



HAL
open science

Modélisation du bilan hydrique en structure forestière irrégulière à plusieurs strates - Application à la simulation de la dynamique forestière

Willem Palie

► To cite this version:

Willem Palie. Modélisation du bilan hydrique en structure forestière irrégulière à plusieurs strates - Application à la simulation de la dynamique forestière. 2015, 39 p. + bibliographie et annexe. hal-01269290

HAL Id: hal-01269290

<https://hal.science/hal-01269290>

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.

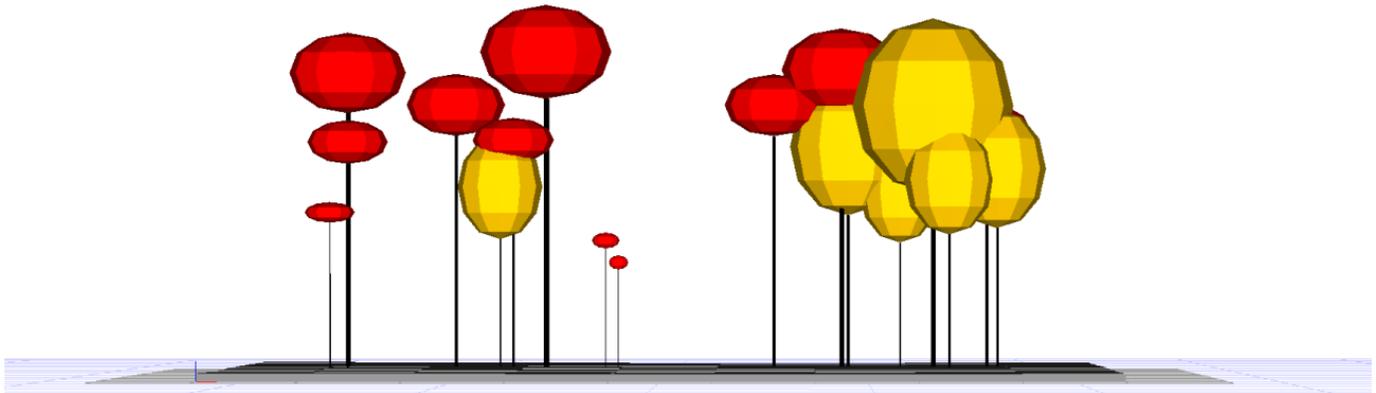


UNIVERSITE BLAISE PASCAL
CLERMONT II
UFR Sciences et Technologies

Master 2 professionnel Biologie et environnement
Spécialité : Génomique Ecophysiologie et Production Végétale

Soutenu le : 28 Septembre 2015
Par **Willem PALIE**

Modélisation du bilan hydrique en structure forestière irrégulière
à plusieurs strates – Application à la simulation de la dynamique
forestière





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 en eau en sous-bois un paramètre important dans la réussite de la régénération. Les scénarios de réchauffements climatiques prévoient une augmentation des épisodes de sécheresse en Europe. Dans ce contexte, le modèle RReShar (Regeneration and Resource Sharing) a été développé. Ce dernier est un modèle de régénération forestière et de partage des ressources. Il réalisait jusqu'à maintenant un bilan en eau succinct afin de pouvoir simulé la compétition des arbres adultes, de la régénération et de la végétation de sous-bois pour l'eau. L'objectif de ce stage a été de concevoir un modèle de bilan hydrique à partir de la littérature, de l'implémenter et de tester son fonctionnement.

L'interception de la pluie, simulée à l'aide du modèle de Merriam, simule les interceptions en fonction du taux de recouvrement de façon cohérente. Toutefois, les interceptions s'étendent sur l'ensemble de la parcelle.

L'évapotranspiration réelle est calculée à l'aide de la méthode de Turc. Le sol comporte sept réservoirs.

L'un des points à améliorer est de restituer la verticalité du processus d'interception. Il serait intéressant de confronter le modèle conçu a des données de terrain afin de pouvoir juger de l'importance des erreurs produites et d'identifier les processus à améliorer.

Mots clés : modélisation, dynamique forestière, forêt mixte, régénération, bilan hydrique, changement climatique

Sommaire

1. Introduction.....	1
1.1. Effet du changement climatique sur la forêt.....	1
1.1.1. Le changement climatique.....	1
1.1.2. Réduction de croissance et dépérissement des forêts.....	1
1.2. Difficultés de la gestion forestière et plus spécifiquement de la régénération naturelle	
2	
1.2.1. Evolution de la gestion des forêts vers la régénération naturelle.....	2
1.2.2. Difficultés rencontrées lors de la régénération naturelle.....	2
2. La modélisation	4
2.1. Définition.....	4
2.2. Evolution des échelles de modélisation des forêts	4
2.3. La modélisation du bilan hydrique	5
2.3.1. L'eau extractible.....	6
2.3.2. Les précipitations nettes, résultantes des pertes par interception.....	6
2.3.3. L'évapotranspiration	12
2.3.4. Le drainage et les remontés capillaires.....	14
3. Matériel : le modèle RReShar	14
3.1. Les objets simulés.....	14
3.2. La simulation du partage des ressources	15
3.3. Le pas de temps et l'évolution des objets	16
4. Méthode.....	17
4.1. Observation de l'évolution temporelle du teneur en eau suivant la profondeur de sol	
17	
4.2. Observation de l'influence d'un arbre adulte seul sur le SWC	17
4.3. Observation de l'influence d'un peuplement d'arbres adultes sur le SWC et sur la	
végétation de sous-bois	17
5. Implémentation et fonctionnement du modèle de partage de l'eau	18
5.1. Formalisme des processus implémentés.....	19
5.1.1. L'interception de la pluie	19
5.1.2. La croissance racinaire	28
5.2. Algorithme du modèle implémenté	28
5.2.1. La classe cellule : RRSCell	28
5.2.2. La classe principale : RRSModel	31

6.	Résultats - Discussion	31
6.1.	Test des fonctions implémentées	31
6.1.1.	Etude de la dynamique de remplissage et d'exploitation des différentes couches de sol à l'échelle journalière.....	31
6.1.2.	Variation spatiale du déficit en eau en présence d'un arbre adulte	32
6.2.	Effet de la variation de l'indice foliaire des arbres.....	32
6.2.1.	Effet sur l'interception de la pluie.....	32
6.2.2.	Effet sur l'ETR de la végétation interférente	33
7.	Discussion générale.....	33
7.1.	Le calcul de l'évapotranspiration	33
7.2.	L'évapotranspiration des végétaux simulés.....	34
7.3.	L'évapotranspiration en jour de pluie.....	34
7.4.	Les interceptions.....	34
7.4.1.	L'évapotranspiration de référence.....	34
7.4.2.	La capacité de stockage du couvert.....	35
7.5.	Le sol	35
7.6.	La répartition spatiale de la consommation de l'eau	36
	Conclusion – Perspectives.....	38
	Annexe	8

Figure 1 : Moyenne mondiale des concentrations de gaz à effet de serre (IPCC, 2014b)

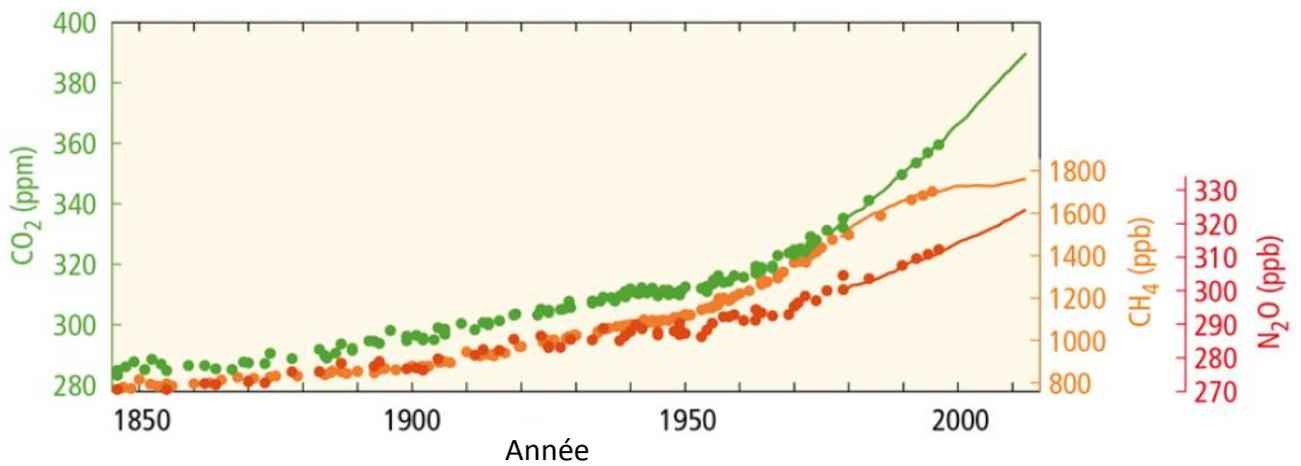
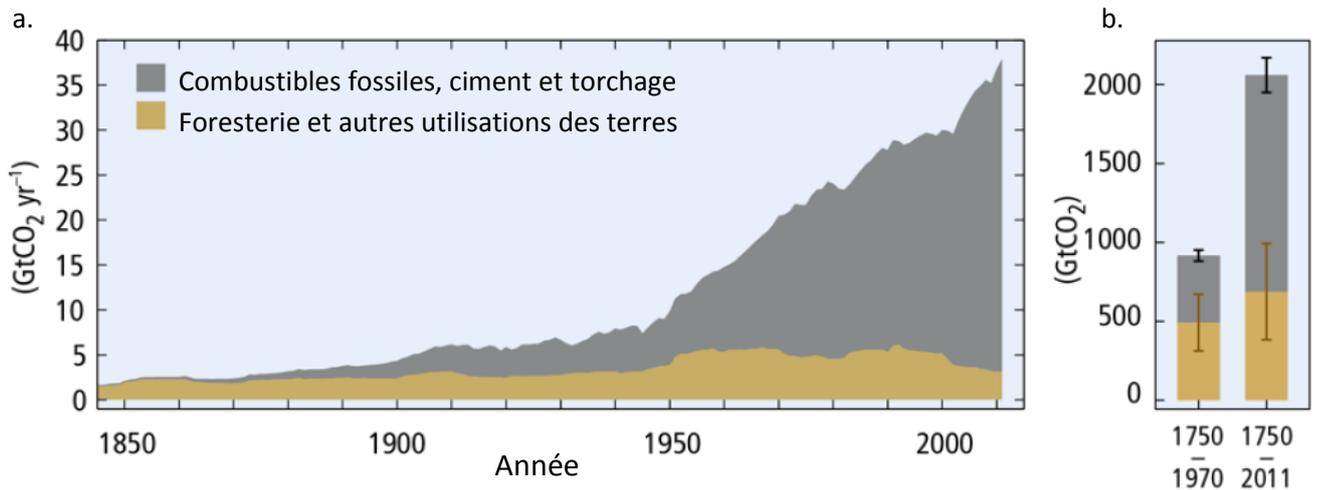


Figure 2 : Emissions mondiales de CO₂ d'origine anthropique (a) et émissions cumulées de CO₂ (b) (IPCC, 2014b)



1. Introduction

1.1. Effet du changement climatique sur la forêt

1.1.1. Le changement climatique

Le climat terrestre se réchauffe. Ce phénomène s'est particulièrement accentué sur la période 1983-2012, reconnue comme étant la période plus chaude qu'ait pu traverser l'hémisphère nord depuis 1850 (IPCC 2014b). En effet, de 1880 à 2012, une augmentation moyenne de 0,85°C a pu être mesurée sur l'ensemble du globe, terres émergées et océans compris. Les scénarios climatiques prévoient à l'horizon 2100 une augmentation comprise entre 0,3 et 4,8°C et une intensification des événements climatiques extrêmes tels que les périodes de sécheresse et les fortes précipitations (IPCC 2007; IPCC 2013).

Une corrélation importante a été observée entre le réchauffement climatique et les émissions anthropiques de CO₂, de CH₄ et de N₂O dans l'atmosphère (figure 1). Sur les 2040 ± 310 gigatonnes de CO₂ d'origine anthropique qui ont été émis sur la période 1750-2011, 50% ont été libérés dans l'atmosphère sur les 40 dernières années (figure 2). Seuls 30% ont été stockés dans les sols et les végétaux (IPCC 2014b).

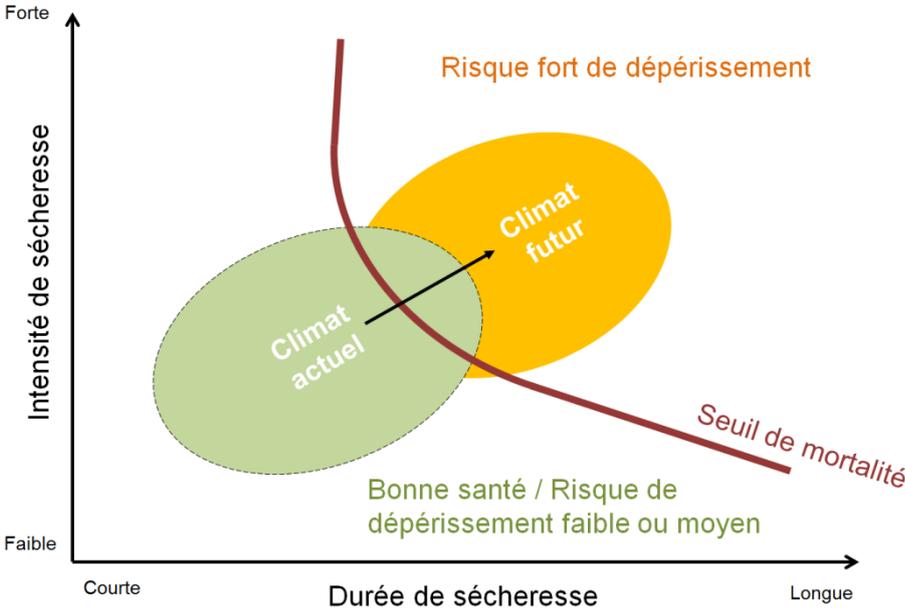
1.1.2. Réduction de croissance et dépérissement des forêts

Dans certaines régions, une amélioration de la croissance des espèces ligneuses a succédé à l'augmentation de la concentration atmosphérique de gaz issus des activités agricoles et de la combustion d'énergies fossiles. Des effets de fertilisation ont été observés notamment en raison des dépôts azotés plus importants et des plus fortes concentrations en CO₂ améliorant ainsi la photosynthèse et donc la production de biomasse (IPCC 2014a).

Toutefois, de nombreux sites montrent des effets non significatifs ou négatifs (pouvant se traduire par la mort de peuplements) au réchauffement climatique et à l'augmentation des émissions anthropiques. Des printemps plus chauds permettent un allongement de la période de croissance et une activité photosynthétique plus importante. Angert et al (2005) ont montré cependant que ce phénomène est annulé par des saisons chaudes plus sèches réduisant ainsi l'absorption nette d'été.

Un accroissement des dépérissements forestiers est également observé dans le monde (Allen et al. 2010). Certains auteurs supposent le dépassement progressif du seuil de tolérance aux

Figure 3 : 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)



stress des forêts (figure 3). Adams et al (2009) ont montré une survie réduite aux épisodes secs de jeunes pins soumis à des températures plus chaudes.

Les températures plus chaudes accroissent la respiration des arbres et donc la consommation des réserves carbonées. Lorsque survient une sécheresse, certaines espèces d'arbres ferment leurs stomates afin de limiter les pertes en eau. Durant cette période, la photosynthèse s'interrompt et est relayée par la respiration. Les réserves carbonées étant plus faibles, ils succombent d'une carence en carbone suite à des sécheresses plus courtes (Adams et al. 2009).

Lors d'une sécheresse, d'autres espèces d'arbres évitent de puiser dans leurs réserves de carbone et maintiennent leurs stomates ouverts. Cela a toutefois l'inconvénient de permettre des pertes accrues en eau. Elles entraînent une plus forte embolie du xylème pouvant alors conduire à la mort de l'arbre qui n'est plus correctement alimenté en eau (McDowell et al. 2008).

1.2. Difficultés de la gestion forestière et plus spécifiquement de la régénération naturelle

1.2.1. Evolution de la gestion des forêts vers la régénération naturelle

En forêt, la régénération représente le renouvellement du couvert par la production de nouveaux individus. Elle peut être artificielle (plantation de jeunes arbres) ou naturelle (renouvellement par semis). C'est une étape indispensable à la pérennité de la forêt qui peut durer plusieurs dizaines d'années. La régénération artificielle des peuplements a récemment évolué vers la régénération naturelle. L'évolution des pratiques des gestionnaires forestiers en ce sens est encouragée par la réglementation mise en place par la commission européenne (Conseil de l'Union Européenne 2014).

1.2.2. Difficultés rencontrées lors de la régénération naturelle

La régénération naturelle permet d'effectuer une économie sur l'achat des plants et favorise le développement d'un matériel bien adapté aux conditions climatiques (CRPF 2011). Elle nécessite toutefois un suivi de toutes les étapes de développement jusqu'à l'âge adulte. Le gestionnaire est soumis aux incertitudes relatives aux stades précoces du développement des plants. La production de graines peut être importante certaines années mais est suivie d'une forte fluctuation en matière de survie des plants. Une même cohorte de régénération décrit une

chute exponentielle décroissante du nombre de ses individus lors des premières années qui suivent le semis (Debain et al. 2007).

La bonne gestion de la végétation compétitrice du sous-bois est également impérative (CRPF 2011). La régénération d'individus requiert l'amélioration des entrées de lumière et d'eau dans le sous-bois et donc l'ouverture du couvert et donc l'amélioration des entrées de lumière et d'eau dans le sous-bois. Cet apport en ressources peut bénéficier à une végétation compétitrice qui, par sa forte compétitivité, accentue la mortalité des semis des espèces d'intérêt. Harmer *et al* (2005) ont montré une corrélation négative entre la présence d'un couvert de fougère ou de ronce et l'installation des semis de diverses espèces ligneuses.

Des quantités d'eau minimales sont également requises sur l'ensemble de l'année (CRPF 2011).

L'ensemble de ces conditions et la grande durée nécessaire à la régénération d'un individu se traduit par une grande variabilité en matière de réussite. A cela s'ajoute le réchauffement climatique dont l'impact futur sur la qualité de la régénération reste encore peu clair. Les scénarios climatiques prévoient une augmentation des épisodes secs en Europe. En période de sécheresse, une compétition inter- et intra-spécifique s'exerce entre individus d'âges et de tailles semblables ou différents. Les horizons superficiels prospectés par les jeunes individus sont rapidement asséchés (Zapater et al. 2008). Sous les fortes densités actuelles d'arbres adultes, le stress hydrique en sous-bois risque de s'accroître à mesure que le climat se réchauffe (Savage 1997). Un changement de la gestion des forêts est donc important pour assurer leur pérennité.

La réduction du nombre d'individus par unité de surface est une voie qui peut être explorée, selon l'hypothèse qu'une réduction du nombre d'arbre diminuerait la consommation globale en eau de l'écosystème. Cependant, cette diminution favorise en parallèle le développement de la végétation du sous-bois (cf. ci-dessus), de sorte que le solde, positif ou négatif, du bilan en eau à l'échelle de l'écosystème est difficile à prévoir. Le tester expérimentalement supposerait l'installation et le suivi de placettes de densités différentes. Ces expérimentations peuvent durer plusieurs dizaines d'années d'où l'intérêt d'utiliser l'outil de modélisation.

Durant ce stage mon objectif a été de concevoir un modèle de bilan hydrique à partir de la littérature et de l'implémenter dans le modèle RReShar (Regeneration and Resource

Sharing), un modèle de dynamique forestière incluant la régénération et le partage des ressources.

D'abord je ferai un état de l'art de la modélisation du bilan hydrique puis je présenterais le modèle RReShar, les choix que j'ai opérés dans la conception du modèle, des algorithmes et les résultats de fonctionnement du modèle implémenté et leur discussion.

2. La modélisation

2.1. Définition

Chaque discipline a sa propre définition de ce qu'est un modèle. Dans la recherche, un modèle scientifique est une représentation simplifiée d'un phénomène complexe. Il a pour fin la compréhension, l'analyse et la prédiction de l'état d'un objet. Seuls les phénomènes décrivant majoritairement l'évolution de l'objet d'étude et ses relations avec son environnement sont retenus. Le modèle est ensuite observé dans son comportement afin d'émettre des hypothèses sur la réalité (Schneider 1994).

Une fois conçu, le modèle passe par une étape de validation. Il est testé sur un jeu de données différent que celui qui a servi à sa conception. Cela peut être réalisé de façon empirique en lui soumettant des données vraies et en comparant l'évolution des données simulées avec la réalité ; ou de façon théorique en vérifiant la cohérence des résultats lorsque l'on fait varier les paramètres d'entrée (ex : température, rayonnement, etc.) aux limites de ce qui est réellement possible. Cela permet d'en déterminer les limites d'utilisation mais également d'en connaître les failles et le degré de confiance qui peut lui être accordé. Suivant l'évolution des connaissances, un même modèle peut subir plusieurs validations (Lett 1999).

2.2. Evolution des échelles de modélisation des forêts

A ses débuts, la modélisation forestière servait à la prévision de l'évolution des peuplements réguliers (c'est-à-dire monospécifiques et équiennes). Elle reposait notamment sur l'établissement de tables de production qui pouvaient donner des indications sur les volumes de bois, la qualité et même les gains qui pouvaient être attendus par le gestionnaire. Ces tables étaient construites par le suivi de terrain de caractéristiques dendrométriques de plusieurs placettes d'une même région climatique. Des productions moyennes étaient définies. Chaque table était spécifique de l'espèce, de la zone géographique et de la classe de fertilité. Cette

dernière était déterminée à partir de la hauteur moyenne ou dominante du peuplement pour un âge donné. La croissance en taille est relativement la même d'une zone climatique à une autre contrairement à la croissance en diamètre. Dans une zone trop éloignée de la zone de référence, les valeurs de volume s'éloignent des valeurs de la table d'où l'importance de créer une nouvelle table pour une condition trop dissimilaire (Decourt 1964).

Ces tables de production empiriques sont incapables de répondre aux problématiques actuelles telles que l'effet du changement climatique sur la croissance des peuplements forestiers. Elles n'identifient ni les paramètres climatiques influençant l'évolution des peuplements ni leurs poids dans ce phénomène. Les tables présentement établies pour certaines zones requièrent une actualisation permanente.

De plus, les peuplements irréguliers ne peuvent pas être étudiés par cette méthode de prévision en raison de la complexité des interactions qui existent entre espèces mais également entre individus de taille et d'âge différents.

La modélisation a donc ensuite évolué par l'intégration des relations de compétition. Les modèles ont tendu vers des échelles de simulation de plus en plus fines. Plusieurs types de modèles existent et sont généralement classés selon leur niveau de description du peuplement forestier. Parmi eux se comptent (Picard 1999; Picard 2007) :

- Les modèles de peuplement dont le fonctionnement repose sur le suivi de l'évolution d'un arbre moyen et de sa variance. Ils ne peuvent être utilisés que dans le cas de peuplements homogènes.
- Les modèles de distribution qui subdivisent la forêt en classes de distribution d'un caractère.
- Les modèles individu-centrés pour lesquels chaque individu est suivi individuellement. Des phénomènes locaux peuvent alors être étudiés tels que ceux relatifs à l'évolution d'une trouée.

Le choix de l'échelle de simulation est une étape importante et doit être fonction de la problématique posée (Goreaud et al. 2005). Pour les échelles de simulation fine, la collecte des données d'entrée est plus laborieuse et le temps de calcul est plus long. La détection d'erreurs éventuelles est également plus difficile.

2.3. La modélisation du bilan hydrique

La consommation en eau des végétaux est indispensable à leur croissance. C'est aussi par ce moyen qu'ils parviennent à réguler leur température (transpiration) et à prélever dans le sol les nutriments qui leur sont nécessaires. Les racines et les feuilles sont reliées par le xylème. La transpiration au niveau des feuilles met en tension l'eau présente dans le xylème et fournit ainsi l'énergie nécessaire à la succion racinaire. Le suivi de la consommation en eau est donc une partie clé de la modélisation de l'évolution des végétaux.

Le bilan hydrique est réalisé dans de nombreux modèles et il repose sur la résolution d'une équation de conservation de la masse. Elle peut s'écrire comme suit (Choisnel 1992) :

$$R_{(t+1)} = R_{(t)} + P_{sol} + Rem - ETR - Dr \quad (1)$$

Avec R la quantité d'eau du réservoir du sol extractible par le végétal, P_{sol} la pluie parvenant au sol (ou précipitations nettes), Rem les remontées capillaires, ETR l'évapotranspiration réelle et Dr le drainage.

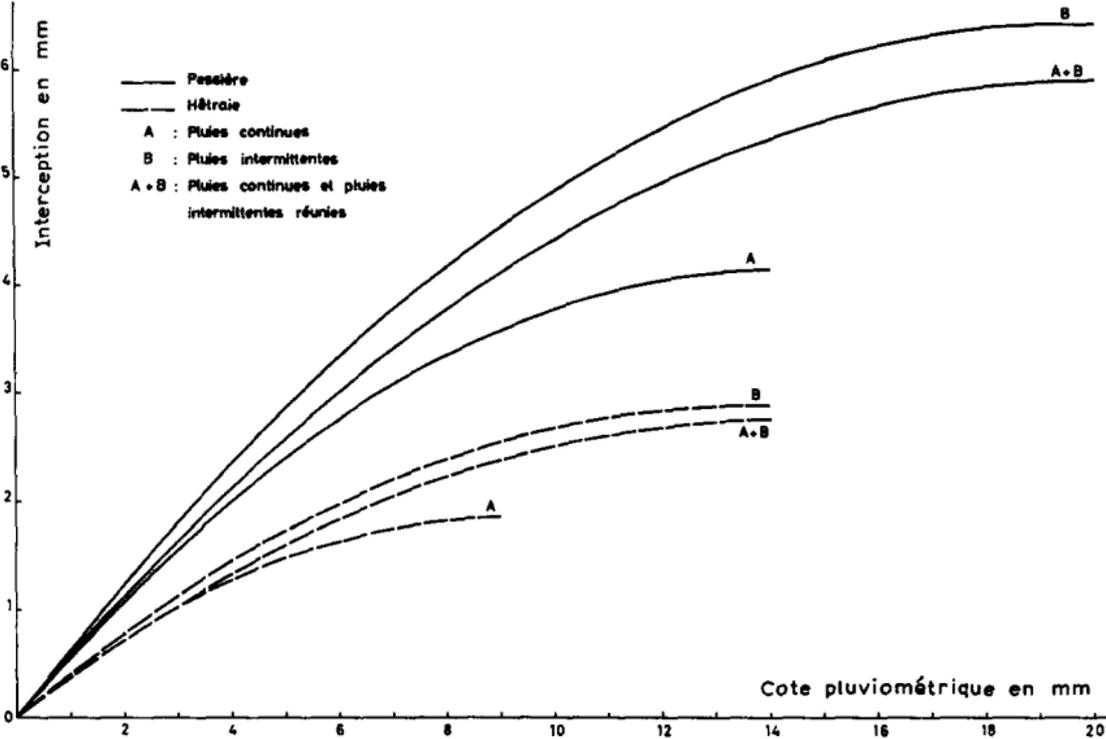
2.3.1. L'eau extractible

Seule une partie de l'eau présente dans le sol est utilisable par les végétaux. Au-delà d'un certain seuil, la tension nécessaire à l'extraction de l'eau du sol est supérieure à ce que les végétaux peuvent mettre en œuvre. La proportion d'eau que les végétaux parviennent à absorber est aussi appelée réserve utile (RU). C'est un volume compris entre la capacité au champ (quantité d'eau que le sol peut retenir après ressuyage) et le point de flétrissement permanent (quantité d'eau que le végétal ne peut extraire) (Inra 2015a).

La RU varie en fonction de la texture, de la teneur en éléments grossiers et de la profondeur du sol. La texture d'un sol (c'est-à-dire la proportion en argile, sable et limon) est le paramètre qui renseigne le plus sur la RU. Les sols présentant un pourcentage élevé de particules fines (ex : argile) ont une capacité de rétention plus importante que les sols majoritairement constitués de particules de plus grande taille (ex : sable). Leur capacité au champ et leur point de flétrissement permanent sont plus élevés. La teneur en éléments grossiers permet également de déterminer les quantités d'eau que peut retenir un sol. Par exemple, les silex et les calcaires peuvent retenir respectivement 2 et 30% d'eau (Inra 2015b).

2.3.2. Les précipitations nettes, résultantes des pertes par interception

Figure 4 : Influence de l'importance et du caractère intermittent ou continu de la pluie sur les interceptions (Bultot.al_1972)



En forêt, une partie de la pluie incidente (P) ne parvient pas au sol. En début d'averse, une grande partie de l'eau est retenue par les parties sèches du végétal. Si les précipitations se poursuivent, l'eau sature la canopée et arrive au sol soit par égouttement soit en s'écoulant le long du tronc. L'eau restant sur le végétal est perdue par évaporation (pertes par interception In). La pluie qui arrive directement ou indirectement au sol (Tf) et l'eau qui s'écoule le long du tronc (Sf) constitue les précipitations nettes (Rutter et al. 1971). Les pertes par interception s'effectuent donc selon la relation :

$$In = P - (Sf + Tf) \quad (2)$$

Les pluies parvenant au sol peuvent être fortement réduites par ce phénomène. Les pertes par interception peuvent représenter 25 à 45% des précipitations annuelles en peuplement de résineux et 15 à 30% en peuplement de feuillus (Aussenac 1981). Elles ont donc une influence importante sur les ressources hydriques du sous-bois.

2.3.2.1. Les facteurs de variations

L'importance des interceptions varient en fonction des caractéristiques des pluies, du pouvoir évaporant de l'air et de la structure du couvert.

Plus les pluies sont importantes plus la proportion d'eau retenue par le couvert est faible. Lors de pluies fortes et/ou continues, l'eau qui parvient au couvert n'a pas le temps de s'évaporer et une grande partie de la pluie arrive au sol par égouttement. Pour des événements pluvieux faibles et/ou intermittents, les surfaces sèches sont rapidement renouvelées par évaporation. A volume égal, les pertes par interception sont donc plus importantes dans le dernier cas que dans le premier (figure 4).

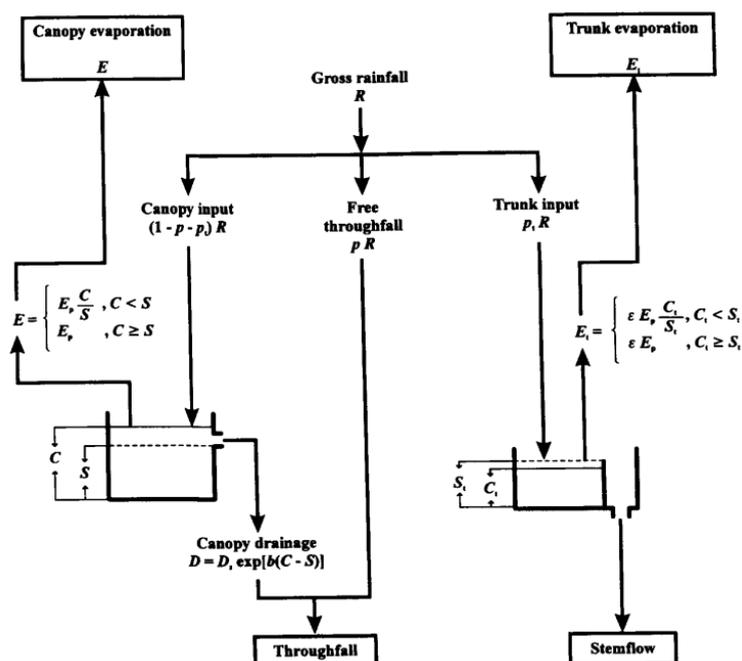
L'importance des pertes par interception dépend également du pouvoir évaporant de l'air. Ce dernier augmente avec le rayonnement intercepté, la température, la vitesse du vent et la réduction de l'humidité relative. Il a été observé en forêt que l'ouverture du couvert diminue les surfaces végétales susceptibles de retenir la pluie par unité de surface de sol mais améliore l'évaporation de l'eau. La turbulence du vent augmente au sein du couvert, ce qui accroît le renouvellement de l'air saturé de la couche limite du couvert (Aussenac 1981).

Des pertes différentes sont observées suivant la nature de la végétation. Selon une analyse bibliographique réalisée par Barbier et al (2009), les conifères à feuillage persistant perdent plus d'eau par interception que les feuillus à feuillage caduque. Les pertes observées sont

	Variables	Modèle de Rutter (1971)	Modèle de Gash (1979)
Paramètres de structure de la canopée	S	o	o
	S_t	o	o
	p	o	o
	p_t	o	o
	D_s	o	o
	b	o	o
	e	o	o
Données météorologiques	E_p	o	
	R	o	
	\bar{E} / \bar{R}		o
	P		o

Tableau 1 : Comparaison des paramètres nécessaires au modèle de Rutter de 1971 et au modèle de Gash de 1979. S la capacité de stockage de la canopée (mm), S_t la capacité de stockage du tronc (mm), p la proportion de pluie qui traverse la canopée sans la toucher (entre 0 et 1), p_t la proportion de pluie incidente redirigée en écoulement de tronc (entre 0 et 1), D_s est le taux d'égouttement quand C (volume de pluie touchant la canopée) et S sont égaux (mm.h^{-1}), b une valeur empirique, e une constante relative au taux d'évaporation d'un tronc saturé en eau, E_p le taux d'évaporation potentiel (mm.h^{-1}), R l'intensité des pluies (mm.h^{-1}), \bar{E} le taux d'évaporation moyen sur la période de simulation (mm.h^{-1}), \bar{R} l'intensité moyenne des pluies (mm.h^{-1}) et P la pluie incidente (mm) (d'après Liu_2001).

Figure 5 : Schéma de fonctionnement du modèle de Rutter de 1971 (Valente_1997). S la capacité de stockage de la canopée (mm), S_t la capacité de stockage du tronc (mm), C_t le volume de pluie parvenant au tronc (mm), p la proportion de pluie qui traverse la canopée sans la toucher (entre 0 et 1), p_t la proportion de pluie incidente redirigée en écoulement de tronc (entre 0 et 1), D_s est le taux d'égouttement quand C (volume de pluie touchant la canopée) et S sont égaux (mm.h^{-1}), b une valeur empirique, e une constante relative au taux d'évaporation d'un tronc saturé en eau, E_p le taux d'évaporation potentiel (mm.h^{-1}), R l'intensité des pluies (mm.h^{-1}).



respectivement de 30% et de 20%. Cette différence est due à leur physiologie respective. Les feuillus ont un indice foliaire (LAI) plus faible que les conifères. De plus, les arbres caducifoliés ne présentent aucune feuille durant toute une période de l'année. Les précipitations nettes annuelles sont alors bien plus importantes dans ces peuplements.

2.3.2.2. La modélisation

Depuis 1919, de nombreux modèles d'interception ont été développés (Muzylo et al. 2009). La plupart d'entre eux est issue des modèles de Rutter et al. (1971) et de Gash (1979). Ces deux modèles physiques sont reconnus pour leur robustesse (Muzylo et al. 2009). Ils mettent en évidence l'influence qu'exercent le climat et la structure du végétal sur les pertes. Toutefois, ils ne pouvaient être appliqués qu'en couvert continu. Ils ont par la suite été adaptés. Le modèle de Rutter et celui de Gash ont été améliorés suite aux travaux de Valente et al (1997) et de Gash et al (1995) par l'intégration du taux de recouvrement.

Les modèles de Rutter et al. (1971) et de Gash (1979) présentent des différences en matière de calcul et de paramètres d'entrée (tableau 1).

Le modèle de Rutter (1971) est un modèle continu qui repose sur le calcul de l'évolution du volume d'eau retenue par la canopée d'un instant t à un instant $t+1$ (Gash and Morton 1978; Liu 2001; Rutter et al. 1971). Le calcul de ce volume pour le houppier est réalisé par les formules suivantes (figure 5) :

$$\text{Pour } C \geq S \quad \Delta C = (1 - p - p_t) \sum R - \sum D - \sum E_p \quad (3)$$

$$\text{Pour } C < S \quad \Delta C = (1 - p - p_t) \sum R - \sum D - \sum E_p \frac{C}{S} \quad (4)$$

$$D = D_s \exp[b(C - S)] \quad (5)$$

Avec C le volume de pluie touchant la canopée (mm), S la capacité de stockage de la canopée, c'est-à-dire, la quantité d'eau qui est évaporée de la canopée après que la pluie et l'égouttement aient cessé (mm), R l'intensité des pluies (mm.h^{-1}), D le taux d'égouttement (mm.h^{-1}), E_p le taux d'évaporation potentiel (mm.h^{-1}), p la proportion de pluie qui traverse la

canopée sans la toucher (entre 0 et 1) et p_t la proportion de pluie incidente redirigée en écoulement de tronc (entre 0 et 1). D_s est le taux d'égouttement quand C et S sont égaux (mm.h^{-1}) et b est une valeur empirique.

L'évaporation de l'eau du tronc est également calculée :

$$\text{Pour } C_t \geq S_t \quad \Delta C_t = p_t \sum R - \sum eE_p \quad (6)$$

$$\text{Pour } C_t < S_t \quad \Delta C_t = p_t \sum R - \sum eE_p \frac{C_t}{S_t} \quad (7)$$

Avec C_t le volume de pluie parvenant au tronc (mm), S_t la capacité du tronc (mm) et e une constante relative au taux d'évaporation d'un tronc saturé en eau.

Quand C_t est supérieur ou égal à S_t le flux de tige est égal à la différence de ces deux grandeurs. Sinon, il est égal à zéro.

Gash (1979) est le premier à donner une solution simplifiée au modèle de Rutter. Ainsi, il émet l'hypothèse que la canopée aurait le temps de sécher entièrement d'un évènement pluvieux à un autre (Muzylo et al. 2009). De plus, il s'attache à l'estimation journalière des interceptions sans pour autant calculer l'égouttement.

$$\text{Valeur seuil de saturation du couvert en eau (mm)} \quad P'_G = -\frac{\bar{R}S}{\bar{E}} \ln \left[1 - \frac{\bar{E}}{R(1-p-p_t)} \right] \quad (8)$$

$$\text{Pertes pour } m \text{ évènements pluvieux trop faible pour saturer le couvert} \quad (1-p-p_t) \sum_{j=1}^m P \quad (9)$$

$$\text{Pertes pour } n \text{ évènements } > P'_G \text{ saturant le couvert} \quad n(1-p-p_t)P'_G - nS \quad (10)$$

Evaporation de l'eau d'un couvert saturé
du début jusqu'à l'arrêt des pluies

$$\left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}}\right) \sum_{j=1}^n (P - P'_G) \quad (11)$$

Evaporation après l'arrêt des pluies

$$nS \quad (12)$$

Evaporation de l'eau des troncs, pour q
événements $> S_t/p_t$, qui saturent les troncs
et $n+m-q$ qui ne les saturent pas

$$qS_t + p_t \sum_{j=1}^{m+n-q} P \quad (13)$$

Avec P la pluie incidente (mm), \bar{E} le taux d'évaporation moyen sur la période de simulation (mm.h^{-1}) et \bar{R} l'intensité moyenne des pluies (mm.h^{-1}).

Lors d'un évènement pluvieux important, c'est-à-dire suffisant pour saturer le couvert, le modèle distingue trois phases : une phase de mouillage de la canopée (10), une phase de saturation (11) et une phase de séchage suite à l'arrêt de la pluie (12) (Gash 1979). Lorsque les pluies sont faibles, l'ensemble de l'eau présente sur le couvert est perdu par évaporation (9). La valeur P'_G de saturation du couvert marque le point d'inflexion entre ces deux régimes de pertes. Les paramètres \bar{E} / \bar{R} et S sont d'une grande importance car ils permettent de définir P'_G mais également l'évaporation de la pluie lors de fortes intempéries. Leur bonne estimation est nécessaire à une simulation correcte des interceptions.

2.3.2.2.1. L'estimation de \bar{E} et de S

Dans les deux modèles, l'évaporation est couramment calculée à partir de l'équation de Penman-Monteith (Monteith 1965). Cette dernière est en fait l'évapotranspiration sans la prise en compte de la résistance du couvert (c'est-à-dire la résistance stomatique). Dans le modèle de Gash, \bar{E} correspond à la moyenne des taux d'évaporation calculés sur la période de simulation. Toutefois, cette valeur est celle d'un couvert continu saturé en eau. Gash (1979) n'a donc considéré, dans le calcul de \bar{E} , que les jours où l'intensité des pluies est supérieure ou égale à $0,5 \text{ mm.h}^{-1}$.

La capacité de stockage de la canopée peut être estimée de diverses manières. Elle peut être déterminée graphiquement à partir du nuage de points représentant la pluie incidente en fonction de T_f (Gash and Morton 1978). La droite supérieure de la courbe enveloppe de ces

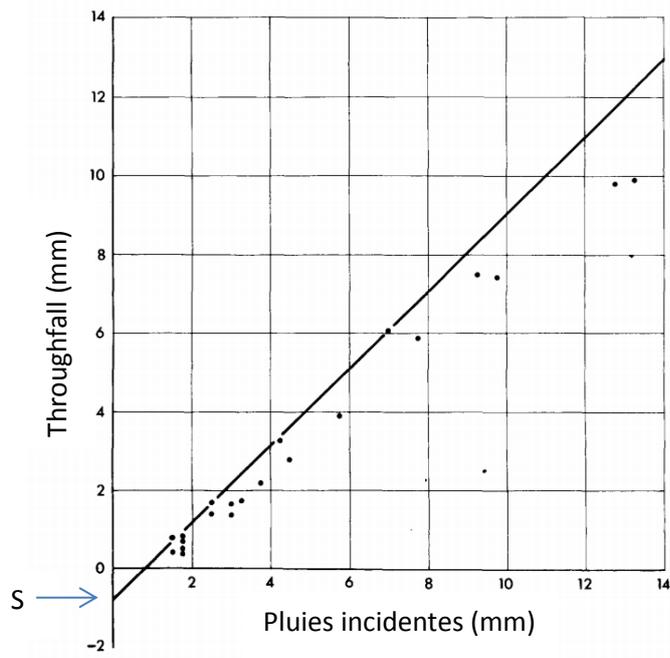


Figure 6 : Exemple de détermination graphique de la capacité de stockage du couvert à partir des pluies qui parviennent à traverser la canopée de façon directe ou indirecte (Throughfall) (Gash and Morton 1978)

points est tracée. L'ordonnée à l'origine de cette droite représente la capacité de stockage de la canopée (figure 6). La capacité de stockage peut également être estimée de façon directe par mouillage artificiel des parties végétales. La capacité de stockage est alors obtenue par pesée.

La méthode indirecte présente toutefois quelques inconvénients (Llorens and Gallart 2000). Elle nécessite un long suivi de l'évolution du Tf et des pluies. De plus, le S obtenu graphiquement est une valeur propre à la zone de mesure et est souvent jugé trop faible par rapport au S mesuré directement. Dans la littérature, le premier est appelé capacité de stockage minimale (S_{\min}) et le second, capacité de stockage maximale (S_{\max}).

Le S_{\min} est utilisé dans les deux modèles. Toutefois, certains modèles requièrent le S_{\max} (Lankreijer et al. 1999).

2.3.2.2.2. L'adaptation des modèles de Rutter et de Gash aux couverts discontinus

De bons résultats étaient obtenus avec les modèles de Rutter et de Gash. Toutefois, ils étaient moins efficaces pour des peuplements présentant des espaces importants entre les canopées des arbres (Muzylo et al. 2009). Ces deux modèles ont alors subi quelques améliorations. Pour cela, le taux de recouvrement (c) a été appliqué dans les deux modèles à de nombreux paramètres. Par exemple pour S, cette adaptation a été réalisée selon la formule suivante :

$$S_c = S/c \quad (1)$$

Avec S_c la capacité de stockage du couvert par unité de recouvrement (mm).

Dans le modèle de Rutter, cette transformation a été appliquée à S, S_t , C, C_t , D et E_p (Valente et al. 1997), alors que dans le modèle de Gash elle a été appliquée à S et à \bar{E} (Gash et al. 1995). De plus, dans les nouvelles versions des deux modèles, la part de pluie qui parvient au couvert est déterminée grâce au taux de recouvrement. Ainsi, le terme $(1 - p - p_t)$ a totalement été éliminé du modèle au profit de c.

Dans le calcul des pertes par interception, l'évaporation potentielle E_p a été partagée entre la canopée et le tronc au travers du coefficient e. Le terme $(1 - e)$ a été appliqué à l' E_p de la canopée tout comme e l'était pour le tronc dans le modèle original. Le surplus d'eau de la canopée est divisé en égouttement et en écoulement de tronc ce qui rapproche davantage le modèle des processus réels d'interception.

2.3.3. L'évapotranspiration

L'évapotranspiration (ET) intègre à la fois les processus d'évaporation et de transpiration (Allen et al. 1998).

L'évaporation représente le passage de l'eau liquide à l'état de vapeur d'eau ainsi que la perte de cette vapeur par les surfaces évaporantes. Elle peut s'appliquer à l'ensemble de l'eau libre présente à la surface du sol et à la surface des organes du végétal. L'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau est fournie par la température de l'air et, dans une plus grande proportion, par le rayonnement solaire parvenant à la surface considérée. La perte d'eau en provenance de la surface est conditionnée par la différence de pression de vapeur d'eau entre l'air au contact de la surface et l'atmosphère. L'air saturé est ensuite renouvelé à une vitesse dépendant de la vitesse du vent.

La transpiration constitue à la fois la perte de l'eau liquide que contient le végétal par vaporisation et le renouvellement de l'air saturé. Elle dépend donc, tout comme l'évaporation, du rayonnement, de la température de l'air, de l'humidité de l'air et de la vitesse du vent. Elle se produit principalement au niveau des stomates et est régulée plus ou moins fortement suivant leurs degrés d'ouverture. Le niveau de transpiration est également déterminé par les propriétés et le contenu en eau du sol, l'espèce et son stade de développement.

Sur les sols qui présentent une couverture végétale ces deux processus sont antagonistes. En sol nu, l'évaporation du sol constitue la totalité de l'ET. Lorsque les végétaux se développent, ils génèrent de l'ombre sur le sol et en réduisent l'évaporation. En contrepartie, le couvert transpire suivant sa surface foliaire. La transpiration représente donc une part plus importante dans l'ET à mesure que le couvert gagne en volume.

2.3.3.1. Le calcul de l'évapotranspiration de référence (ET_0)

L'évapotranspiration réelle (ETR) d'un végétal est obtenue suite au calcul de l'évapotranspiration de référence (ET_0) et de l'évapotranspiration potentielle (ETP). L' ET_0 correspond aux quantités d'eau perdues par un couvert de référence. Celui-ci est généralement un gazon de hauteur, de résistance de surface et d'albédo déterminés, correctement irrigué et présentant un taux de recouvrement du sol maximal (Allen et al. 1998).

De nombreuses méthodes de détermination de l' ET_0 ont été développées. Seules quelques-unes seront présentées ici, du niveau de complexité le plus élevé au moins élevé.

	Equations
Penman-Monteith	$\lambda ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})}$
FAO-56 Penman-Monteith	$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$
ThornWeith	$ET_0 = \frac{16N}{360} \left(\frac{10T}{\sum_{k=1}^{12} (0,2T_k)^{1,514}} \right)^{0,016 \sum_{k=1}^{12} (0,2T_k)^{1,514} + 0,5}$
Turc	$ET_0 = 0,013 \times (23,88Rn + 50) \times \left(\frac{T}{T + 15} \right) \times \alpha$

Tableau 2 : Comparaison des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration de référence. Avec ET_0 : l'évapotranspiration de référence (mm.j^{-1}), R_n : la radiation parvenant à la culture ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$), G : le flux de chaleur dans le sol ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$), T : la température moyenne journalière de l'air ($^{\circ}\text{C}$), u_2 : la vitesse du vent à 2m de hauteur (m.s^{-1}), e_s : la pression de vapeur saturante (kPa), e_a : la pression de vapeur réelle (kPa), Δ : la pente de la courbe de la pression de vapeur saturante à une température de l'air donnée ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ : la constante psychrométrique ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$), résistances aérodynamiques, r_a : la résistance aérodynamique (s.m^{-1}), r_s : la résistance stomatique (s.m^{-1}), k : le mois (entre 1 et 12) (Allen et al. 1998 ; Trajkovic and Kolakovic 2009)

L'ET₀ peut être obtenue par la méthode de Penman-Monteith (Allen et al. 1998). Elle représente la résolution d'un bilan d'énergie et prend en compte la résistance aérodynamique et la résistance du couvert au transfert de l'eau (tableau 2). Cette méthode produit une bonne estimation de l'évapotranspiration mais peut être jugée trop exigeante en matière de données d'entrée, notamment pour le calcul des résistances.

Face à ce problème, la méthode de calcul de l'ET₀ FAO-56 Penman-Monteith a été développée (tableau 2). Elle utilise un certain nombre de constantes relatives à un couvert hypothétique qui présente une hauteur « de 12 cm, une résistance de surface de 70 s.m⁻¹ et un albédo de 0,23 » (Allen et al. 1998). Cette méthode est d'une grande robustesse et est considérée comme la méthode de référence notamment dans l'évaluation d'autres méthodes d'estimation de l'ET₀ (Alexandris et al. 2008; Trajkovic and Kolakovic 2009).

La méthode de Turc est celle qui montre le meilleur rapport entre efficacité d'estimation de l'ET₀ et simplicité d'obtention des différentes variables. Elle ne requiert que le rayonnement et la température (tableau 2). Une correction est apportée, lorsque l'humidité relative est inférieure à 50% (Alexandris et al. 2008).

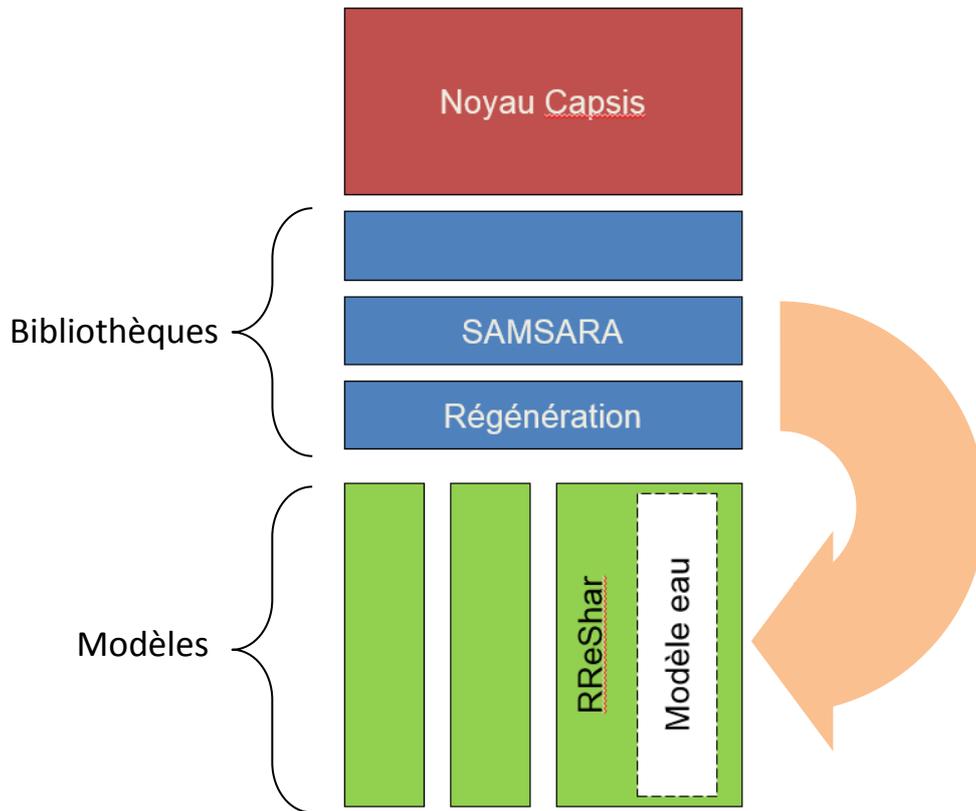
Une méthode se démarque par son niveau de simplicité : la méthode de Thornthwaite (tableau 2). Elle fait intervenir uniquement la température journalière et un indice thermique (cet indice a été intégré afin de reproduire l'effet du rayonnement solaire sur la variation de l'ET) (Trajkovic and Kolakovic 2009). Cependant, cette méthode sous-estime l'ET₀ de façon assez importante probablement du fait de l'absence de prise en compte du rayonnement qui est un paramètre important dans le phénomène d'ET (Allen et al. 1998).

2.3.3.2. L'obtention de l'évapotranspiration réelle (ETR)

L'ETP correspond à l'ET d'un couvert d'une zone donnée dans des conditions indemnes de limitation en eau. Elle peut être déterminée à partir de l'ET₀ d'un couvert sous réserve d'en connaître le coefficient cultural (kc). Ce dernier rend compte des caractéristiques et du stade de développement du couvert mais également de l'évolution saisonnière de l'évaporation de l'eau du sol (Allen et al. 1998). Il est propre à chaque couvert et est déterminé préalablement par le quotient entre l'ETP et l'ET₀.

Le produit de l'ETP et du coefficient de stress hydrique du milieu donne l'ETR du couvert.

Figure 7 : 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 (d'après Donès et al, s. d.).



2.3.4. Le drainage et les remontés capillaires

Ces deux phénomènes sont antagonistes. Leur modélisation est d'une complexité importante, en particulier pour les remontées capillaires. A ce stade de développement et compte tenu du temps disponible cette partie ne sera pas abordée.

3. Matériel : le modèle RReShar

RReShar est un modèle de dynamique forestière prenant en compte la régénération et le partage des ressources. Il a été développé sur la plateforme de modélisation Capsis (<http://capsis.cirad.fr/capsis/presentation>).

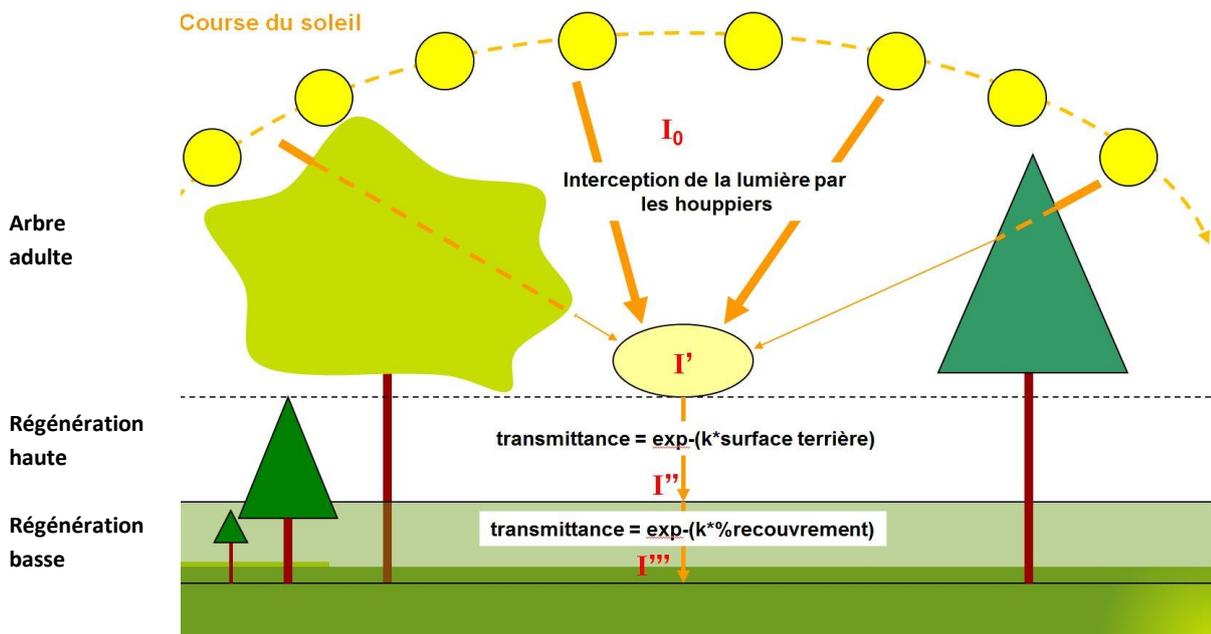
Cette dernière est dédiée au partage des avancées en matière de simulation de la dynamique forestière. A travers Capsis, les modélisateurs forestiers ont la possibilité d'implémenter divers types de modèle, d'exécuter les simulations et de comparer différents scénarios de gestion. Ils peuvent mettre en commun leurs modèles et les mettre à contribution pour de nouveaux projets (Goreaud et al. 2005).

Le modèle RReShar a été développé afin de répondre aux interrogations que soulève l'impact du changement climatique sur l'évolution des pratiques sylvicoles. Il considère la dynamique de la forêt (et plus particulièrement de la régénération) en réponse au climat (eau et lumière), à la modification de la structure de la canopée (ex : formation de trouée) et aux interactions avec une végétation interférente. Il repose sur le noyau de Capsis pour la création de la scène simulée, des arbres, et diverses méthodes de représentations et d'évolution des objets, sur des bibliothèques publiques (c'est-à-dire des modèles en libres accès pour les utilisateurs moyennant l'acceptation d'une charte d'utilisation) pour la modélisation de certains processus tels que le partage de la lumière et de la régénération et sur du code propre pour, entre autres, le partage de l'eau (figure 7). Le modèle RReShar intègre les arbres adultes, la régénération et la végétation interférente sur une petite placette de plusieurs dizaines de mètres carrés divisée en cellules. La majorité des équations qui ont été implémentées jusqu'à maintenant dans ce modèle sont issues des travaux de Gaudio (2010).

3.1. Les objets simulés

RReShar est un modèle, individu-centré spatialisé c'est-à-dire que chaque arbre est disposé dans un plan suivant ses coordonnées x et y (Gaudio 2010) et prenant en compte différentes espèces. Les arbres sont constitués d'un tronc et d'un houppier. Le houppier est un ellipsoïde

Figure 8 : Illustration du processus d'interception de la lumière, notamment par le modèle SAMSARA (d'après Gaudio, 2010)



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

plus ou moins poreux afin de rendre compte de la densité de branches et de feuilles qui le compose. La porosité est propre à chaque espèce. La croissance des arbres adultes est actuellement implémentée sous la forme d'une fonction empirique dépendante d'un indice de compétition (Bieng et al. 2013; Ngo Bieng et al. 2013; Pérot et al. 2010). Ce modèle a la capacité de simuler la dynamique d'un peuplement hétérogène, et de s'intéresser plus particulièrement à la régénération des espèces adultes. Les équations actuellement implémentées dans RReShar sont celles du chêne sessile et du pin sylvestre.

Les arbres d'une hauteur inférieure à 6m sont considérés comme de la régénération. La régénération est non spatialisée et est définie à l'échelle de la cellule. Elle est organisée en classe de cohorte c'est-à-dire en ensemble d'individus de même âge et de même diamètre. Sa croissance est dépendante de la lumière disponible et de la teneur en eau du sol.

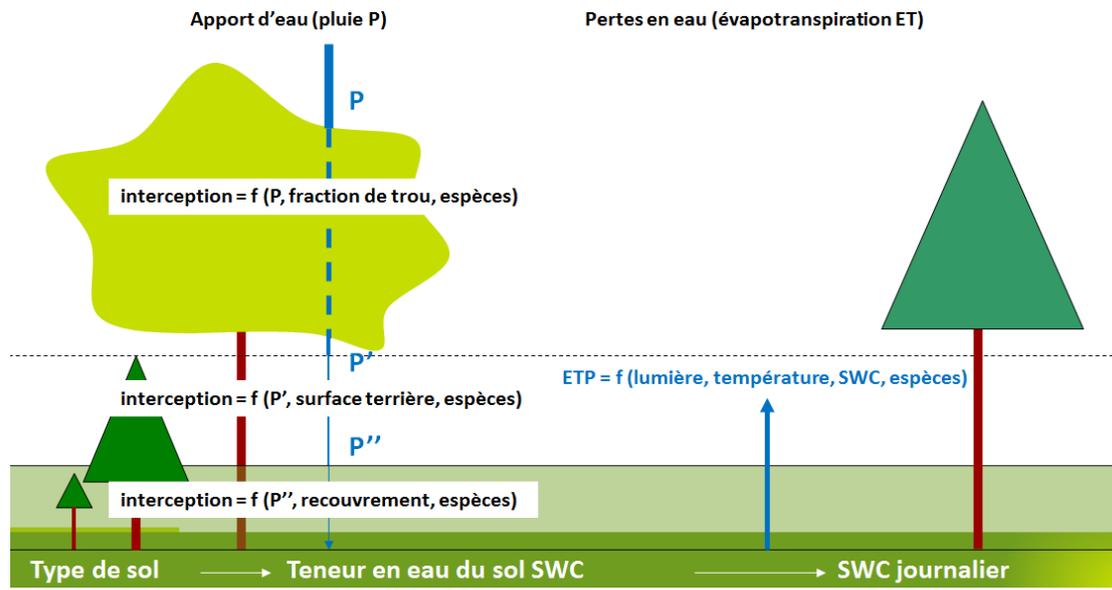
La végétation interférente est définie à l'échelle de la cellule par une couche plus ou moins poreuse suivant l'espèce représentée, sa hauteur et son taux de recouvrement (pourcentage de sol couvert par la projection verticale du feuillage). Sa croissance est dépendante de la lumière disponible et de la teneur en eau du sol. Les équations implémentées dans le modèle sont celles de la callune (*Calluna vulgaris*), de la molinie (*Molinia caerulea*) et de la fougère aigle (*Pteridium aquilinum*) (http://capsis.cirad.fr/capsis/help_en/rreshar).

Pour gérer les effets de bordure, chaque placette est considérée comme adjacente à elle-même (Annexe 1). Les individus de chaque bord sont voisins de ceux du bord qui leurs sont opposés. Ce système s'appelle un effet de tore et permet de rendre compte du fait que la placette simulée constitue une part d'un ensemble plus grand de caractéristiques proches. Il apporte notamment une solution à l'absence d'ombrage en bordure de placette.

3.2. La simulation du partage des ressources

L'interception de la lumière par les différentes composantes végétales se fait sur la base de la loi de Beer- Lambert (figure 8). Elle traduit l'atténuation d'un rayon lumineux dans un milieu turbide suivant une fonction exponentielle négative. Dans le modèle RReShar, la végétation est considérée comme un milieu dont la turbidité est modulée par le volume de feuilles qu'il contient. Le partage de la lumière se fait grâce à la bibliothèque publique SAMSARALIGHT (Courbaud 1995) disponible sur la plateforme Capsis. Ce modèle envoie un nombre de rayons défini suivant toutes les positions possibles du soleil au cours de la période de croissance. Les rayonnements diffus et direct sont pris en compte (Gaudio 2010). Tous les rayons sont

Figure 9 : Illustration de la distribution de l'eau entre les différentes strates par le modèle d'eau
 (d'après Gaudio, 2010)



P: pluie, SWC: Soil Water Content, ETR: évapotranspiration réelle

envoyés au centre d'une cellule et ne traversent que les houppiers des arbres adultes. La lumière restant suite à la traversée des houppiers est interceptée par la régénération en fonction de sa surface terrière et par la végétation interférente en fonction de son taux de recouvrement. Cette opération est répétée pour l'ensemble des cellules de la placette.

Avant ce stage, l'eau de la pluie est considérée comme étant interceptée par les différentes composantes des étages du peuplement d'une façon similaire à l'éclairement. L'interception par les arbres adultes se fait à partir du taux de couverture, et donc de la fraction de trous que présente la canopée. Cette information est obtenue par la relation mathématique qui existe entre le pourcentage de trous et la valeur de transmittance (valeur fourni par le modèle de lumière SAMSARALIGHT). A taux de couverture constant, les pertes par interception sont proportionnelles à l'importance des pluies. L'eau parvenant au sol permet de déterminer la teneur en eau du sol.

Le bilan hydrique s'effectue à l'échelle de la cellule à un pas de temps journalier. Il est réalisé à partir d'un fichier climatique contenant les valeurs de pluviométrie et d'ETP journalières (figure 9). Le type de sol est caractérisé par un point de flétrissement et une capacité au champ.

3.3. Le pas de temps et l'évolution des objets

Les différents objets simulés évoluent à un pas de temps annuel. Une croissance optimale est calculée pour la régénération et la végétation de sous-bois en fonction de l'éclairement reçu. Un indice de stress hydrique (Is) journalier est calculé selon la formule de Granier (1999). Lorsque le contenu en eau du sol est supérieur à 40% de la RU, cet indice est nul. L'eau est facilement utilisable et n'induit pas de stress. En dessous de ce seuil, l'Is varie entre 0 et 0,4. Le végétal économise l'eau qui lui est disponible en réduisant sa transpiration par la fermeture de ses stomates. Sa croissance est alors plus ou moins réduite suivant l'importance du stress subi. La somme des indices de stress hydriques calculés à l'échelle de la journée est alors appliquée à la végétation de sous-bois et à la régénération d'année afin de réduire de manière proportionnelle au stress hydrique leur croissance annuelle. A noter qu'en l'état actuel du modèle, aucun stress hydrique n'est appliqué aux arbres adultes, car leur courbe de croissance empirique inclut déjà un indice de compétition.

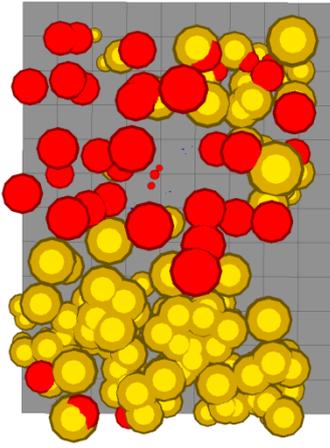


Figure 10 : Visualisation 3D sous Capsis de la placette 216 C. Parcelle en vue aérienne. Le rectangle gris représente la placette. Les carrés qui le composent sont des cellules de 5x5m. Les cercles rouges et jaunes sont respectivement des pins et des chênes adultes

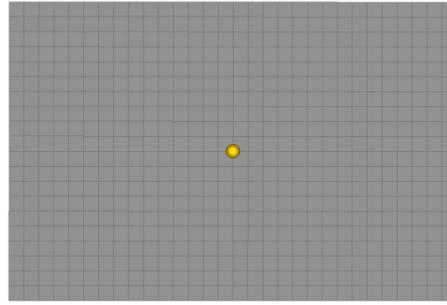


Figure 11 : Visualisation 3D sous Capsis du dispositif d'étude de la simulation du bilan hydrique d'un arbre seul. Parcelle en vue aérienne. Le rectangle gris représente la placette. Les carrés qui le composent sont des cellules de 5x5m. Le cercle jaune représente un chêne adulte

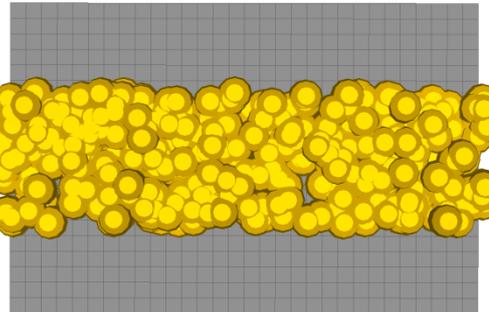


Figure 12 : Visualisation 3D sous Capsis du dispositif d'étude de la simulation du bilan hydrique d'un peuplement. Parcelle en vue aérienne. Le rectangle gris représente la placette. Les carrés qui le composent sont des cellules de 5x5m. Les cercles jaunes sont des chênes adultes

4. Méthode

Quelques tests ont été réalisés après l'implémentation du code afin de vérifier qu'il n'y avait pas d'erreurs manifestes. Cela a également permis de tester la cohérence du modèle dans son ensemble.

4.1. Observation de l'évolution temporelle du teneur en eau suivant la profondeur de sol

Afin d'observer si l'évolution du contenu en eau du sol semblait cohérente, la placette 216C du massif de Lorris en forêt d'Orléans a été simulée (figure 10). Du chêne, du pin et de la molinie sont présents sur cette placette. Leur impact sur la teneur en eau du sol (SWC) de chaque couche a été observé. Le sol simulé est de type argileux et est à la capacité au champ à l'initialisation.

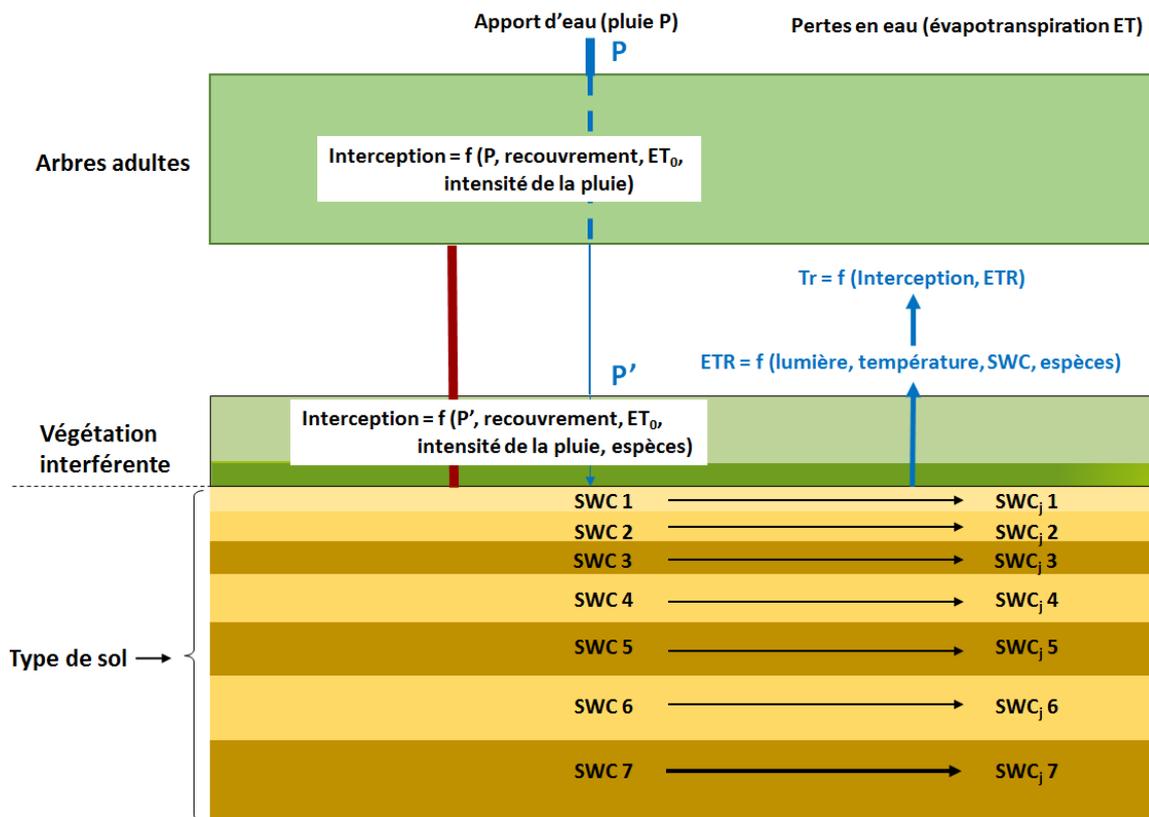
4.2. Observation de l'influence d'un arbre adulte seul sur le SWC

Pour cela, une placette de très grande taille (100 x 150m) a été simulée pour réduire l'effet de tore (figure 11). Un chêne dont j'ai fait varier la taille a été disposé en son centre. Le bilan hydrique de la végétation de sous-bois a été désactivé. L'influence de cet arbre sur le SWC puisse être observée à la fin d'une simulation de 123 jours. Le sol est de type limono-sableux et est à la capacité au champ à l'initialisation.

4.3. Observation de l'influence d'un peuplement d'arbres adultes sur le SWC et sur la végétation de sous-bois

La même placette que la partie 4.2. a été utilisée. J'ai disposé une rangée de chênes adultes allant de part et d'autre de la placette suivant l'axe Est-Ouest (figure 12). Cette rangée était d'une largeur de 40m et les arbres d'une hauteur de 20m. Elle présentait une densité élevée afin de produire une diversité d'éclairements relatifs sur la placette. Les cellules ayant des éclairements relatifs correspondant pour strate arborée à des LAI de 2, 4, 6 et 8 ont été observées. Le LAI des arbres est obtenu à partir d'une relation analogue à la loi de Beer-Lamber (Gobin 2014) :

Figure 13 : Schéma de fonctionnement du modèle de bilan hydrique conçu



P: pluie, SWC: Soil Water Content, ET_0 : évapotranspiration de référence, ETR: évapotranspiration réelle, Tr : transpiration réelle

$$LAI = -\ln(ER) / k \quad (1)$$

Avec ER l'éclairement relatif (entre 0 et 1). La constante k correspond au taux d'extinction du chêne.

La placette a également été considérée dans son ensemble. La répartition spatiale des volumes de SWC a été observée en fin de simulation, en présence et en absence de végétation interférente.

5. Implémentation et fonctionnement du modèle de partage de l'eau

Afin d'améliorer le processus de partage de l'eau dans le modèle RReShar, j'ai conçu à partir de l'analyse bibliographique un modèle de bilan hydrique (figure 13). Celui-ci permettra de mieux représenter les différentes composantes de ce bilan et en particulier la distribution de l'eau dans le sol, le processus d'interception et la consommation de l'eau par les végétaux. L'échelle de simulation sera la journée, plus petite échelle de temps considérée dans RReShar.

Les arbres seront remplacés par un taux de recouvrement de leur canopée défini à l'échelle de la cellule dans l'ensemble du bilan hydrique. Les processus ne s'effectueront donc pas pour chaque arbre mais pour chaque cellule. Le nombre de cellules étant généralement inférieur au nombre d'arbre, cela permettra de limiter le temps de calcul. Aucune distinction ne se fera entre le chêne et le pin.

Dans cette première version et comme mentionné précédemment, la croissance des arbres ne dépend pas de la quantité d'eau disponible mais d'un indice de compétition. Les arbres participeront à l'épuisement de la réserve en eau du sol mais ne seront pas affectés par le manque d'eau.

Un taux de recouvrement calculé pour la végétation interférente permettra comme pour les arbres de réaliser le bilan hydrique. La croissance de la végétation interférente sera dépendante de la quantité d'eau présente dans le sol.

A ce stade, la régénération n'a pas été représentée dans le bilan hydrique. En effet, dans RReShar, la structure du code permettant de représenter les cohortes de régénération présente un niveau de complexité important. J'ai donc été limité par mon manque d'expérience en

programmation Java. La croissance de la régénération sera toutefois dépendante de la quantité d'eau disponible.

La profondeur d'enracinement est un paramètre important dans les phénomènes de compétition. Toutefois, ces derniers ne peuvent être représentés si le sol simulé est à un seul réservoir. Un sol multicouches sera donc mis en place.

5.1. Formalisme des processus implémentés

5.1.1. L'interception de la pluie

Aussenac (1981) a montré que la part d'eau perdue par interception est fonction de l'intermittence des pluies et du pouvoir évaporant de l'air, en plus du LAI et de l'intensité des précipitations. Lors de pluies trop faibles pour saturer en eau les parties aériennes du végétal, l'ensemble de l'eau est intercepté et perdu par évaporation. A l'opposé, lorsque toutes les parties aériennes sont saturées en eau, les pertes par interception augmentent avec la quantité d'eau tombée jusqu'à atteindre un seuil. Au-delà de cette valeur, l'eau interceptée n'a plus le temps d'être évaporée et tombe au sol.

5.1.1.1. Les modèles envisagés

Dans le modèle RReShar, des peuplements irréguliers sont simulés. Les modèles de Rutter de 1979 et de Gash de 1995 sont reconnus pour leur robustesse en peuplement clairsemé (Muzylo et al. 2009). Cependant, j'ai envisagé le modèle de Gash de 1995 car il nécessite un nombre plus faible de paramètres d'entrée (voir partie 2.3.2.2.).

Le modèle de Merriam (1960, dans Lankreijer et al. 1999) a également été envisagé pour son extrême simplicité. C'est un modèle peu utilisé par la communauté scientifique qui ne calcul pas de façon explicite l'évaporation de l'eau interceptée par les troncs. Il présente une robustesse moindre (Lankreijer et al. 1999). Toutefois, ce modèle nécessite l'utilisation d'une seule formule. L'exponentielle qui y est intégrée permet le passage entre le régime de pertes par interception de la phase de faibles pluies et celui de la phase de pluies intenses. Elle repose sur les mêmes paramètres que le modèle de Gash de 1979 qui n'était utilisable que pour les peuplements denses.

$$I = S_{max} \left(1 - \exp \left(-\frac{c}{S_{max}} \times P \right) \right) + \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}} \right) P \quad (14)$$

Avec S_{max} la capacité maximale de stockage du couvert (mm) et \bar{E} le taux d'évaporation (mm.h^{-1}).

Le plus faible nombre de formules nécessaire dans ce dernier modèle peut représenter un gain en matière de temps de calcul.

Je n'ai trouvé aucun modèle plus simple et plus robuste.

5.1.1.2. Les hypothèses simplificatrices

5.1.1.2.1. L'interception journalière

Le nombre d'évènements pluvieux et l'intensité des pluies par évènement sont des valeurs peu relevées sur le terrain. De plus, le pas de temps du bilan hydrique dans RReShar est la journée. Le nombre d'évènements pluvieux par jour sera supposé égal à 1. Le modèle de Gash suppose que la durée entre deux évènements est suffisante à l'assèchement total des canopées et des troncs. Cette hypothèse est envisageable grâce au séchage rapide des canopées en forêt (Muzylo et al. 2009). Dans le modèle, toute l'eau interceptée par le couvert sera entièrement évaporée au bout d'une journée.

5.1.1.2.2. La capacité de stockage du couvert

Le S_{max} du tronc, nécessaire au modèle de Gash, est peu fréquent dans la littérature. Le tronc est la dernière partie de l'arbre à percevoir les pluies et les pertes au niveau du tronc représentent 1 à 5% des interceptions (Gash 1979). J'ai donc considéré la part du tronc dans le calcul des pertes comme étant négligeable, au moins dans un premier temps.

Dans la littérature la valeur de S_{max} relative à la fois aux feuilles et aux branches n'a pu être obtenue que pour le chêne sessile (Nizinski and Saugier 1988). Cette valeur de S_{max} a donc été appliquée aux chênes et aux pins en attente du S_{max} du pin.

Pour la callune et la fougère, les valeurs de S_{max} rapportées par Van Dijk et Bruijnzeel (2001) seront utilisées. Aucune capacité de stockage n'a pu être trouvée pour la molinie. Une valeur intermédiaire lui sera attribuée.

Lors de la période végétative, le S_{max} d'un couvert varie en fonction du taux de recouvrement. Le S_{max} lui sera donc proportionnel.

5.1.1.2.3. Le taux d'évaporation

Le taux d'évaporation couramment utilisé est celui de Monteith (1965). C'est une valeur en millimètre par unité de temps qui rend compte de l'évaporation de l'eau libre d'un couvert. Toutefois, le calcul du taux d'évaporation requiert la valeur de résistance aérodynamique du couvert et celle-ci dépend de la vitesse du vent. Le vent n'est pas pris en compte dans le modèle RReShar.

L'évapotranspiration de référence (ET_0) représente l'évapotranspiration maximale d'un gazon pour lequel la ressource hydrique est non limitante (Ducharne 2002). Dans ce cas, la résistance stomatique est minimale. J'ai donc considéré le taux d'évaporation comme étant égal à l' ET_0 . Cette dernière sera également calculée au vu du calcul de l'évapotranspiration réelle. La récupération de cette ET_0 permettra d'avoir un temps de calcul plus faible que si l'estimation de l'ET était différente entre les processus d'interception et d'évapotranspiration.

Le modèle de Gash (1979) ne pouvait être appliqué qu'en peuplement dense. Pour remédier à cela, quelques améliorations ont été apportées par l'auteur menant au modèle de Gash de 1995 (Gash et al. 1995). L'une de ces modifications a consisté à rendre le taux d'évaporation dépendant du taux de recouvrement par le produit de ces deux paramètres. Il sera fait de même dans le modèle de Merriam.

5.1.1.2.4. Le ratio \bar{E} / \bar{R}

\bar{E} et \bar{R} sont des valeurs horaires. \bar{E} correspond à la moyenne d'évaporation calculée sur les heures où la pluie est supérieure au volume d'eau nécessaire à la saturation de la canopée. Cependant, le modèle de bilan hydrique du modèle RReShar fonctionne à un pas de temps journalier. L' ET_0 journalière sera donc utilisée quelles que soient les valeurs de précipitations. Le \bar{R} sera une moyenne de pluie journalière calculée préalablement sur la période de végétation de l'année 2013 (Infoclimat 2015). Je n'ai trouvé aucun moyen d'estimer les pluies qui résultent des pertes par interception à partir d'une moyenne de pluie. Ce sera donc pour l'instant, la même valeur pour les arbres et la végétation interférente. \bar{E} et \bar{R} seront en mm.j^{-1} .

5.1.1.3. Choix du modèle

Les deux modèles ont été comparés sous ces hypothèses en faisant varier le taux de recouvrement et le ratio \bar{E} / \bar{R} . Les jours sans pluies conduisent invariablement à des interceptions nulles. Ces valeurs ne permettent pas de juger du degré de proximité des deux

méthodes de simulation. Aussi, elles génèrent du bruit et réduisent la puissance du test statistique. Elles ont donc été écartées.

Lankreijer et al. (1999) ont montré une différence en matière de précision dans la simulation de l'interception des pluies entre le modèle de Gash de 1995 et celui de Merriam. Ces modèles surestimaient les valeurs d'interception respectivement de 20,3% et de 37,4%. Toutefois, sous les hypothèses présentées précédemment, il y a une forte corrélation entre le modèle de Gash et le modèle de Merriam pour les valeurs de c ou de ratio \bar{E} / \bar{R} testées. Une valeur de pente et un coefficient de détermination de supérieurs à 0,9 sont obtenu entre les 2 modèles. Le modèle de Merriam présente une plus grande simplicité de calcul ce qui permettra un gain de temps lors de la phase d'implémentation. Ce sera donc ce modèle qui sera utilisé.

$$I = S_{max} \left(1 - \exp \left(-\frac{c}{S_{max}} \times P \right) \right) + \left(\frac{\overline{ET_{0..c.j}}}{\bar{P}} \right) P \quad (15)$$

5.1.2. La transpiration et la consommation de l'eau du sol

5.1.2.1. Choix de la méthode de calcul de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration de référence (ET_0) représente la capacité de l'atmosphère à provoquer l'évaporation de l'eau et la transpiration d'un couvert végétal de référence sans qu'aucune ressource ne soit limitante (Allen et al. 1998). C'est une valeur à partir de laquelle l'évapotranspiration de n'importe quel végétal d'une zone donnée peut être calculée.

Les méthodes de calcul de l' ET_0 sont nombreuses mais seules deux ont été envisagées : la méthode FAO-56 Penman-Monteith et la méthode de Turc (voir partie 2.3.3.1.). La première est d'une grande robustesse. La méthode de Turc est reconnu à la fois pour sa simplicité en matière de données d'entrée mais aussi pour la proximité de ces résultats avec ceux obtenus à l'aide de la méthode FAO-56 Penman-Monteith (Alexendris et al. 2008).

La méthode FAO-56 Penman-Monteith est reconnue comme réalisant une bonne estimation de l' ET_0 . Elle est utilisée pour l'évaluation d'autres méthodes d'estimations de l' ET (Trajkovic and Kolakovic 2009). Toutefois, la vitesse du vent requise pour cette méthode, n'est pas prise en compte dans le modèle RReShar.

La formule de Turc s'affranchie de cette mesure. Elle permet d'obtenir un ET_0 proche de l' ET_0 FAO-56 Penman-Monteith avec un nombre de variables et de formules limité (Trajković and Stojnić 2007).

Les valeurs de rayonnement sont simulées par le module de partage de la lumière SAMSARALIGHT utilisé par RReShar. Seule la première formule de Turc sera utilisée car l'humidité relative de l'air (HR) n'est actuellement pas prise en compte dans le modèle RReShar. A l'échelle de la journée, les valeurs de HR ne sont statistiquement pas différentes que l'on se situe au-dessus ou au-dessous de la canopée arborée (Gobin 2014). Des températures moyennes journalières seront utilisées.

5.1.2.2. Calcul de l'ETR

Afin d'obtenir l'ETR (7), l' ET_0 doit premièrement être multipliée au coefficient cultural (k_c) donnant ainsi l'ETP. L'ETP représente l'évapotranspiration potentielle de la culture dans des conditions exemptes de toute limitation en ressource. L'ETR est ensuite obtenue par le produit entre l'ETP et le coefficient de stress (k_s). Le k_s rend compte du stress occasionné lorsque la ressource en eau est limitante.

5.1.2.2.1. Le coefficient cultural

Le k_c des arbres à valeur non agronomique est rarement mesuré dans la littérature. Allen et al. (1998) l'estiment égal à 1 pour les conifères avec cependant quelques réserves. Verstraeten et al. (2005) ont observé, pour un ensemble de peuplements forestiers, des $k_{c_{min}}$ et $k_{c_{max}}$ respectivement de 0,73 et 0,91 pour le pin Sylvestre et de 0,75 et 0,86 pour le chêne pédonculé (*Quercus robur*). La littérature ne définit pas des k_c pour les stades précoces de développement des arbres forestiers. Une valeur intermédiaire de 0,8 sera appliquée au pin Sylvestre et au chêne sessile dans le modèle RReShar quel que soit le stade de développement.

Dans une étude menée par Gobin (2014), l'ET a été mesurée pour la fougère et la molinie en forêt d'Orléans en chambre de transpiration. J'ai considéré que dans cette étude les espèces présentes n'étaient pas soumises à un stress hydrique et donc que l'ET mesurée était égale à l'ETP. Le k_c a ensuite été obtenu selon la formule :

$$k_c = \frac{ETP}{ET_0} \quad (16)$$

Les k_c obtenus sont de 0,24 pour la molinie, 0,32 pour la fougère. Un k_c provisoire de 0,2 a été attribué à la callune (non étudié dans les travaux de Gobin (2014)).

5.1.2.2.2. Le coefficient de stress hydrique

Le k_s est un indicateur de stress. Lorsqu'il n'y a aucune limitation des ressources, $k_s=1$ sinon $0 < k_s < 1$. Un indice de stress hydrique (I_s) est déjà calculé par RReShar et repose sur le calcul de l' I_s proposé par Granier et al. (1999). Ce dernier varie entre 0 et une valeur de REW (rapport à un moment donné entre l'eau potentiellement extractible par la plante et la RU) de 0,4. Cette dernière valeur est un seuil à partir duquel la plante limite sa transpiration par la fermeture progressive de ses stomates. Quand $I_s=0$ il n'y a aucune limitation en eau. Un calcul du k_s est donc possible à partir de I_s selon la formule :

$$k_s = 1 - \left(\frac{I_s}{0,4} \right) \quad (17)$$

Des valeurs identiques sont obtenues avec la formule de k_s suivante présentée par Allen et al. (1998) :

$$k_s = \left(\frac{RU - D_w}{RU - RFU} \right) \quad (18)$$

Avec RU la quantité totale d'eau extractible par les végétaux (mm), RFU la quantité facilement extractible (sans que la végétation ne souffre de stress hydrique) (mm), D_w le déficit en eau par rapport à la RU (mm).

Dans RReShar, j'ai utilisé l' I_s pour le calcul du k_s pour gagner en temps de calcul.

Le k_s ne sera pas appliqué à tous les objets simulés. La callune et la molinie régulent faiblement, par rapport à la fougère, leur transpiration en fonction du stress hydrique qu'elles subissent (Gobin 2014). Un k_s calculé sur la profondeur de sol prospectée par les racines sera appliqué aux arbres adultes, à la fougère et à la régénération.

5.1.2.2.3. Choix de l'échelle des simulations

Dans le cas d'une forêt équienne de couvert continu, l'évapotranspiration est calculée en faisant l'hypothèse que l'ET de l'ensemble des houppiers est similaire à celle d'une grande feuille couvrant la même surface de sol.

Pour un peuplement inéquienne cette hypothèse reste valable comme cela a pu être testé par le modèle WAVES (Zhang and Dawes 1998). Ce dernier effectue un calcul d'ET sur un nombre défini de couches de végétation, chacune comportant des individus de même taille. Dans RReShar, des arbres d'espèces et de tailles différentes croissent ensemble sur une même parcelle, chacun à une vitesse qui lui est propre suivant les conditions dans lesquelles il évolue. En suivant le schéma du modèle WAVES, une parcelle qui présente un peuplement hétérogène serait composée d'un grand nombre de couches égal au nombre d'individus présents. L'ET de chaque arbre devrait être calculée individuellement.

Dans le modèle RReShar, tous les processus sont réalisés à l'échelle de la cellule. Les arbres sont spatialisés à l'échelle de la scène simulée et non à l'échelle de la cellule. La simulation du bilan hydrique par individu supposerait une augmentation du temps de calcul proportionnelle au nombre d'arbres simulés.

L'ET sera donc calculée à partir du taux de recouvrement des arbres. En appliquant la loi de Beer-Lambert, le taux de recouvrement peut être estimé par la relation suivante (Gobin 2014) :

$$c = 1 - \exp\left(\frac{\log(ER)}{0,9}\right) \quad (19)$$

avec c le taux de recouvrement (entre 0 et 1) et ER l'éclairement relatif (entre 0 et 1).

Les houppiers d'une même cellule peuvent être considérés comme un volume caractérisé par un éclairement relatif. L'ER est le ratio entre l'énergie qui parvient à traverser un volume et l'énergie incidente à ce volume. La valeur 0,9 au dénominateur est en rapport avec l'albédo et est propre aux feuilles vertes. Elle peut être utilisée pour le chêne sessile et la végétation de sous-bois. Le pin présente des aiguilles plus sombres. Les deux espèces d'arbres modélisées ne sont pas individualisées. La valeur 0,9 sera donc conservée pour tous les végétaux simulés.

Le calcul de l'ETR (mm) sera donc réalisé suivant la surface de cellule couverte par les végétaux d'où la relation :

$$ETR = ETo \times kc \times ks \times c \quad (20)$$

5.1.2.3. Calcul de la transpiration

Selon Nizinski et Saugier (1989), l'ETR précédemment calculée englobe à la fois la transpiration de l'individu et l'évaporation de l'eau stockée dans la canopée. La transpiration sera donc obtenue par la relation suivante :

$$Tr = ETR - I \quad (21)$$

Avec Tr la transpiration réelle (mm) et I les pertes par interception (mm).

5.1.2.4. Consommation de l'eau du sol

Une grande partie de l'absorption par les racines est induite par la transpiration (Morizet et al. 1987). Les feuilles sont reliées aux racines par le xylème. Le xylème des végétaux est une colonne d'eau mise sous tension par la transpiration des feuilles. La quantité d'eau perdue dans l'atmosphère est absorbée par les racines. Je considère donc que les quantités d'eau absorbées par les racines sont égales à la transpiration.

Les végétaux exploitent le sol davantage en surface qu'en profondeur (Bakker et al. 2006). La consommation de l'eau se fera donc préférentiellement des couches de surface aux couches les plus profondes suivant la profondeur d'enracinement maximale du végétal considéré.

La végétation de sous-bois est bien plus compétitive que les arbres adultes au regard de sa densité racinaire (Bakker et al. 2006). Dans le modèle, l'eau sera consommée en priorité par la végétation de sous-bois.

5.1.3. La caractérisation du sol

5.1.3.1. La réserve utile

La quantité d'eau que peut retenir un sol est déterminée par sa texture. En général, la texture correspond à la proportion en argile, en sable et en limon.

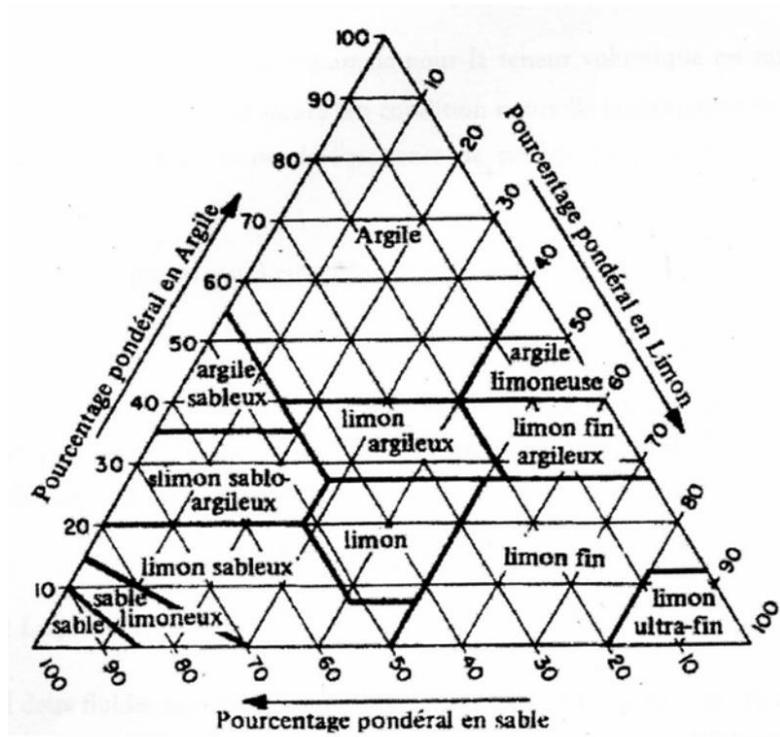


Figure 14 : Triangle de texture (USDA s.d.)

Dans le modèle RReShar, le sol sera considéré comme ayant les mêmes caractéristiques pour une même cellule. Une caractérisation du sol présent dans chaque cellule sera possible. Onze types de sol seront définis suivant un triangle de texture (figure 14). Chaque type sera caractérisé par une capacité au champ et un point de flétrissement suivant les valeurs présentées par Kucharik et al. (2000).

5.1.3.2. La répartition de l'eau dans le sol

L'état hydrique d'un sol évolue de façon hétérogène suivant les horizons considérés. Les horizons de surfaces sont vite rechargés par les précipitations mais sont davantage sollicités par la végétation.

Jacquart et Choisnel (1995) ont restitué ce phénomène dans un modèle de bilan hydrique bicouche. Ce modèle empirique de pas de temps décadaire ignore les remontées capillaires mais prend en compte des effets d'infiltration différée propre à certain sol.

A l'opposé, le modèle de Richards (1931, dans de Rosnay et al. 2000) repose sur une base physique d'infiltration verticale à une dimension. L'équation de ce modèle est une équation de Fokker-Planck dont la non-linéarité n'admet aucune solution analytique. De Rosnay et al. (2000) ont proposé une solution qui nécessite l'application de cette équation sur onze couches, chaque couche étant d'une épaisseur deux fois inférieure à celle qui lui est sous-jacente. L'équation du modèle de Richards requiert des valeurs de diffusivité et de conductivité hydraulique. Ces paramètres dépendent de la structure du sol et nécessiteraient des relevés de terrain supplémentaires. Cela soulèverait également quelques questions telles que : A quelle profondeur doit-on faire les relevés de sol ? ou Combien de relevés doit-on réaliser par hectare ? Au niveau du modèle RReShar, l'implémentation de ce modèle de sol nécessiterait un temps bien trop important pour le temps qui m'est imparti.

J'ai fait le choix d'un modèle de sol empirique multicouches. Le sol sera divisé en 7 horizons. Chaque couche sera deux fois plus fine que la couche qui lui est sous-jacente. Les cycles stockage-déstockage étant plus rapides en surface cela permettra un suivi plus fin de l'état hydrique du sol en surface qu'en profondeur.

5.1.3.3. Les flux hydriques

L'eau s'infiltrera dans le sol de manière verticale d'une couche saturée en eau à la couche qui lui est sous-jacente. Dans le modèle RReShar, lorsque le sol est nu à l'initialisation, il est

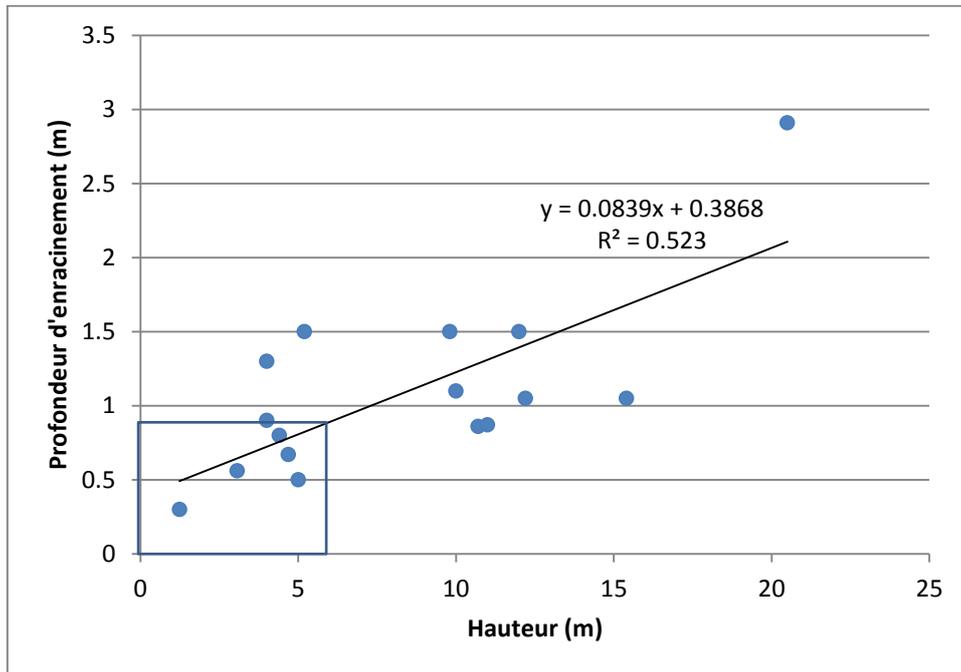


Figure 15 : Evolution de la profondeur d'enracinement en fonction de la taille de l'arbre. Encadré : seuil en taille (6m) et en profondeur d'enracinement (0,9m) pour la régénération dans le modèle RReShar ([Danjon.al 1999](#) ; [Millikin.Bledsoe 1999](#) ; [Kalliokoski.al 2009](#))

rapidement colonisé par la régénération et la végétation interférente lors des années qui suivent. L'évaporation du sol sera considérée comme négligeable tout comme les remontées capillaires.

5.1.4. La croissance racinaire

Dans plusieurs études, la hauteur, l'âge, le diamètre à 1,30m des arbres et la profondeur atteinte par leurs racines ont été mesurés (figure 15). La taille de l'arbre est le paramètre qui explique le mieux la profondeur d'enracinement. Cette profondeur augmente linéairement avec la taille de l'arbre.

Les arbres adultes ne sont pas individualisés dans le bilan hydrique prévu. Une profondeur moyenne d'enracinement aurait pu être calculée à partir de la hauteur moyenne de l'ensemble des arbres en utilisant la fonction présentée en figure 15. Toutefois, je ne suis pas parvenu à extraire la hauteur moyenne du modèle RReShar. Les racines seront donc considérées comme capables de puiser dans l'ensemble des couches de sol indépendamment de la taille des arbres.

La régénération représente dans le modèle RReShar tous les arbres inférieurs à 6m. Comme nous le montre la figure 15, à cette taille les racines des arbres puisent jusqu'à environ 0,9m. La zone de prospection de la régénération sera fixée à la valeur de 0,9m pour le calcul du ks et de l'Is.

La hauteur de la végétation interférente est rarement relevée. Sur le même schéma que la figure 15, une valeur de pente de 1 sera attribuée à la végétation interférente et l'ordonnée à l'origine sera fixée à 0. Ces valeurs sont arbitraires et ont été fixées en attente d'informations relatives à la profondeur d'enracinement de la végétation simulée.

5.2. Algorithme du modèle implémenté

5.2.1. La classe cellule : RRSCell

La classe RRSCell est chargée de définir les processus qui se produisent à l'échelle de la cellule. Le code se présente de la manière suivante :

Caractérisation des couches

- Attribution d'une épaisseur pour chaque couche
- Calcul de la profondeur atteinte par chaque couche

Détermination des limites du réservoir hydrique du sol

La capacité au champ, le point de flétrissement et le contenu en eau du sol (SWC) sont définis en début de simulation pour chaque cellule et pour chaque couche de sol.

- Calcul de la proportion de sable à partir de la proportion d'argile et de limon précisées dans le fichier d'entrée
- Détermination de la capacité au champ et du point de flétrissement en mm par cm de sol
- Calcul de la capacité au champ et du point de flétrissement de chaque couche de sol en fonction de son épaisseur
- Mise du SWC à la capacité au champ en début de simulation

Calcul de l'eau parvenant au sol suite à l'interception des pluies par les végétaux

Cette opération est réalisée pour les arbres adultes puis pour la végétation interférente.

- Calcul du taux de recouvrement
- Calcul de l'ETo
- Calcul des pertes par interception
- Calcul de l'eau parvenant sous le couvert suite aux interceptions

Infiltration de l'eau

L'eau s'infiltré dans une couche de sol seulement si celle-ci n'est pas saturée. Cette condition est testée pour chaque couche en partant de la surface à la couche la plus profonde.

- **Si** les précipitations au sol sont supérieures ou égales à la différence entre la capacité au champ et le SWC
 - **Alors** cette différence est déduite de la quantité d'eau parvenant au sol et le SWC est mis à la capacité au champ
- **Sinon** la somme entre les précipitations au sol et le SWC est réalisée et la valeur de précipitation au sol est mise à zéro. Arrêt de l'infiltration.

Une nouvelle valeur de SWC est attribuée à chaque couche suivant la progression de l'eau dans le sol.

Consommation de l'eau par les différentes strates de végétation

Le volume d'eau absorbé par les racines est considéré comme égal au volume d'eau transpiré. L'eau d'une couche ne peut être absorbée que si le SWC est supérieur au point de flétrissement permanent. Il est également nécessaire que les racines de la végétation considérée parviennent jusqu'à cette couche. Pour les arbres adultes, les racines sont considérées de longueur infinie et traversent toutes les couches. L'ensemble de ces opérations sont réalisées pour la végétation interférente puis pour les arbres adultes.

- Calcul du ks
- Calcul de l'ETR
- Calcul de la transpiration
- Détermination de la profondeur de sol prospectée par les racines

Les conditions d'absorption de l'eau qui suivent sont appliquées de la couche la plus en surface à la couche la plus profonde.

- **Si** la transpiration est supérieure ou égale à la différence entre le SWC et le point de flétrissement
 - **Et si** les racines traversent cette couche
 - **Alors** cette différence est déduite de la quantité d'eau à transpirer et le SWC est mis au point de flétrissement
 - **Sinon si** les racines s'arrêtent à cette couche
 - **Alors** la quantité d'eau à transpirer est mise à zéro et le SWC de la couche est mis au point de flétrissement
- **Si toutes ces conditions ne sont pas remplies** la quantité d'eau à transpirer est déduite du SWC et la quantité d'eau à transpirer est mise à zéro. Arrêt de la progression en profondeur de la consommation de l'eau.

Calcul de l'indice de stress sur les horizons de sol prospectés

Un indice de stress hydrique est calculé dans le modèle RReShar à deux échelles de temps différentes. Un indice de stress journalier est calculé pour la végétation de sous-bois et permet le calcul du coefficient de stress au jour suivant. L'indice de stress moyen est calculé en fin de simulation et est appliqué à la végétation de sous-bois et aux cohortes de régénération afin de rendre compte du stress hydrique subi sur la période de végétation. Cet indice réduit la croissance optimale des objets simulés. Les arbres adultes ne sont pas concernés car leur croissance dépend d'un indice de compétition et non des quantités d'eau présentes dans le sol.

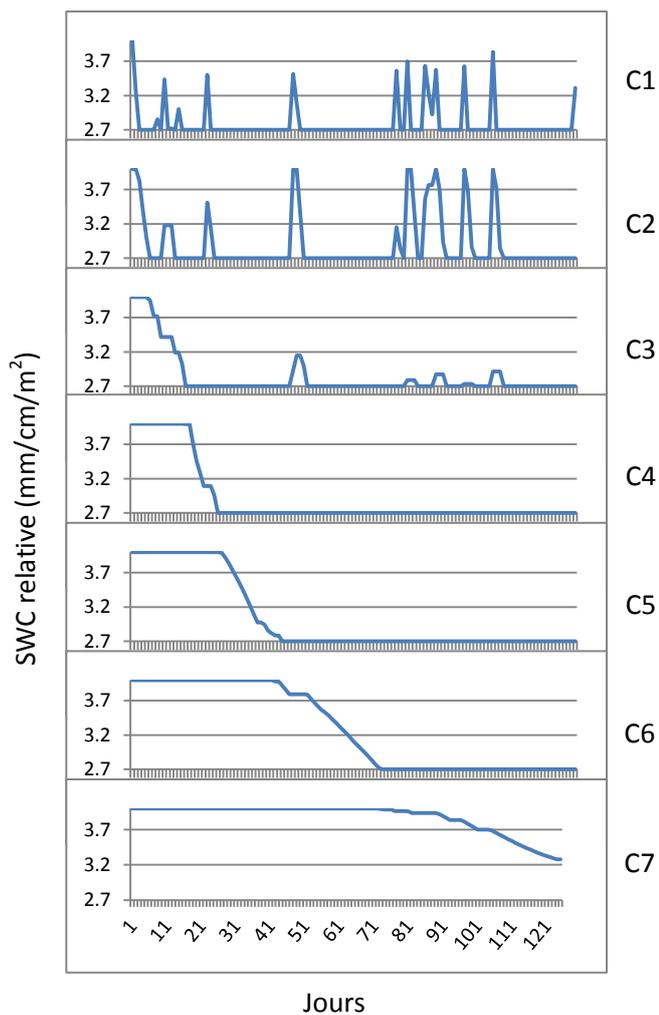


Figure 16 : Evolution de la SWC relative de chaque couche de sol en présence d'arbres et de végétation de sous-bois. Simulation en sol argileux. La capacité au champ et le point de flétrissement sont respectivement de 4 et 2,7 mm.cm⁻¹.

- Calcul de la réserve utile et de la SWC pour le volume de sol correspondant aux couches prospectées par les racines
- Calcul de l'indice de stress à l'échelle journalière
- Calcul d'un indice de stress moyen sur la période de végétation

5.2.2. La classe principale : RRSMModel

La classe RRSMModel appelle les méthodes de la classe cellule. Elle fait évoluer chaque cellule à un pas de temps journalier. Chaque cellule traverse une saison de végétation complète avant que cette classe ne passe à une cellule suivante. Lorsque toutes les cellules ont subi une itération une nouvelle année est alors entamée. Le code se déroule de la manière suivant :

Exécution du code sur la période de végétation

Au début de chaque année simulée, les indices de stress sont initialisés à zéro et les SWC de toutes les couches sont mis à la capacité au champ.

- Initialisation des indices de stress à 0
- Initialisation des SWC à la capacité au champ
- Lecture journalière du fichier climat
- Exécution des méthodes de la classe RRSCell

6. Résultats - Discussion

6.1. Test des fonctions implémentées

6.1.1. Etude de la dynamique de remplissage et d'exploitation des différentes couches de sol à l'échelle journalière

L'évolution journalière de la SWC de chaque couche de sol a été observée (figure 16). Nous pouvons voir que les cycles stockage-déstockage sont plus rapides en surface qu'en profondeur. Dans la première couche, l'eau qui parvient au sol est immédiatement consommée par le couvert. La première utilisation d'une couche et son remplissage sont de plus en plus tardifs suivant la profondeur considérée. Cela est en accord avec les hypothèses émises à l'implémentation.

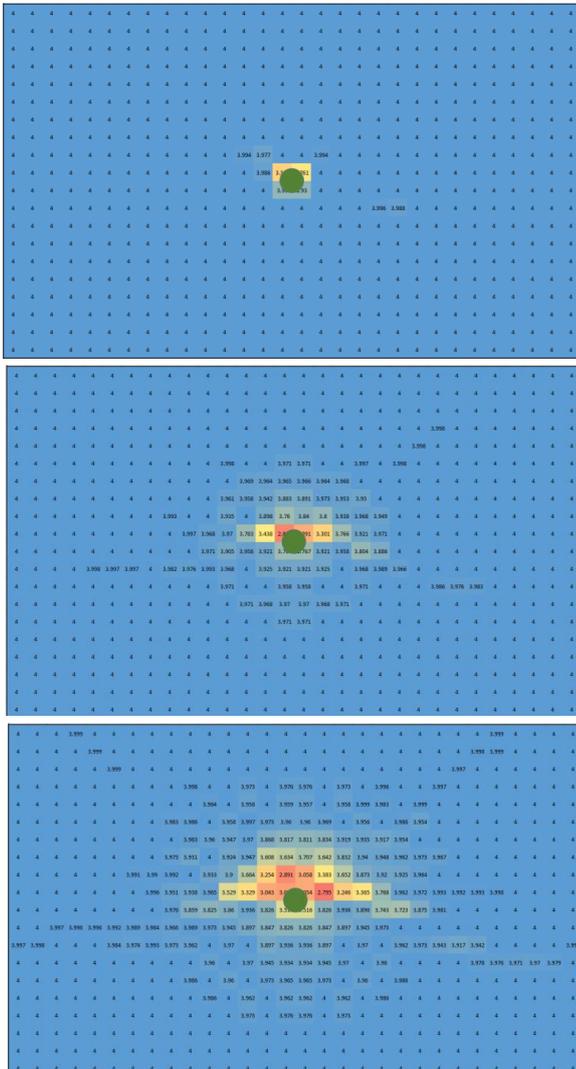


Figure 17 : Evolution de la répartition du déficit en eau du sol en présence d'un arbre seul. Simulation sans végétation interférente en sol argileux. Un dégradé de couleur va du bleu au rouge et représente respectivement la capacité au champ et le point de flétrissement permanent.

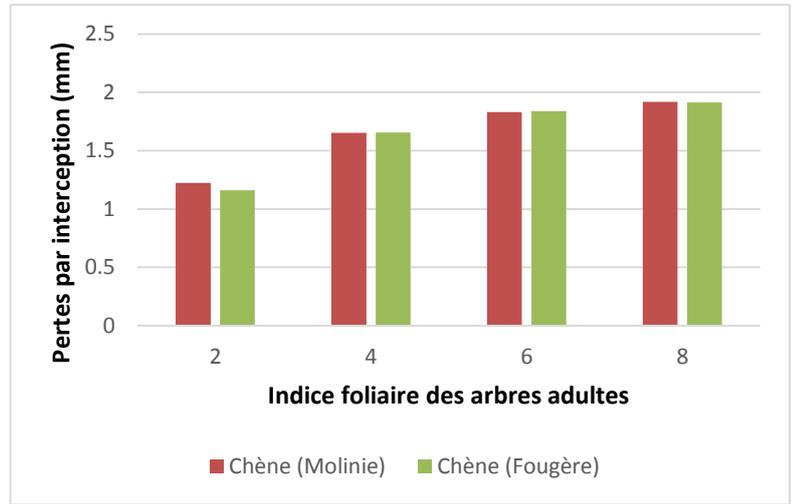


Figure 18 : Variation des pertes par interception des arbres en fonction de leur indice foliaire

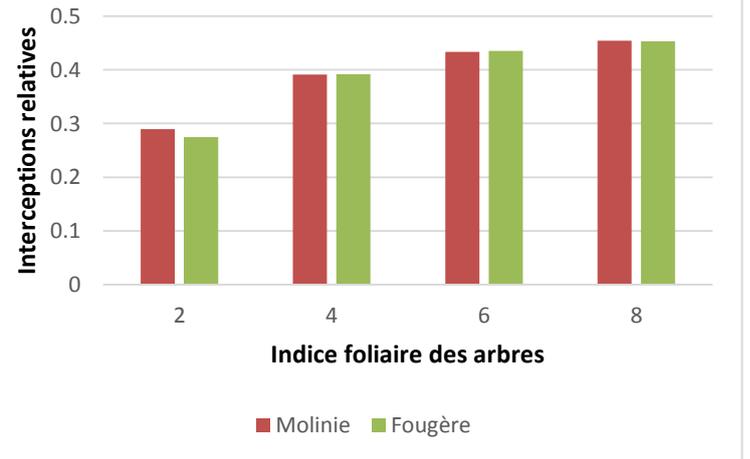
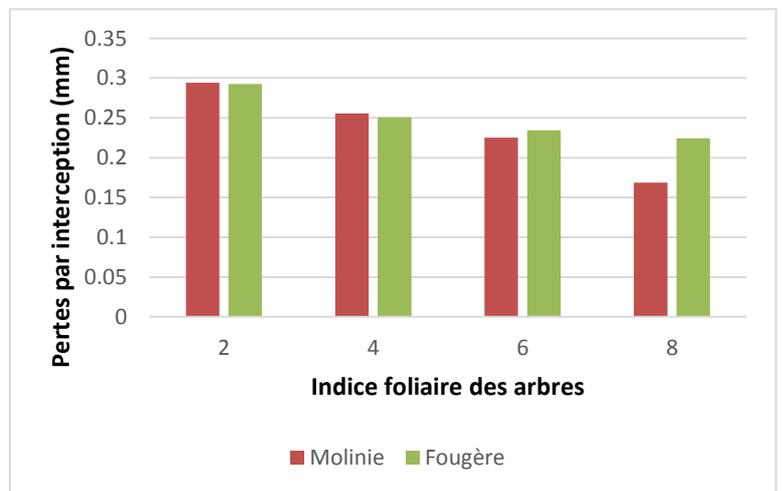


Figure 19 : Variation des pertes par interception de la molinie et de la fougère en fonction de l'indice foliaire des arbres

6.1.2. Variation spatiale du déficit en eau en présence d'un arbre adulte

La plateforme Capsis ne permet pas de réaliser une représentation spatiale des différents paramètres qui composent le bilan hydrique. Le logiciel Excel a donc été utilisé en ce sens. La placette simulée par le modèle RReShar a été reproduite sous Excel à partir des données de sortie du modèle. Un dégradé de couleur a été ajouté de manière à observer les différentes tendances.

L'ET et les pertes par interception dépendent du taux de recouvrement. Plus le taux de recouvrement est élevé, plus l'éclairement relatif est faible. L'étude de la répartition de l'éclairement relatif est donc importante dans la compréhension de l'évolution spatiale du SWC. Le modèle SAMSARALIGHT effectue un lancer de rayons à partir des positions successives qu'occupe le soleil au cours de l'année. Dans l'hémisphère nord le soleil décrit une trajectoire incurvée vers le sud. Une zone circulaire centrée sur l'arbre est créée par le rayonnement diffus et une zone plus marquée est créée au nord de l'arbre par le rayonnement direct. Le taux de recouvrement et le déficit en eau suivent la même tendance (figure17).

J'ai voulu observer l'influence d'un arbre adulte seul sur le SWC. J'ai donc disposé un arbre de 6, 11 puis 15m au centre d'une placette. Nous pouvons voir que plus l'arbre est grand plus son aire d'influence est large. Il présente un volume plus important et intercepte plus de rayonnement d'où la zone de plus faible SWC observée (figure17).

6.2. Effet de la variation de l'indice foliaire des arbres

6.2.1. Effet sur l'interception de la pluie

Plus le LAI des arbres adultes est élevé plus les pertes par interception des arbres sont élevées (figure 18). Nous pouvons également observer que les pertes par interception de la végétation diminuent à mesure que le LAI des arbres augmente. Cette tendance est due aux précipitations moins importantes sous les zones où le couvert arboré présente un fort LAI. Toutefois, les interceptions relatives de la végétation interférente sont plus importantes sous les forts LAI de la strate supérieure (figure 19). La proportion de pluie interceptée est plus élevée lors de faible précipitation comme cela peut être observé en forêt.

Cependant, la pluie est interceptée jusqu'à très loin des arbres. Cela est peu réaliste en raison de la verticalité du phénomène d'interception en forêt (figure 19).

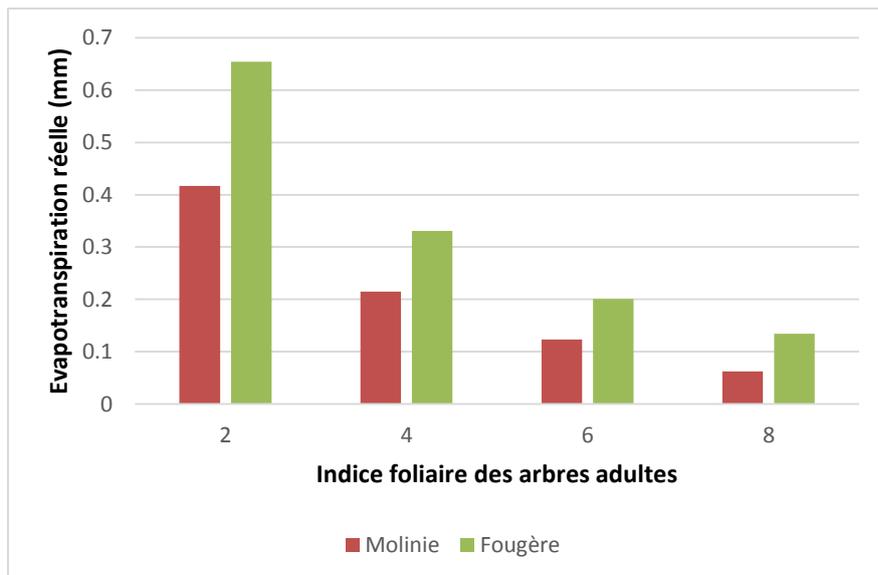


Figure 20 : Variation de l'évapotranspiration réelle de la molinie et de la fougère en fonction de l'indice foliaire des arbres

6.2.2. Effet sur l'ETR de la végétation interférente

Alors que l'ETR des arbres augmente avec leur LAI, la végétation interférente montre une réduction de son ETR (figure 20). Le rayonnement est le paramètre qui fait le plus varier l'ETR. L'interception du rayonnement est plus importante pour les arbres lorsque leur LAI est élevé. Peu d'éclairement parvient alors jusqu'à la végétation sous-jacente d'où les faibles ETR. Les mêmes observations ont pu être réalisées sur le terrain (Gobin 2014).

7. Discussion générale

7.1. Le calcul de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration est une composante importante du bilan hydrique. Elle fait varier la réserve en eau du sol et rend compte de la transpiration des végétaux et de l'évaporation de l'eau du couvert et du sol. Le rayonnement est le paramètre qui influe le plus sur l'ET. L'ombre que se font les végétaux les uns aux autres est donc importante pour l'observation des phénomènes de compétition pour la ressource hydrique.

Dans le modèle de bilan hydrique d'origine, l'ETP journalière de la région simulée était calculée en dehors du modèle. L'ETR était obtenue à partir de cette valeur et du contenu en eau de chaque cellule. Cette méthode avait l'inconvénient de ne pas permettre une représentation réaliste de l'ET et l'effet de la compétition des végétaux pour la lumière sur la consommation en eau était ignorée.

Dans le bilan hydrique modifié, l'ET est calculée à partir du rayonnement et de la température. Le rayonnement est intercepté par les différentes couches de végétation avant d'arriver au sol. L'influence des strates supérieures sur l'ET des strates inférieures est donc prise en compte.

Cependant, du fait de la complexité du modèle de partage de la lumière SAMSARALIGHT, seule la moyenne de rayonnement sur la période de simulation a pu être extraite pour le calcul de l'ET. Le rayonnement incident est donc constant dans le temps. Cette modification élimine une grande part de la variabilité inter-journalière de l'ET. Pour la simulation d'un peuplement régulier à une state, il est donc probable que le modèle de bilan hydrique original simule de façon plus efficiente l'ET que le modèle modifié. En peuplement irrégulier, le modèle modifié reste irréaliste, surestimant l'ET les jours de faible rayonnement et inversement.

7.2. L'évapotranspiration des végétaux simulés

Dans le bilan hydrique conçu, l'évapotranspiration des cohortes de régénération n'a pas pu être calculée. Il est toutefois, probable que la consommation de la régénération soit très faible voir négligeable, par rapport à la consommation des arbres adultes.

Pour la végétation interférente, le k_s n'a pas été appliqué à la molinie et à la callune afin de rendre compte de leur faible contrôle stomatique en comparaison à la fougère. Cette hypothèse ne rend pas bien compte de la réalité.

7.3. L'évapotranspiration en jour de pluie

Chaque jour la transpiration est calculée par le modèle. En absence de pluie, la transpiration est égale à l'ETR et les jours de pluie elle représente la différence entre l'ETR et les pertes par interception. Toutefois, lors de pluies importantes l'évaporation de l'eau interceptée est supérieure à l'ETR et la transpiration est nulle. L'ET n'est alors composée que d'évaporation.

L'évaporation de l'eau libre du couvert est supérieure à la transpiration car elle se produit sans résistance stomatique. Elle peut être 3 à 4 fois supérieure à la transpiration (Aussenac 1981). Aussenac (1981) a observé que la transpiration n'est jamais nulle lors des pertes par interception. La transpiration diminue d'un certain pourcentage par rapport au volume d'eau intercepté. Selon Aussenac (1972), cette proportion est fonction de la morphologie des feuilles et de la structure des forêts. L'hypothèse émise n'est donc pas réaliste.

7.4. Les interceptions

7.4.1. L'évapotranspiration de référence

Les jours de pluie, l'évapotranspiration est très basse en raison, notamment, du faible rayonnement (Lankreijer et al. 1999). Toutefois, dans RReShar ce n'est pas le cas. La température, le rayonnement et les valeurs de précipitations proviennent chacun de sources différentes en matière de lieu et d'année de mesure. Il est donc probable que l' ET_0 soit souvent supérieure à la normale en temps de pluie.

L' ET_0 a été utilisée dans le modèle de Merriam afin de remplacer le taux d'évaporation car elle représente l'ET d'un gazon non limité en eau. Or dans ce cas, la résistance stomatique est très faible mais n'est pas nulle (Monteith 1965). L' ET_0 est donc une sous-estimation du taux d'évaporation.

C'est une moyenne du taux d'évaporation qui devrait être utilisée dans le modèle de Merriam. Cette moyenne est normalement réalisée seulement sur les jours durant lesquels l'intensité des pluies est supérieure à $0,5 \text{ mm.h}^{-1}$. Ce seuil a pour effet d'augmenter l' \bar{E} car les faibles valeurs de taux d'évaporation sont ignorées. Dans le modèle de bilan hydrique modifié l' ET_0 journalière a été utilisée. L' ET_0 journalier fluctue autour de l' ET_0 moyenne de la période simulée. Toutefois, cette moyenne est plus faible que si elle était calculée en prenant en compte le seuil de précipitation comme c'est le cas pour l' \bar{E} . La moyenne de l' ET_0 est donc une sous-estimation de l' \bar{E} .

De plus, \bar{E} est une valeur fixe. Nous pourrions nous demander si la fluctuation journalière de l' ET_0 réduit ou augmente l'écart entre les pertes par interception simulées et observées ou, quelle est l'impact des différentes erreurs d'estimation de l' \bar{E} sur l'estimation des pertes. En absence de données climatiques et de données de pertes par interception issues de mesures d'une même placette, ces questions restent en suspens.

7.4.2. La capacité de stockage du couvert

La capacité de stockage du couvert est un paramètre qu'il est nécessaire de correctement estimer avant toute simulation d'interception. Chaque auteur fait soit le choix de l'estimer graphiquement (Gash and Morton 1978) soit d'utiliser un S mesuré sur le terrain (Lankreijer et al. 1999). Les parties du végétal prises en compte dans le S dépendent des hypothèses émises. J'ai décidé d'utiliser un S mesuré qui intègre les tiges et les feuilles. Cependant, les interceptions simulées à partir de ce S devront être comparées à des données d'interceptions réelles afin de vérifier l'exactitude des hypothèses émises.

Le S_{\max} du pin a été considéré comme égal à celui du chêne par manque d'informations. Ces deux espèces présentent des différences de structure de leurs houppiers entre notamment matière de feuillage et d'écorce. Leurs S_{\max} , feuilles et branches incluses, sont donc probablement différents.

7.5. Le sol

En forêt, elles constituent un apport d'eau au même titre que les précipitations. Elles peuvent provenir d'une couche sous-jacente non prospectée par les racines et d'humidité plus élevée qu'en surface (Breda et al. 2002). Dans le sol simulé, les mouvements de l'eau se cantonnent à l'infiltration. Les remontées capillaires sont ignorées car j'ai considéré que le sol était

rarement nu. En peuplement dense multi-strates cette condition est respectée. En peuplement clairsemé il est probable que les remontées capillaires soient non négligeables. La végétation présente une plage optimale de taux de recouvrement en fonction de l'éclairement. Pour des éclairagements trop élevés (ex : en absence d'arbres), le taux de recouvrement de la végétation interférente diminue jusqu'à une valeur d'environ 60% (pour la callune il atteint 40%). Le rayonnement qui parvient au sol représente alors 15 à 50% du rayonnement incident selon la végétation interférente considérée.

7.6. La répartition spatiale de la consommation de l'eau

La densité racinaire est un paramètre dont dépend la répartition spatiale de la consommation de l'eau du sol par les végétaux. Sudmeyer et al (2004) ont montré que le contenu en eau du sol est négativement corrélée avec la densité de racines fines ($< 2\text{mm}$). Cette densité n'a pas été implémentée car elle dépend de nombreux facteurs tels que le type de sol, le niveau de compaction, la répartition des ressources dans le sol et l'espèce considérée (Sudmeyer et al. 2004). Cependant, Breda et al (2002) ont montré que la consommation de l'eau dans le sol varie en fonction des saisons. Plus la saison est sèche plus l'eau est puisée en profondeur. Ce qui est en accord avec l'hypothèse du modèle de bilan hydrique conçu selon laquelle les premières couches de sol seraient exploitées en priorité.

La végétation interférente est très compétitrice pour la ressource en raison notamment de sa forte densité racinaire. Elle peut présenter une densité racinaire trois fois supérieure à celle de des arbres adultes (Bakker et al. 2006). Afin de restituer ce phénomène dans le modèle, la priorité a été donnée à la végétation interférente dans la consommation de l'eau. Ce n'est pas réaliste mais cela n'a pas d'importance. Même si la végétation assèche tous les premiers horizons, la profondeur d'enracinement des arbres leurs permettent de consommer dans les couches situées en dehors de l'aire de consommation de cette végétation.

En forêt, la densité racinaire diminue avec l'augmentation de la distance au tronc (Sudmeyer et al. 2004). Dans le modèle, l'ETR diminue avec la distance au tronc grâce au taux de recouvrement. Cependant, s'il n'y a qu'un arbre sur la placette simulée, sa consommation s'étendra à toutes les cellules. Le rayonnement diffus se répartie sur toute la placette même pour de petits arbres créant ainsi un taux de recouvrement faible en bordure mais suffisant pour qu'il y ait une consommation. Lors de la simulation d'un peuplement (généralement

>200 individus) toutes ces consommations résiduelles se cumulent sur l'ensemble de la placette. La consommation de l'eau est donc surestimée.

Conclusion – Perspectives

Le modèle RReShar est un modèle de régénération forestière qui a été développé dans un contexte de changement climatique. Le modèle de bilan hydrique était succinct. Quelques améliorations ont été apportées à partir de la littérature. A l'origine, L'ETP était une donnée d'entrée, les pertes par interception dépendait de l'éclairement relatif et variait linéairement avec l'intensité des pluies. De plus, le sol était à un réservoir ce qui ne permettait pas une représentation spatio-temporelle de l'évolution de la réserve en eau. Ainsi, quelques modifications ont été apportées :

L'ETP journalier est maintenant calculée à l'aide de la méthode de Turc à partir du rayonnement et de la température. Toutefois, seul un rayonnement moyen a pu être utilisé, réduisant fortement les variations inter-journalières de l'ET.

La consommation des végétaux est réalisée à l'aide d'un taux de recouvrement défini à l'échelle de la cellule pour les arbres et la végétation interférente. Celui-ci n'est jamais nul du fait du rayonnement diffus. Sur une placette infinie il est probable que le taux de recouvrement tende vers zéro tout comme la consommation de l'eau. La consommation n'est normalement possible que là où il y a des racines. Si on délimite une zone, sur la placette simulée, où la consommation en eau est considérée comme non négligeable, elle restera toujours trop large par rapport aux données de terrains d'extension des racines. En forêt, la distance radiale maximale des racines d'un arbre augmente linéairement avec sa hauteur. Je propose donc d'établir un seuil de taux de recouvrement afin que l'évolution de l'aire de consommation en eau soit conforme à la courbe présentée en [figure](#).

Les pertes par interception sont calculées à l'aide du modèle de Merriam. Il a été modifié afin que ces données d'entrée soient conformes au pas de temps journalier du modèle de bilan hydrique du modèle RReShar.

Le taux de recouvrement utilisé pour le calcul des interceptions est celui de la strate à l'échelle de la cellule. Or l'interception des pluies est un phénomène vertical. Le rendre dépendant de taux de recouvrement présente l'inconvénient de créer de la dispersion autour des arbres adultes. Cela conduit de ce fait des erreurs de contenu en eau du sol. Lors de précipitation, une cellule qui ne présente aucun arbres montre tout de même des pertes par interception. La restauration de sa réserve en eau est alors moindre. Il serait donc important de réaliser le calcul des pertes par interception à l'échelle de l'arbre.

Le sol présente maintenant sept réservoirs dont le volume en eau est défini par le pourcentage d'argile, de limon et de sable. Les remontés capillaires et le drainage n'ont pas été modélisés. Il serait intéressant par la suite de travailler sur la simulation de ces processus.

Bibliographie

- Adams, H.D., M. Guardiola-Claramonte, G.A. Barron-Gafford, J.C. Villegas, D.D. Breshears, C.B. Zou, P.A. Troch and T.E. Huxman. 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.
- Alexendris, S., R. Stricevic and S. Petkovic. 2008. Comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in central Serbia, calculated by six empirical methods against the Penman-Monteith formula. *European Water*. 21/22:17-28.
- Allen, C.D., A.K. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, N. McDowell, M. Vennetier, T. Kitzberger, A. Rigling, D.D. Breshears, E.H. Hogg and 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.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. FAO irrigation and drainage paper. Rome. 300 p.
- Angert, A., S. Biraud, C. Bonfils, C.C. Henning, W. Buermann, J. Pinzon, C.J. Tucker and I. Fung. 2005. Drier summers cancel out the CO₂ uptake enhancement induced by warmer springs. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 102:10823-10827.
- Aussenac, G. 1972. Étude de l'évapotranspiration réelle de quatre peuplements forestiers dans l'Est de la France. *Annales Des Sciences Forestieres*. 29:369-389.
- Aussenac, G. 1981. L'interception des précipitations par les peuplements forestiers. *La Houille Blanche*:531-536.

- Bakker, M.R., L. Augusto and D.L. Achat. 2006. Fine root distribution of trees and understory in mature stands of maritime pine (*Pinus pinaster*) on dry and humid sites. *Plant and Soil*. 286:37-51.
- Barbier, S., P. Balandier and F. Gosselin. 2009. Influence of several tree traits on rainfall partitioning in temperate and boreal forests: a review. *Annals of Forest Science*. 66:602-602.
- Bieng, M.A.N., T. Perot, F. de Coligny and F. Goreaud. 2013. Spatial pattern of trees influences species productivity in a mature oak-pine mixed forest. *European Journal of Forest Research*. 132:841-850.
- Breda, N., Y. Lefèvre and V. Badeau. 2002. Réservoir en eau des sols forestiers tempérés : spécificité et difficultés d'évaluation. *La Houille Blanche*:24-32.
- Choisnel, E. 1992. Le calcul du bilan hydrique du sol: options de modélisation et niveaux de complexité. *Sci Sol*. 30:15-31.
- Conseil de l'Union Européenne. 2014. Avis du Comité économique et social européen sur la 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]. *Journal officiel de l'Union européenne*:1-9.
- Courbaud, B. 1995. Modélisation de la croissance en forêt irrégulière. Perspectives pour les pessières irrégulières de montagne. *Revue Forestiere Francaise*. 67:173-182.
- CRPF. 2011. La régénération naturelle : Principes généraux.
- de Rosnay, P., M. Bruen and J. Polcher. 2000. Sensitivity of surface fluxes to the number of layers in the soil model used in GCMs. *Geophysical Research Letters*. 27:3329-3332.
- Debain, S., J. Chadœuf, T. Curt, G. Kunstler and J. Lepart. 2007. Comparing effective dispersal in expanding population of *Pinus sylvestris* and *Pinus nigra* in calcareous grassland. *Canadian Journal of Forest Research*. 37:705-718.

- Decourt, N. 1964. Les tables de production. Leurs limites et leur utilité. *Revue Forestiere Francaise*:640-657.
- Ducharne, A. 2002. Projet GICC-Seine : questions relatives `a l'ETP.
- Gash, J.H.C. 1979. An analytical model of rainfall interception by forests. *Royal Meteorological Society, Quarterly Journal*. 105:43-55.
- Gash, J.H.C., C.R. Lloyd and G. Lachaud. 1995. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*. 170:79-86.
- Gash, J.H.C. and A.J. Morton. 1978. An Application of the Rutter Model to the Estimation of the Interception Loss From Thetford Forest. *Journal of Hydrology*. 38:49-58.
- Gaudio, N. 2010. Interactions pour la lumière au sein d'un écosystème forestier entre les arbres adultes, les jeunes arbres et la végétation du sous-bois. *In* Université d'Orléan. Université d'Orléans, Orléans, p 194 pp.
- Gobin, R. 2014. Contribution relative de la végétation du sous-bois dans la consommation en eau des placettes forestières soumises aux changements de climat et de pratiques. Université d'Orléans.
- Goreaud, F., F. de Coligny, B. Courbaud, J.F. Dhôte, P. Dreyfus and T. Pérot. 2005. La modélisation : un outil pour la gestion et l'aménagement en forêt. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*. 6
- Granier, A., N. Bréda, P. Biron and S. Villetta. 1999. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*. 116:269-283.
- Harmer, R., R. Boswell and M. Robertson. 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.

Infoclimat. 2015. Orléans - Bricy (Loiret - France) | Relevés météo en temps réel - Infoclimat.
In Infoclimat.

Inra. 2015a. Réserve en eau du sol et mobilisation par les racines. *In* BILJOU Modèle de bilan hydrique forestier.

Inra. 2015b. Réserve utile en eau des sols. *In* GisSol.

IPCC. 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. IPCC, pp 1-103.

IPCC. 2013. Climate Change 2013 The Physical Science Basis Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, pp 1-1535.

IPCC. 2014a. Climate Change 2014 Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Global and Sectoral Aspects Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, pp 1-1131.

IPCC. 2014b. CLIMATE CHANGE 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers.

Jacquart, C. and E. Choisnel. 1995. Un modèle de bilan hydrique simplifié à deux réservoirs utilisable en agrométéorologie. Rubrique: Agrométéorologie:29-44.

Kucharik, C.J., J.A. Foley, C. Delire, V.A. Fisher, M.T. Coe, J.D. Lenters, C. Young-Molling, N. Ramankutty, J.M. Norman and S.T. Gower. 2000. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: Water balance, carbon balance, and vegetation structure. *Global Biogeochemical Cycles*. 14:795-825.

Lankreijer, H., A. Lundberg, A. Grelle, A. Lindroth and J. Seibert. 1999. Evaporation and storage of intercepted rain analysed by comparing two models applied to a boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*. 98–99:595-604.

- Lett, C. 1999. Modélisation et simulation de la dynamique des écosystèmes forestiers: des modèles agrégés aux modèles individuels spatialisés. Université de Strasbourg 1.
- Liu, S. 2001. Evaluation of the Liu model for predicting rainfall interception in forests worldwide. *Hydrological Processes*. 15:2341-2360.
- Llorens, P. and F. Gallart. 2000. A simplified method for forest water storage capacity measurement. *Journal of Hydrology*. 240:131-144.
- McDowell, N., W.T. Pockman, C.D. Allen, D.D. Breshears, N. Cobb, T. Kolb, J. Plaut, J. Sperry, A. West, D.G. Williams and E.A. Yezzer. 2008. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*. 178:719-739.
- Monteith, J.L. 1965. Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*. 19:205-234.
- Morizet, J., R. Falcimagne and M. Martignac. 1987. Dispositif expérimental permettant de mesurer simultanément l'absorption hydrique et la transpiration d'une jeune plante cultivée sur sol.–Premiers résultats obtenus. *Agronomie*. 7:541-546.
- Muzylo, A., P. Llorens, F. Valente, J.J. Keizer, F. Domingo and J.H.C. Gash. 2009. A review of rainfall interception modelling. *Journal of Hydrology*. 370:191-206.
- Ngo Bieng, M.A., T. Pérot, F. De Coligny and F. Goreaud. 2013. Spatial pattern of trees influences species productivity in a mature oak-pine mixed forest. *European Journal of Forest Research*. 132:p.-841 - p. 850.
- Nizinski, G. and B. Saugier. 1988. Mesures et modélisation de l'interception nette dans une futaie de chênes. *Acta Oecologica.Oecologia Plantarum*. 9:311-329.
- Nizinski, J. and B. Saugier. 1989. Dynamique de l'eau dans une chênaie (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) en forêt de Fontainebleau. *Annales Des Sciences Forestieres*. 46:173-186.

- Pérot, T., F. Goreaud, C. Ginisty and J.-F. Dhôte. 2010. A model bridging distance-dependent and distance-independent tree models to simulate the growth of mixed forests. *Annals of Forest Science*. 67
- Picard, N. 1999. Passage d'un modèle individuel à un modèle de distribution de la dynamique forestière. Application à une forêt dense tropicale humide de Guyane française. ENGREF (AgroParisTech).
- Picard, N. 2007. Modélisation de la dynamique de forêts naturelles tropicales : quel niveau de description? Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc.
- Rutter, A.J., K.A. Kershaw, P.C. Robins and A.J. Morton. 1971. A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology*. 9:367-384.
- Savage, M. 1997. The role of anthropogenic influences in a mixed-conifer forest mortality episode. *Journal of Vegetation Science*. 8:95-104.
- Schneider, D.K. 1994. Modélisation de la démarche du décideur politique dans la perspective de l'intelligence artificielle. Université de Genève.
- Sudmeyer, R.A., J. Speijers and B.D. Nicholas. 2004. Root distribution of *Pinus pinaster*, *P. radiata*, *Eucalyptus globulus* and *E. kochii* and associated soil chemistry in agricultural land adjacent to tree lines. *Tree Physiology*. 24:1333-1346.
- Trajkovic, S. and S. Kolakovic. 2009. Evaluation of Reference Evapotranspiration Equations Under Humid Conditions. *Water Resources Management*. 23:3057-3067.
- Trajković, S. and V. Stojnić. 2007. Effect of wind speed on accuracy of Turc method in a humid climate. *Facta universitatis-series: Architecture and Civil Engineering*. 5:107-113.
- Valente, F., J.S. David and J.H.C. Gash. 1997. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *Journal of Hydrology*. 190:141-162.

- Van Dijk, A. and L.A. Bruijnzeel. 2001. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 2. Model validation for a tropical upland mixed cropping system. *Journal of Hydrology*. 247:239-262.
- Verstraeten, W.W., B. Muys, J. Feyen, F. Veroustraete, M. Minnaert, L. Meiresonne and A.D. Schrijver. 2005. Comparative analysis of the actual evapotranspiration of Flemish forest and cropland, using the soil water balance model WAVE. *Hydrology and Earth System Sciences*. 9:225-241.
- Zapater, M., C. Barlet, Y. Lefèvre, A. Granier and N. Bréda. 2008. Une pompe biologique performante : contribution des racines fines d'arbres forestiers dans le dessèchement des couches argileuses de sol lors d'épisodes de sécheresse. *SEC*. 1:103-111.
- Zhang, L. and W.R. Dawes. 1998. Model Description. *In WAVES: an integrated energy and water balance model*. Canberra, CSIRO. Lu Zhang and Warrick Dawes, pp 9-37.

Annexe

Annexe 1 : 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 rejoint 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. Un tore est obtenu (3) (d'après Courbaud et al., 2003).

