)** (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 1-103.
- GIEC (2)** (2007). Changements climatiques 2007- Questions fréquentes - Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 100-141.
- GIEC** (2013). Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment. 1-36.
- Harmer, R., Boswell, R. and Robertson, M.** (2005). Survival and growth of tree seedlings in relation to changes in the ground flora during natural regeneration of an oak shelterwood. *Forestry*. **78**: 21-32.
- Perot, T., Goreaud, F., Ginisty, C. and Dhote, J. F.** (2010). A model bridging distance-dependent and distance-independent tree models to simulate the growth of mixed forests. *Annals of Forest Science*. **67**.
- Perot, T. and Picard, N.** (2012). Mixture enhances productivity in a two-species forest: evidence from a modeling approach. *Ecological Research*. **27**: 83-94.
- Vanclay, J. K.** (1995). GROWTH-MODELS FOR TROPICAL FORESTS - A SYNTHESIS OF MODELS AND METHODS. *Forest Science*. **41**: 7-42.
- Zlatanov, T., Schleppi, P., Velichkov, I., Hinkov, G., Georgieva, M., Eggertsson, O., Zlatanova, M. and Vacik, H.** (2013). Structural diversity of abandoned chestnut (*Castanea sativa* Mill.) dominated forests: Implications for forest management. *Forest Ecology and Management*. **291** : 326-335.



## Annexes

**Annexe 1 : Gestion des bibliothèques dans Capsis.** Les bibliothèques privées (en vert) peuvent s'appuyer sur des bibliothèques publiques (en bleu) pour modéliser une partie de leurs processus. Le noyau Capsis permet le fonctionnement de l'ensemble et apporte certaines fonctionnalités de base (graphique, visualisations 2D et 3D, etc). Exemple de la relation entre RReShar et les bibliothèques SAMSARA et Régénération. Code propre au modèle encadré en pointillés.



**Annexe 2 : Gestion des effets de bord de la placette simulée par un système de tore.** Le principe du système de tore à trois dimensions : la trame d'origine est représentée par un volume comprenant les arbres (1). Dans un tore, le côté gauche doit rejoindre le côté droit, ce qui donne un tracé circulaire dans le plan vertical. La scène prend la forme d'un tube (2). Une seconde boucle dans le plan horizontal permet de relier la face frontale à la face arrière et un tore est obtenu (3) (d'après Courbaud et al., 2003).

