UCLouvain

AGRO LOUVAIN

Faculté des bioingénieurs

Impact du stress hydrique sur le développement de semis de chêne et de hêtre

Modélisation du fonctionnement hydraulique des semis soumis à une réduction des pluies

Auteur :	Gilles Tilman
Promoteurs :	Mathieu Jonard
	Valentin Couvreur
Lecteurs :	Quentin Ponette
	Caroline Vincke
Année Académique :	2023 - 2024
Formation :	Bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels

Remerciements

Je tiens à remercier plusieurs personnes sans qui ce mémoire n'aurait pas été possible.

Je tiens d'abord à remercier mes deux promoteurs, Mathieu Jonard et Valentin Couvreur, pour m'avoir suggéré ce mémoire et introduit au monde la recherche. Merci à eux pour leurs conseils, leurs encouragements, leur disponibilité et les pistes de réflexion qui m'ont permis d'aller plus loin.

Je remercie également Félix Guillaume pour les nombreuses heures passées dans le bois de Lauzelle pour la récolte des données et dans le laboratoire pour les analyses.

J'adresse mes remerciements à Sébastien François et à François Plume, membres de l'équipe technique de l'UCLouvain pour l'aide de la récolte des données et pour la manipulation des instruments. Sans eux, la qualité des données ne serait pas la même.

Je remercie aussi Frédéric André, Arthur Guignabert et Anne Doat pour leur aide d'analyse des données.

Merci à Quentin Ponette et Caroline Vincke d'avoir accepté d'être le lecteur et la lectrice de ce mémoire.

Enfin merci à ma famille et mes amis pour leurs encouragements dans les moments parfois difficiles, ainsi que pour leur intérêt et leurs relectures assidues.

Table des matières

Remerciements **2**

Liste des acronymes **6**

Liste des figures **9**

Liste des tableaux **10**

I Introduction 11

II État de l'art 14

1 Contexte du milieu forestier **14**

2 Changements climatiques **15**

3 Fonctionnement hydraulique des arbres **16**

3.1 Continuum sol-plante-atmosphère 16

3.2 Potentiel hydrique 17

3.3 Flux hydrique dans le xylème 17

3.4 Réponse de l'arbre au stress hydrique 18

3.5 Évolution de la conductivité hydraulique avec la hauteur 19

4 Modèles existants **20**

III Matériels et méthodes 22

1 Zone d'étude **22**

1.1 Contexte 22

1.2 Dispositifs expérimentaux 23

2 HETEROFOR **24**

2.1 Module phénologique 24

2.2 Module radiatif 25

2.3 Module du carbone 25

2.4 Module hydrique 26

2.5 Module de la défaillance hydraulique 27

2.6 Initialisation du modèle 27

3 Données nécessaires à l'initialisation d'HETEROFOR **28**

3.1 Données climatiques 28

3.2 Données sylvicoles 28

3.2.1 Peuplements 28

3.2.2 Biomasse des semis 29

3.2.3 Équations allométriques des semis 30

3.3 Données pédologiques 37

3.3.1 Densité apparente et fraction grossière 39

3.3.2 Rétention du sol 39

4 Suivi temporel du statut hydrique du sol et des semis **42**

4.1 Teneur en eau du sol 42

4.2 Potentiel hydrique du sol 42

4.3 Potentiel hydrique des semis 43

IV Résultats **44**

1 Variables observées **44**

1.1 Statut hydrique du sol 44

1.2 Statut hydrique des semis 45

2 Analyse des performances du modèle **46**

2.1 Paramétrisation des fichiers sols 46
2.2 Impact des courbes de rétention d'eau 48
2.3 Impact de la cavitation 50
2.4 Résultats généraux pour le statut hydrique 51
2.5 Impact des relations allométriques locales 53

3 Tests de différentes hypothèses pour expliquer les résultats de l'expérience de réduction des pluies 56

3.1 Impact de la distribution racinaire 56
3.2 Impact de la transpiration des arbres adultes 58
3.3 Impact de l'éclairement 59

V Discussion 61

VI Conclusion 62

Bibliographie 63

Liste des acronymes

ML maximum de vraisemblance (likelihood maximum).

PPB production primaire brute.
PPN production primaire nette.

RPA rayonnement photosynthétique actif.
RSS moindres carrés (residual sum of squares).

SLA surface spécifique des feuilles (specific leaf area).
SRL longueur spécifique des racines (specific root length).

Liste des figures

1 Intensité fonctionnelle du hêtre en fonction du potentiel hydrique des feuilles avant l'aube. Traduit depuis Walthert et al. (2021) 19

2 Courbe de vulnérabilité représentant la perte de conductivité (PLC) en fonction du potentiel hydrique dans les branches de hêtres adultes. Traduit depuis Walthert et al. (2021) 19

3 Localisation des six placettes d'étude dans le bois de Lauzelle, chacune d'entre elles comprenant une unité de traitement et une unité témoin. 23

4 Exemple d'une unité traitement avec un toit localisée dans la deuxième zone de chêne (CH2) (REGE+, 2022). 24

5 Représentation de HETEROFOR, modèle mécaniste composé des modules radiatif (jaune), hydrique (bleu), carbone (vert) et phénologique (orange) 25

6 Représentation du module hydrique d'HETEROFOR, traduite depuis de Wergifosse et al. (2020) 27

7 Méthodes de régression pour l'équation allométrique du diamètre au collet en fonction de la hauteur (Eq. 14) 32

8 Régression orthogonale des relations allométriques pour le chêne (jaune) et le hêtre (violet) pour l'équation 14 avec un intervalle de confiance de 95 % 32

9 Méthodes de régression pour l'équation allométrique de la biomasse ligneuse aérienne en fonction de la hauteur et du diamètre au collet (Eq. 15) 33

10 Régression orthogonale des relations allométriques pour le chêne (jaune) et le hêtre (violet) pour l'équation 15 avec un intervalle de confiance de 95 % 34

11 Méthodes de régression pour l'équation allométrique de la biomasse des feuilles en fonction du diamètre au collet (Eq. 16) 35

12 Régression orthogonale des relations allométriques pour le chêne (jaune) et le hêtre (violet) pour l'équation 16 avec un intervalle de confiance de 95 % 36

13 Méthodes de régression pour l'équation allométrique du Root/Shoot ratio en fonction de la hauteur (Eq. 17) 36

14 Régression orthogonale des relations allométriques pour le chêne (jaune) et le hêtre (violet) pour l'équation 17 avec un intervalle de confiance de 95 % 37

15 Courbes de rétention selon van Genuchten (1980) construites sur base des teneurs en eau et des potentiels matriciels mesurés 41

16 Évolution des contenus en eau observés au cours du temps par espèce et par traitement 44

17 Évolution des potentiels hydriques du sol observés au cours du temps par espèce et par traitement 45

18 Évolution des potentiels hydriques des semis observés au cours du temps par traitement pour la zone HE3 46

19 Évolution des contenus en eau prédits et observés au cours du temps par espèce et par traitement en utilisant les fichiers sols avec les courbes de rétention en eau fournies par défaut par HETEROFOR sur base des fonctions de pédotransfert de Weynants et al. (2009) 47

20 Évolution des contenus en eau prédits par horizon au cours du temps par espèce et par traitement en utilisant les fichiers sols avec les courbes de rétention en eau fournies par défaut par HETEROFOR sur base des fonctions de pédotransfert de Weynants et al. (2009) 48

21 Comparaison des évolutions des contenus en eau prédits et observés au cours du temps par espèce et par traitement en utilisant ou non les courbes de rétention locales 49

22 Évolution des contenus en eau prédits par horizon au cours du temps par espèce et par traitement en utilisant ou non les courbes de rétention locales 50

23 Comparaison des évolutions des contenus en eau prédits et observés au cours du temps par espèce et par traitement en utilisant ou non le module de cavitation . 51

24 Évolution des contenus en eau observés et prédits ainsi que de la transpiration prédite au cours du temps par espèce et par traitement en utilisant le module de cavitation 52

25 Évolution des potentiels hydriques du sol, de la tige et des feuilles des semis observés au cours du temps par espèce et par traitement en utilisant le module de cavitation 53

26 Accroissements mesurés et simulés en fonction de la hauteur des semis distingués par année de croissance et par essence 54

27 Régression orthogonale entre les valeurs observées et prédites des accroissements pour le chêne (jaune) et le hêtre (violet) avec un intervalle de confiance de 95% . 55

28 Comparaison des évolutions du contenu en eau du sol prédit et observé au cours du temps par espèce et par traitement en fonction de la proportion racinaire dans les 30 premiers centimètres de profondeur 57

29 Comparaison des évolutions du potentiel hydrique du sol prédit et observé au cours du temps par espèce et par traitement en fonction de la proportion racinaire dans les 30 premiers centimètres de profondeur 58

30 Comparaison des évolutions du contenu en eau du sol prédit et observé au cours du temps par espèce et par traitement en fonction de la transpiration de la futaie 59

31 Comparaison des évolutions du contenu en eau du sol prédit et observé au cours du temps par espèce et par traitement en fonction de la surface terrière après éclaircie 60

A1 Transformation du scan des feuilles du semis de la classe 51-100cm de la zone HE1 en image binaire à l'aide du logiciel ImageJ 68

A2 Distribution des sols dans le bois de Lauzelle (SPW, 2015) 68

A3 Modèle Numérique de Terrain du bois de Lauzelle (Schenke, s. d.) 69

A4 Comparaison des évolutions du potentiel hydrique des semis prédit et observé au cours du temps par espèce et par traitement en fonction de la proportion racinaire dans les 30 premiers centimètres de profondeur 72

A5 Comparaison des évolutions du potentiel hydrique du sol prédit et observé au cours du temps par espèce et par traitement en fonction de la transpiration de la futaie 73

A6 Comparaison des évolutions du potentiel hydrique des semis prédit et observé au cours du temps par espèce et par traitement en fonction de la transpiration de la futaie 73

A7 Comparaison des évolutions du potentiel hydrique du sol prédit et observé au cours du temps par espèce et par traitement en fonction de la surface terrière après éclaircie 74

A8 Comparaison des évolutions du potentiel hydrique des semis prédit et observé au cours du temps par espèce et par traitement en fonction de la surface terrière après éclaircie 74

Liste des tableaux

1 Classes de hauteur en centimètres définies pour le chêne et le hêtre 29

2 Indicateurs statistiques pour les équations allométriques du diamètre au collet en fonction de la hauteur 32

3 Indicateurs statistiques pour les équations allométriques de la biomasse ligneuse aérienne en fonction de la hauteur et du diamètre au collet 34

4 Indicateurs statistiques pour les équations allométriques de la biomasse des feuilles en fonction du diamètre au collet 35

5 Indicateurs statistiques pour les équations allométriques Root/Shoot ratio en fonction de la hauteur 37

6 Description du profil de la zone HE1 38

7 Comparaison des profondeurs des horizons pour les zones de chêne et de hêtre . 39

8 Sondes PSY1 et période d'installation, C étant pour l'unité témoin et T pour le traitement 43

A1 Paramètres des courbes de rétention selon van Genuchten (1980) et indicateurs statistiques 70

A2 Répartition des racines dans les horizons pour les sols des zones de chêne et de hêtre. Chaque colonne correspond aux répartitions testées, avec le pourcentage de racines dans les 30 premiers centimètres ($\%_{30cm}$) 71

Introduction

Les forêts jouent un rôle primordial pour la société humaine depuis des milliers d'années. Anciennement utilisées uniquement pour leur source de nourriture et de matériau, de nouvelles fonctions ont émergé ces dernières décennies. Le concept de service écosytémique est apparu pour désigner tous les bénéfices octroyés à l'homme par la forêt. Ceux-ci regroupent des services à petite échelle comme des zones récréatives, une protection des sols et du cycle de l'eau pour les populations locales, mais aussi plus globalement pour la séquestration du carbone et la protection de la biodiversité (Alcamo et al., 2003).

Un nouvel enjeu est apparu à la fin du XX^{e} siècle, déstabilisant certaines méthodes de gestion et nécessitant une révision de la sylviculture. Le réchauffement climatique est responsable jusqu'à aujourd'hui d'une hausse de 1,1 °C à la surface de la Terre. En fonction de la réduction ou non des émissions de gaz à effet de serre liés à l'activité humaine, cette augmentation pourrait stagner à 1,5 °C ou doubler voir tripler d'ici la fin du XXI^{e} siècle. Les impacts du réchauffement climatique sont déjà ressentis par les écosystèmes, particulièrement en Wallonie où la température moyenne annuelle des 30 dernières années a augmenté de 1,9 °C par rapport à l'ère pré-industrielle (Calvin et al., 2023 ; Lamarque et al., 2022).

Les impacts du changement climatique sont multiples sur les milieux forestiers. L'augmentation de la fréquence des évènements extrêmes comme les vagues de chaleur, la sécheresse ou les tempêtes nuit à la vitalité des arbres. De plus, la rapidité des changements des conditions atmosphériques ne leur permet pas de s'adapter. Les essences sélectionnées par les gestionnaires au cours du siècle dernier deviennent inadéquates sur certaines stations forestières et doivent être abattues prématurément. C'est le cas récemment avec la vague de scolytes qui a touché les épicéas communs fragilisés par les sécheresses successives de 2018 à 2020 (Calvin et al., 2023 ; Lamarque et al., 2022).

La gestion forestière se doit de se tourner vers des méthodes favorisant la résilience des forêts. Celle-ci est favorisée par la diversité des modes de gestion utilisés mais aussi par la pluralité des espèces favorisées dans les peuplements. C'est à travers la complexité des interactions entre les espèces, l'hétérogénéité verticale des structures des peuplements et la mise en valeur de la richesse génétique des forêts que peut être améliorée la résilience. Ces modes de pensée ont contribué à la popularisation de la sylviculture mixte à couvert continu, mise en avant par de nombreuses associations comme Pro Silva et Forêt Nature en Belgique (ProSilva, s. d.).

Pour être mieux préparé aux changements climatiques, il est nécessaire d'accroître les connaissances sur les dangers qui menacent les forêts. C'est dans ce cadre que le projet REGE+ a été lancé. Celui-ci réunit des chercheurs et professeurs des universités UCLouvain et ULiège Gembloux Agro-Bio Tech ainsi que de l'Institut Royal Météorologique. L'objectif du projet est d'évaluer l'impact de différents modes de gestion sylvicole sur les services écosystémiques, la régénération des peuplements et la conservation des sols. Les modes de gestion seront simulés grâce à la modélisation et plus particulièrement grâce au modèle HETEROFR, qui décrit la dynamique forestière sur base d'une approche spatialement explicite. L'expérience de REGE+ se retrouve dans plusieurs forêts à travers la Wallonie.

Ce mémoire se concentre sur les dispositifs du bois de Lauzelle qui visent à étudier la réponse des semis de chêne et de hêtre à une réduction des précipitations (REGE+, 2022).

Le stress hydrique est l'une des problématiques au cœur du changement climatique. Il est impératif de mieux comprendre les mécanismes mis en place par les arbres pour y faire face. Le transport de l'eau dans les arbres en conditions humides s'effectue passivement. Les stomates des feuilles s'ouvrent pour utiliser le dioxyde de carbone atmosphérique afin de réaliser la photosynthèse. L'eau également nécessaire à celle-ci est puisée dans le sol et s'élève dans la plante grâce à un gradient de potentiel hydrique entre le sol et les stomates des feuilles. En cas de stress hydrique, les arbres vont progressivement fermer leurs stomates pour limiter les pertes d'eau. Cette réaction s'accompagne toutefois d'un manque de production d'énergie puisqu'ils ne sont plus en mesure d'effectuer la photosynthèse. Si le stress se prolonge, l'arbre peut subir une rupture de la colonne d'eau à cause d'une tension trop élevée dans le xylème. Dans les cas extrêmes, l'arbre est contraint de sacrifier les organes non essentiels à sa survie. Ces conséquences peuvent à terme provoquer la mort de l'arbre (Walthert et al., 2021).

Ce mémoire se base sur une expérience de réduction des pluies qui vise à en évaluer l'impact sur le développement de semis de chêne et de hêtre. Il a nécessité des mesures de croissance des semis ainsi que le suivi du statut hydrique du sol et des semis. Trois zones d'étude ont été sélectionnées dans des hêtraies comportant de la régénération naturelle de hêtre et trois autres ont été choisies au sein d'une chênaie avec de la régénération naturelle de chêne. Chaque zone d'étude comporte une unité témoin et une unité de traitement dans laquelle les précipitations sont limitées à 33% grâce à un toit transparent. L'objectif du mémoire est d'interpréter les résultats de l'expérience d'exclusion des pluies à l'aide de la modélisation. Le modèle HETEROFOR a été utilisé pour reproduire la dynamique temporelle de la teneur en eau du sol (30 premiers centimètres), du potentiel hydrique de la tige et des feuilles ainsi que de la croissance en hauteur des semis (de Wergifosse et al., 2020 ; Jonard et al., 2020).

Les analyses de la teneur en eau du sol ont montré que le sol des unités de traitement étaient plus secs que les unités témoins, conformément aux objectifs de la mise en place du dispositif de réduction des pluies. L'évolution au cours du temps du potentiel hydrique des semis ne suit cependant pas la tendance du sol. Les potentiels hydriques des semis de l'unité témoin étaient plus négatifs que ceux de l'unité de traitement.

Pour tenter d'expliquer ces analyses inattendues, les trois hypothèses suivantes seront testées grâce à la modélisation.

Impact de la distribution racinaire

La réduction des pluies et donc de la teneur en eau du sol pourrait avoir une influence sur la distribution verticale des racines dans le sol. La distribution des racines sera donc modifiée pour déplacer les racines plus en profondeur et essayer de mieux reproduire la dynamique temporelle de la teneur en eau du sol sous les toits. Cette redistribution en profondeur pourrait expliquer les potentiels hydriques moins négatifs observés sous le toit par rapport à l'unité témoin.

Impact de la transpiration des arbres adultes

En plus du dispositif de réduction des pluies, une bâche a été installée dans toutes les unités pour éviter une redistribution de l'eau par diffusion entre le sol situé sous les toits et celui localisé à l'extérieur. L'installation de ces bâches pourrait néanmoins avoir nui au système racinaire des arbres composant la futaie. Le sol des unités de traitement aurait ainsi été moins

asséché par la transpiration des arbres adultes. La réponse du modèle face à différents taux de transpiration des arbres adultes pourra permettre d'appuyer ou non cette hypothèse.

Impact de l'éclairement relatif local

Une troisième hypothèse principale pourrait provenir de la différence d'exposition locale des unités. Pendant toute la durée de l'étude, l'unité témoin a reçu trois fois plus d'éclairement que l'unité de traitement. Des éclaircies seront ainsi simulées pour tester l'effet d'éclairement sur le statut hydrique du sol et des semis.

Avant de vérifier ces hypothèses, un contexte plus détaillé des changements climatiques et leur impact sur les forêts sera présenté dans l'État de l'art. Ce chapitre comprendra également une description du fonctionnement hydraulique des arbres et des conséquences du stress hydrique. Les matériels et méthodes détailleront ensuite les campagnes de mesures et leur contexte. Le modèle HETEROFOR sera également présenté. Les résultats veilleront à comparer les prédictions du modèle et les observations, ainsi qu'à valider ou non les hypothèses sur le potentiel hydrique des semis. Ce travail se terminera par une conclusion résumant les performances du modèle ainsi que son aptitude à expliquer les différentes hypothèses émises.

État de l'art

1 Contexte du milieu forestier

Les forêts jouent un rôle primordial dans la société depuis des millénaires. Après la dernière période glaciaire et depuis le début de l'holocène en 11 700 AC, elles ont progressivement colonisé l'espace. L'espèce humaine commence par utiliser la forêt principalement comme source de nourriture. Pendant le néolithique, l'Homme commence à cultiver et donc déboiser les forêts par besoin d'espace, de matériaux de construction et d'énergie (Jacquemin et al., 2014). Ce défrichement ne cesse de s'intensifier jusqu'à la fin du Moyen-Age où les premières réglementations émergent pour limiter la déforestation. Pour satisfaire ses besoins de plus en plus importants, l'Homme a besoin d'améliorer la production. Par conséquent, il commence à établir des aménagements forestiers.

Les plus anciennes données de superficie forestière pour la Belgique proviennent de la carte de Ferraris (1771). Grâce à cette dernière, il peut être estimé que 520 000 à 550 000 hectares de forêts publiques et privées couvraient le sol belge. Au début du XIX^{e} siècle, l'essence majoritaire est le chêne après des siècles de sélection par l'Homme. Le chêne est cultivé en taillis et en taillis sous futaie principalement pour la production de charbon, mais aussi pour le bois d'œuvre et les traverses de chemins de fer (Tuilier, 2004). La pression démographique entraîne le défrichement des terres les plus fertiles au profit de l'agriculture. Les besoins en produits ligneux ne baissent pas pour autant, réduisant la superficie forestière au minimum enregistré (Tuilier, 2004). L'approvisionnement en bois doit donc être repensé. La deuxième moitié du XIX^{e} est marquée par le premier Code forestier belge de 1854 et la loi du 25 mars 1847 sur le défrichement des terres incultes qui réduit les terres de pâturage et de lande (Jacquemin et al., 2014). L'application de cette loi rencontre cependant des difficultés avec les propriétaires souhaitant conserver leur pâturage et continuer la vente de genêt et de bruyère. Les premiers essais de plantations de résineux poussées par les pépinières domaniales subissent plusieurs échecs, décourageant ainsi davantage les propriétaires. En plus de cela, la consommation industrielle de charbon de bois baisse et les taillis perdent leur intérêt. Le marché belge du bois est mis à mal, ce qui provoque une augmentation de l'importation des bois scandinaves. L'enrésinement commence véritablement au XX^{e} siècle avec les propriétaires privés souhaitant relancer le marché belge en trouvant des méthodes de gestion pour remplacer le taillis (Tuilier, 2004). Les plantations de résineux et les coupes rases commencent alors à se répandre. Le pin sylvestre et l'épicéa sont les deux grandes essences implantées aux XIX^{e} et XX^{e} siècles, suivies ensuite par le mélèze, le douglas et les sapins (Latte et al., 2022).

En parallèle des méthodes traditionnelles de gestion sylvicole, le "jardinage" émerge dans plusieurs pays d'Europe. Celui-ci vise à traiter les peuplements de manière irrégulière. Gurnaud et Biolley sont parmi les premiers à promouvoir l'irrégularisation des peuplements à la fin du XIX^{e} siècle (Pommerening, 2004). De Liocourt remarque en 1898 une baisse exponentielle du nombre de tiges par classe de circonférence (De Liocourt, 1898). Cette relation servira de référence pour maintenir un équilibre au niveau des classes d'âge. En Allemagne, le concept

de *Dauerwald*, qui peut être traduit par "forêt continue", est proposé par Möller (1922). Il lui attribue les caractéristiques suivantes : absence de coupe rase, sélection d'arbres vigoureux, abandon des concepts de classes d'âge et de rotation et préférence de la régénération naturelle (Helliwell, 1997). Ce terme est ensuite repris et appliqué par Troup (1927) en ajoutant la conservation de rémanents dans les peuplements. Les prémices de la sylviculture mixte à couvert continu (SMCC) sont donc présents en Europe mais connaissent cependant un déclin jusqu'à la moitié du XX^{e} siècle. De 1960 à 1980, des réunions rassemblant des acteurs de la sylviculture périalpine relancent le recours aux méthodes de gestion proches de la nature. En Allemagne, l'association ANW (*Arbeitsgemeinschaft Naturgemäße Waldwirtschaft* - "Groupe de travail sur l'économie forestière naturelle") regroupant des propriétaires privés, des scientifiques et des experts forestiers poursuit l'objectif de gérer les forêts de façon durable. En 1989 est créé Pro Silva sur base des idées de Möller dans l'objectif d' « évoluer vers une gestion globale de l'écosystème forestier, afin de garantir sa productivité et sa stabilité » (ProSilva, s. d.). L'arrivée progressive de la conscience climatique, et particulièrement avec les Objectifs de Développement Durable du sommet de la Commission des Nations Unies à Rio de Janeiro en 1992 ne fait qu'accroître l'intérêt pour la gestion durable.

Depuis plus d'un demi-siècle, la sylviculture mixte à couvert continu revient sur le devant de la scène. Elle est poussée par la diversité des enjeux auxquels la forêt fait face. La production de bois doit maintenant être combinée à d'autres services écosystémiques. Selon le *Millennium Ecosystem Assessment*, les services écosystémiques sont les bénéfices que retirent les hommes des écosystèmes. Ils comprennent 4 types de services principaux (Alcamo et al., 2003) :

- Services d'approvisionnement : approvisionnement en nourriture issue des plantes et des animaux, en eau, en matériaux, en énergie, en ressources génétiques et en médicaments.
- Services de régulation : régulation du climat, des maladies, du cycle de l'eau et de la pollinisation
- Services culturels : bénéfices éducationnels, esthétiques, culturels, récréationnels et spirituels
- Services de soutien : services indirects permettant l'existence des autres services : formation des sols, production d'oxygène, cycle des nutriments, cycle de l'eau et zone d'habitat

L'ensemble de ces services écosystémiques se voit être menacé par le changement climatique si la gestion forestière ne s'y adapte pas.

2 Changements climatiques

Selon le rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Calvin et al., 2023), les activités humaines sont responsables du réchauffement climatique qui se traduit par une augmentation de 1,1 °C à la surface de la Terre entre 1850-1900 et 2021-2020. Le réchauffement climatique augmente le risque d'aléas (évènements climatiques extrêmes tels que vagues de chaleur, sécheresses, fortes précipitations, cyclones, etc.) desquels découlent des impacts comme l'augmentation de l'insécurité alimentaire, la perte de biodiversité et la propa-

gation de maladies (Lamarque et al., 2022). Le réchauffement global atteindra probablement 1,5°C d'ici 2040, exacerbant ainsi les impact mentionnés. Le GIEC prévoit 3 scénarios principaux pour lesquels la surface de la Terre augmenterait de 1,9 °C, 2,7 °C ou 4,4 °C pour 2100. Ces scénarios diffèrent en fonction de la réduction des émissions de gaz à effet de serre issues de l'activité humaine durant les prochaines décennies.

La Wallonie est également soumise aux effets du réchauffement climatique. En plus d'une hausse de la température moyenne annuelle, une augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur en été ainsi que des fortes précipitations est attendue (Lamarque et al., 2022). La distribution des précipitations au cours de l'année pourrait aussi être modifiée, avec une augmentation des précipitations hivernales et une baisse des précipitations estivales. Les précipitations totales annuelles devraient diminuer (Termonia et al., 2018). Pour les vents, les conséquences du changement climatique sont plus incertaines mais la hausse des instabilités atmosphériques causée par les vagues de chaleur et les précipitations pourrait provoquer des tempêtes plus fréquentes (Lamarque et al., 2022).

Les effets du changement climatique sont déjà observés en Wallonie. Sur les 30 dernières années, la température moyenne a augmenté de 1,9°C et les précipitations hivernales ont connu une hausse de 31% (Lamarque et al., 2022). Ces changements jouent un rôle sur la composition, la diversité et le fonctionnement des écosystèmes forestiers à cause de la capacité très limitée de migration et d'adaptation des arbres (Claessens et al., 2017).

C'est dans ce contexte que la modélisation de l'évolution des peuplements forestiers intervient. La gestion forestière a la particularité d'être une gestion qui dépasse plusieurs générations humaines. Il est donc difficile d'appréhender l'impact à long terme de différentes méthodes de gestion sur les peuplements forestiers. La modélisation sert ainsi de laboratoire virtuel en démultipliant le nombre d'hypothèses pouvant être testées.

Avant de présenter les moyens actuels de modélisation, il est toutefois nécessaire d'introduire quelques concepts théoriques. Puisque l'objectif de ce mémoire est d'interpréter le bilan hydrique de semis soumis à une réduction des pluies, les concepts qui seront détaillés concernent le fonctionnement hydraulique des arbres.

3 Fonctionnement hydraulique des arbres

3.1 Continuum sol-plante-atmosphère

La disponibilité en eau est essentielle aux arbres. En plus d'être indispensable à la photosynthèse, elle assure des fonctions vitales telles que l'absorption de nutriments, la régulation de la température foliaire et l'hydratation des organes aériens (Vincke, 2022). Le transport de l'eau au niveau des arbres suit un gradient entre le potentiel hydrique du sol et de l'atmosphère, selon la théorie de tension-cohésion de Dixon et Joly (1895). Le terme tension-cohésion provient de la tension créée par la différence de potentiel hydrique entre l'eau qui s'évapore au niveau des stomates et le potentiel hydrique du sol. La tension permet ainsi à l'eau de s'élever dans la plante sous la forme d'une colonne d'eau dans le xylème à partir de potentiels hydriques moins négatifs vers des potentiels hydriques plus négatifs. Cette différence de potentiel est due au fait que lorsque les stomates des feuilles s'ouvrent pour effectuer la photosynthèse,

elles transpirent. L'eau transpirée s'évapore alors dans l'atmosphère, ce qui crée une chute du potentiel hydrique au niveau des feuilles (Ryan & Yoder, 1997 ; Taiz et al., 2015). Le potentiel hydrique du sol est quant à lui moins négatif grâce à la présence d'eau liquide provenant des précipitations ou de la nappe phréatique. La cohésion permet à la colonne d'eau de rester continue grâce aux ponts hydrogènes des molécules d'eau (Tyree & Sperry, 1989). Le lien entre le sol, la plante et l'atmosphère est de ce fait appelé continuum sol-plante-atmosphère.

3.2 Potentiel hydrique

Le potentiel hydrique désigne, en physiologie végétale, l'énergie libre de l'eau à différents niveaux de la plante. Les principaux facteurs influençant cette énergie libre sont la pression, la gravité et la concentration en solutés (Draye & Lutts, 2020 ; Taiz et al., 2015). Le potentiel hydrique ψ $[MPa]$ peut ainsi être défini par la somme de trois composantes : la pression hydrostatique ψ_p, le potentiel gravitationnel ψ_g et la pression osmotique ψ_s.

$$\psi = \psi_p + \psi_g + \psi_s \tag{1}$$

La pression hydrostatique ψ_p est relative à la pression atmosphérique. Elle est souvent appelée turgescence en cas de pression positive à l'intérieur des cellules et tension en cas de pression négative comme dans le xylème ou dans les parois (Draye & Lutts, 2020 ; Taiz et al., 2015). Le potentiel gravitationnel ψ_g est dû à la gravité et à l'énergie nécessaire pour aller à son encontre. Il est donc fonction de la hauteur dans la plante. Le potentiel gravitationnel augmente de 0,1 MPa pour une différence de 10 mètres de hauteur (Taiz et al., 2015). Cette deuxième composante est souvent négligée pour les petites plantes mais elle devient néanmoins importante pour les arbres adultes hauts de plusieurs dizaines de mètres (Couvreur et al., 2018 ; Taiz et al., 2015). La pression osmotique prend en compte la présence de solutés et leur impact sur le potentiel de l'eau. Cette pression dépend de la concentration des solutés, mais pas de leur nature. La présence de solutés tend à augmenter l'entropie de la solution et ainsi diminuer son énergie libre (Draye & Lutts, 2020 ; Taiz et al., 2015).

3.3 Flux hydrique dans le xylème

Dans le cas du transport des racines vers les feuilles, plus de 99,5% de l'eau passe par le xylème selon la loi de Poiseuille (Équation 2). Le flux hydrique Q $[kg/s]$ revient à multiplier le gradient de pression potentielle normalisé par unité de longueur $\frac{\Delta_{\psi_p}}{\Delta_x}$ par la quatrième puissance du rayon du xylème r $[m]$ divisée par la viscosité dynamique η $[MPa/s]$. La masse volumique ρ $[kg/m^3]$ permet ensuite de convertir le flux volumique en flux massique.

$$Q = \left(\frac{\pi r^4}{8\eta}\right)\left(\frac{\Delta\psi_p}{\Delta x}\right)\rho \tag{2}$$

En plus d'être dépendant du gradient du potentiel hydrique, le flux hydrique axial dans les plantes est ralenti à cause de la friction avec les parois du xylème. De manière générale, les pertes liées à la friction peuvent être déterminées grâce à la différence de potentiel hydrique

le long du xylème si l'on considère que les composantes gravitationnelles et osmotiques de l'équation 1 sont nulles (Sanderson et al., 1988). Ainsi, les pertes liées à la friction sont égales au gradient de potentiel hydrique et donc au flux hydrique divisé par la conductance du xylème K $[kg.m/m^2.s.MPa]$ (Équation 3). En remplaçant la conductance par la conductivité k $[kg/s.MPa]$ selon l'équation 4, on obtient l'équation 5. Les pertes liées à la friction augmentent ainsi lorsque le nombre de vaisseaux et leur taille diminuent (A $[m^2]$) et lorsque que le flux hydrique Q et la longueur de segment L $[m]$ augmentent.

$$K = \frac{Q}{\psi_p} \tag{3}$$

$$k = K\frac{L}{A} \tag{4}$$

$$\psi_p = \frac{QL}{kA} \tag{5}$$

Le potentiel hydrique baisse d'autant plus pour les arbres en ajoutant la composante gravitationnelle. Les gradients de potentiels hydriques entre les feuilles et le sol augmentent ainsi inévitablement avec la hauteur des arbres (Ryan & Yoder, 1997).

3.4 Réponse de l'arbre au stress hydrique

En conditions idéales pour leur développement et leur croissance, les arbres prélèvent de l'eau dans la réserve utile du sol pour satisfaire la demande évaporative des feuilles et effectuer la photosynthèse. En cas de période de sécheresse, les arbres ferment progressivement les stomates de leurs feuilles. Cela permet de limiter leur consommation en eau et de baisser le potentiel hydrique des feuilles, mais en contrepartie diminue la production d'énergie. En cas de stress prolongé, l'arbre ferme intégralement ses stomates pour éviter l'apparition de cavitation. Ce phénomène peut subvenir lorsque la tension dans le xylème est trop élevée, créant ainsi des bulles de gaz. Ces dernières peuvent s'étendre jusqu'à occuper toute une section de xylème, interrompant ainsi la colonne d'eau (Taiz et al., 2015). La rupture de la colonne d'eau provoquée par la cavitation est appelée embolie, qui engendre à son tour une baisse de la conductivité hydraulique du xylème (Tyree & Sperry, 1989). Une autre réponse de l'arbre en cas de sécheresse prolongée consiste à sacrifier certains organes non essentiels à la survie de l'arbre. Ainsi, les feuilles et les branches les plus éloignées sont sacrifiées pour limiter au maximum la dépense d'énergie liée à la maintenance de ces tissus. L'apparition de ces phénomènes à différents niveaux de stress est synthétisée à la figure 1 (Walthert et al., 2021).

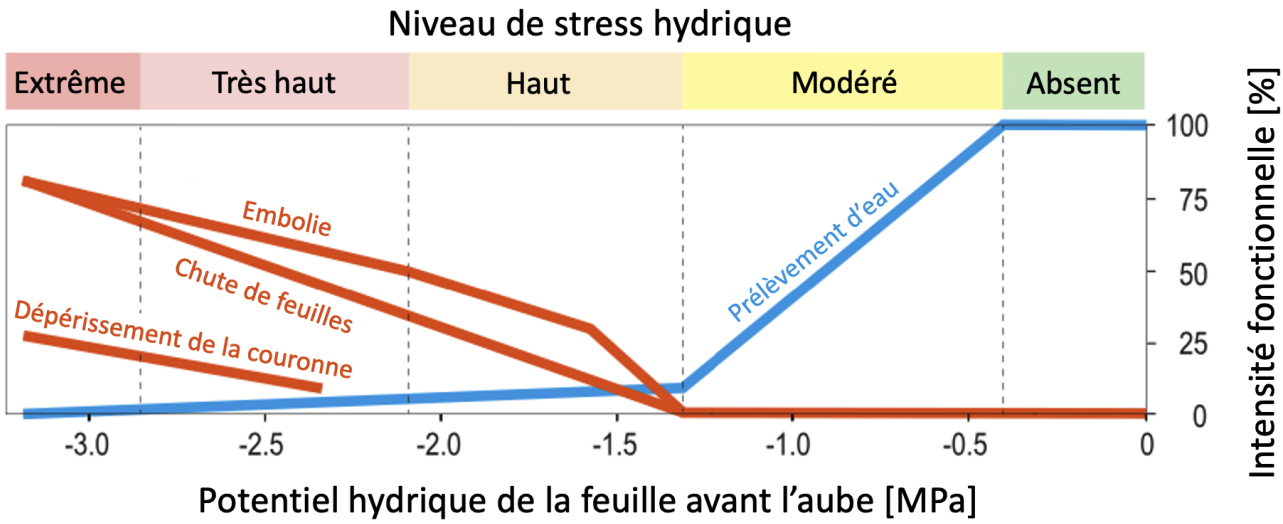

FIGURE 1 – Intensité fonctionnelle du hêtre en fonction du potentiel hydrique des feuilles avant l'aube. Traduit depuis WALTHERT et al. (2021)

Les stratégies mises en place pour faire face aux stress hydriques varient d'espèces en espèces (RYAN et al., 2006). Elles tendent néanmoins à réduire l'épaisseur des vaisseaux de xylème pour les organes les plus en hauteur, qui sont ceux où la tension et par conséquent le risque d'embolie sont les plus élevés (JOHNSON et al., 2016).

La sensibilité du xylème à la cavitation peut être évaluée grâce aux courbes de vulnérabilité. Celles-ci permettent de caractériser la perte de conductivité selon le potentiel hydrique dans le xylème. L'allure de ces courbes est sigmoïdale, avec deux paramètres : a $[1/MPa]$, un facteur de forme et b $[MPa]$, le potentiel hydrique pour lequel la conductivité équivaut à 50% de la conductivité à saturation k_s (Équation 6) (PAMMENTER & WILLIGEN, 1998). Le coefficient b est également appelé $P50$.

$$PLC = \frac{100}{1 + e^{a(\psi - P50)}} \tag{6}$$

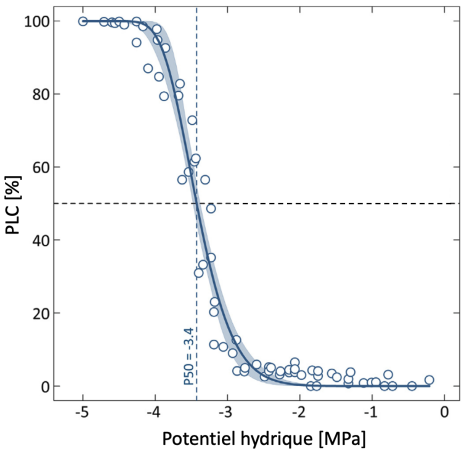

FIGURE 2 – Courbe de vulnérabilité représentant la perte de conductivité (PLC) en fonction du potentiel hydrique dans les branches de hêtres adultes. Traduit depuis WALTHERT et al. (2021)

3.5 Évolution de la conductivité hydraulique avec la hauteur

En plus de varier avec le potentiel hydrique, la conductivité hydraulique est influencée par la hauteur des arbres. Elle peut être caractérisée en fonction du Huber-ratio H $[cm^2/m^2]$, qui correspond à la section du xylème à une certaine hauteur divisée par la surface foliaire alimentée

par ce xylème (Équation 7) (Couvreur et al., 2018). Le Huber-ratio a tendance à diminuer avec la hauteur, surtout pour le tronc puisque la section du xylème diminue alors que la surface foliaire reste identique.

$$H = \frac{A_{xylème}}{S_{feuilles}} \tag{7}$$

La baisse du Huber-ratio avec la hauteur peut être estimée selon une relation linéaire. Puisque la conductivité varie également avec la hauteur, il est nécessaire d'adapter les paramètres a et $P50$ de l'équation 6. Une analyse de sensibilité a révélé que le paramètre de forme a influençait peu les courbes de vulnérabilité (Couvreur et al., 2018). Le $P50$ est lui aussi exprimé comme une relation linéaire avec la hauteur, en utilisant la valeur de $P50$ au sommet de l'arbre $P50_{top}$ et un paramètre $P50_s$ tenant compte de la baisse de $P50$ avec la hauteur (Équation 8). L [m] représente le chemin hydraulique jusqu'au sommet de l'arbre et z [m] la position au niveau de ce chemin.

$$P50 = P50_{top} + P50_s\,(L - z) \tag{8}$$

La conductivité à saturation de la tige k_s dépend de la conductivité à saturation à la base du tronc k_0, de la fraction du chemin hydraulique Z_{50} pour laquelle k est égale à la moitié de k_0 et de k_{exp} un facteur de forme :

$$k_s = \frac{k_0}{1 + \left(\frac{z}{Z_{50}L}\right)^{k_{exp}}} \tag{9}$$

4 Modèles existants

La gestion forestière a la particularité de dépasser plusieurs générations humaines. Il est donc difficile d'appréhender l'impact à long terme de différentes méthodes de gestion sur les peuplements forestiers. La modélisation sert ainsi de laboratoire virtuel en démultipliant le nombre d'hypothèses à tester.

Dans le cadre d'une étude sur le statut hydrique de semis, il est indispensable de prendre en compte les interactions entre les arbres adultes pour déterminer la fraction de la lumière qui atteint les semis. Pour ce faire, le modèle nécessite d'être à l'échelle de l'individu. Cela signifie que les calculs doivent être effectués pour tous les individus composant un peuplement, tout en tenant compte de leurs interactions. Le modèle doit également se baser sur des processus écophysiologiques et biogéochimiques et non sur des relations empiriques pour pouvoir être répliqué sur d'autres cas d'étude. Dans le cas d'une évolution sur plusieurs années, il doit aussi tenir compte de la photosynthèse pour estimer l'allocation en carbone dans les tissus et la croissance des individus (Jonard et al., 2020).

Une multitude de modèles ont été développés durant les dernières décennies pour tenter de répondre aux questions de leurs créateurs. Leur conception varie fortement en fonction des objectifs recherchés. Pretzsch et al. (2015) a passé en revue 54 modèles de croissance

forestiers différents. Parmi eux, 36 sont des modèles basés sur des processus et non sur des équations empiriques. 16 d'entre eux sont effectués à l'échelle de l'arbre, 11 à l'échelle d'une cohorte et 9 à l'échelle du peuplement. Seul le modèle BALANCE (Grote & Pretzsch, 2002) prend en compte le transfert de radiation, le cycle de l'eau et la phénologie tout en permettant d'effectuer des simulations à long terme. Il fonctionne cependant par pas de temps de 10 ans et n'est pas adapté pour le suivi de quelques années. Il est également le seul à prendre en compte la disponibilité en azote, mais omet les autres nutriments comme le calcium, le potassium, le phosphore et le magnésium (Jonard et al., 2020). Le modèle HETEROFOR a été développé pour mieux intégrer la disponibilité en nutriments et les variations climatiques en calculant la photosynthèse à pas de temps horaire et utiliser la loi de Darcy pour le statut hydrique du sol.

Matériels et méthodes

1 Zone d'étude

1.1 Contexte

L'expérience de réduction des pluies sur laquelle se base ce mémoire a été mise en place dans le cadre du projet REGE+. Ce projet est mené en collaboration par l'UCLouvain, l'ULiège Gembloux Agro-Bio Tech et l'Institut Royal Météorologique. Ses objectifs sont d'évaluer l'impact de différents modes de gestion sylvicole sur les services écosystémiques, la régénération des peuplements et la conservation des sols (REGE+, 2022). Les zones d'étude de REGE+ sont dispersées dans plusieurs forêts wallonnes. Ce mémoire ne se concentre néanmoins que sur le bois de Lauzelle.

Le bois de Lauzelle est une forêt couvrant 203 hectares. Il est la propriété de l'Université Catholique de Louvain. Sa gestion est assurée d'une part par le département des sciences forestières du Earth and Life Institute (ELI) de la faculté des bioingénieurs de l'UCLouvain et d'autre part par l'ADPI/GPEX, l'administration du patrimoine immobilier et des infrastructures. Il est situé à proximité des villes de Wavre et d'Ottignies-Louvain-La-Neuve, le rendant ainsi très fréquenté et sujet aux enjeux sociaux. Les autres objectifs du bois sont la production, la protection et la conservation de la biodiversité et la recherche scientifique (Baudry, 2014).

Le bois de Lauzelle fait partie du réseau Natura 2000, comprenant majoritairement des unités de gestion de "Forêts indigènes de grand intérêt biologique" (UG08) et de "Forêts non indigènes de liaison" (UG10), occupant 68,21% et 26,77% de la surface du bois respectivement (Baudry, 2014). Il est également certifié PEFC depuis 2021 (Decoster, s. d.). Les essences les plus importantes en terme de volume de bois sont le hêtre, le chêne et le pin sylvestre (Baudry, 2014).

Le bois se trouve à la frontière des zones bioclimatiques Plaines et Vallées Scaldisiennes et Hesbino-Brabançon. Ces zones sont définies par un climat atlantique, avec des précipitations annuelles moyennes de 859 et 864 millimètres et une température moyenne de 10,4 et 10 °C respectivement (Perre et al., 2015). La roche mère du sol du bois de Lauzelle comprend majoritairement des formations Tertiaire et Quaternaire, composées de sables, de grès et de schistes pour la première, d'alluvions et de limons (lœss) pour la deuxième. De par le relief important, les stations se différencient en fonction de leur position topographique. Les stations situées sur les plateaux et en haut de versants seront plutôt riches en sable, les lœss ayant été perdus par érosion. Les profils de sol rencontrés sur ces plateaux sont majoritairement des sols sableux à drainage naturel excessif et à horizon B humique ou/et ferrique distinct. Cette station est occupée par des landes ouvertes et des peuplements de pins sylvestres. Les versants comprennent des sols limoneux à drainage naturel favorable, à horizon B textural, tacheté et horizon A épais. Ils accueillent des peuplements de chêne et de hêtre. Les bas fonds comportent quant à eux des sols limono-sableux à drainage naturel imparfait, sans développement de profil.

Il y a également des zones tourbeuses. Les frênes et les aulnes y sont les essences majoritaires (Agnan, 2021). Le profil de sol sera davantage détaillé dans la section 3.3.

1.2 Dispositifs expérimentaux

L'expérience d'exclusion des pluies du projet REGE+ comprend six zones réparties dans le bois de Lauzelle pour deux essences : le chêne sessile (*Quercus petraea*) et le hêtre commun (*Fagus sylvatica*). Elles délimitent des aires de régénération sous une futaie équienne afin d'étudier la croissance des semis. Quatre peuplements sont ainsi étudiés, les trois zones de chêne étant dans le même peuplement. Les placettes d'étude comportent chacune une unité témoin et une unité de traitement de forme carrée de quatre mètres de large, soit une superficie 16 m^2. Une zone tampon de deux mètres de large est présente dans chaque zone, réduisant ainsi les placettes étudiées à une surface carrée de 4 m^2. Chaque unité de traitement ne reçoit que 33% des précipitations incidentes grâce à un toit constitué de bandes en plastique transparent. Les unités de traitement et témoin sont à chaque fois situées proches les unes des autres pour limiter la différence d'environnement induite par la lumière, le sol et les précipitations. Elles sont également clôturées pour éviter tout impact externe, comme la faune ou les promeneurs. La localisation précise des six zones d'étude est montrée sur la figure 3.

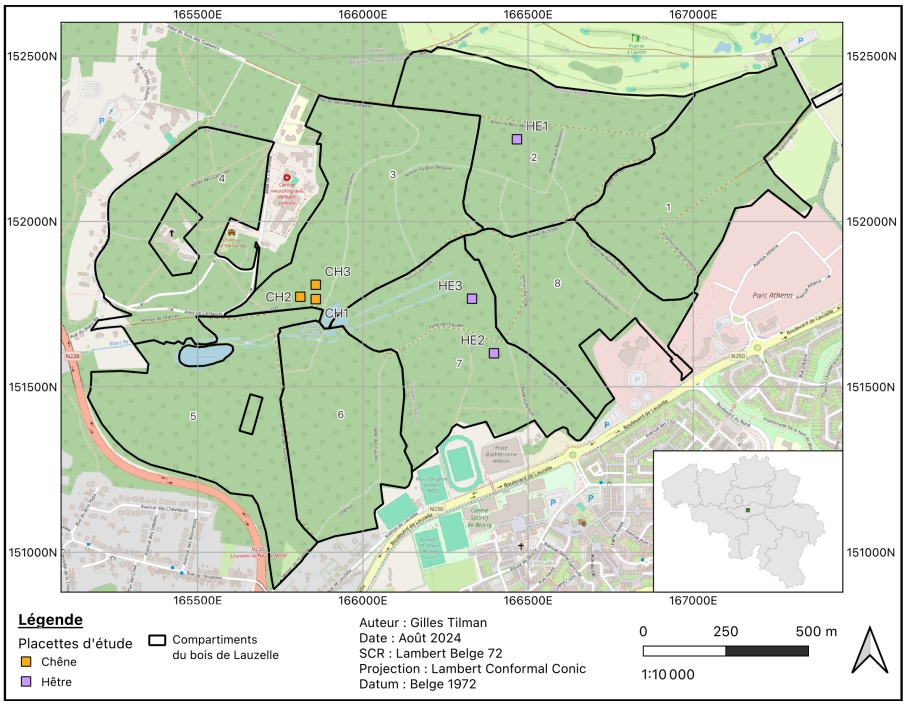

Figure 3 – Localisation des six placettes d'étude dans le bois de Lauzelle, chacune d'entre elles comprenant une unité de traitement et une unité témoin.

FIGURE 4 – Exemple d'une unité traitement avec un toit localisée dans la deuxième zone de chêne (CH2) (REGE+, 2022).

2 HETEROFOR

Cette section présente brièvement le modèle HETEROFOR développé par de WERGIFOSSE et al. (2020) et JONARD et al. (2020). Pour de plus amples informations, consulter ces ressources.

HETEROFOR (*HETEROgeneous FORest*) est un modèle décrivant la dynamique forestière sur base d'une approche spatialement explicite en tenant compte de la compétition entre chaque individu composant celui-ci. Il permet de prédire la réponse du peuplement à des mesures de gestion spécifiques ainsi qu'aux conditions climatiques futures. Il a été développé sous CAPSIS (*Computer-Aided Projection for Strategies in Silviculture*), qui est une plateforme dans laquelle une multitude de modèles liés à la sylviculture sont intégrés (DUFOUR-KOWALSKI et al., 2011). HETEROFOR est composé de plusieurs modules interconnectés : le module carbone, la phénologie, le module hydrique, le module radiatif et le module de régénération (Figure 5).

2.1 Module phénologique

HETEROFOR commence par définir les phases phénologiques sur base du fichier météorologique fourni. Ces phases comprennent les périodes de débourrement, de sénescence et de chute des feuilles, qui seront définies de manière journalière. Elles agissent sur la proportion de feuilles vertes et de feuilles sénescentes. Les proportions sont déterminées en fonction de la biomasse aérienne maximale. La distinction entre feuilles vertes et feuilles sénescentes est essentielle puisque même si les feuilles sénescentes ne participent plus à la photosynthèse, elles conservent leur rôle d'interception des précipitations. Dans le cadre de ce mémoire, les périodes de débourrement et sénescence ont été fixées aux 110^{e} et 291^{e} jours de l'année, soit le 20 avril et 18 octobre pour 2021 et 2022.

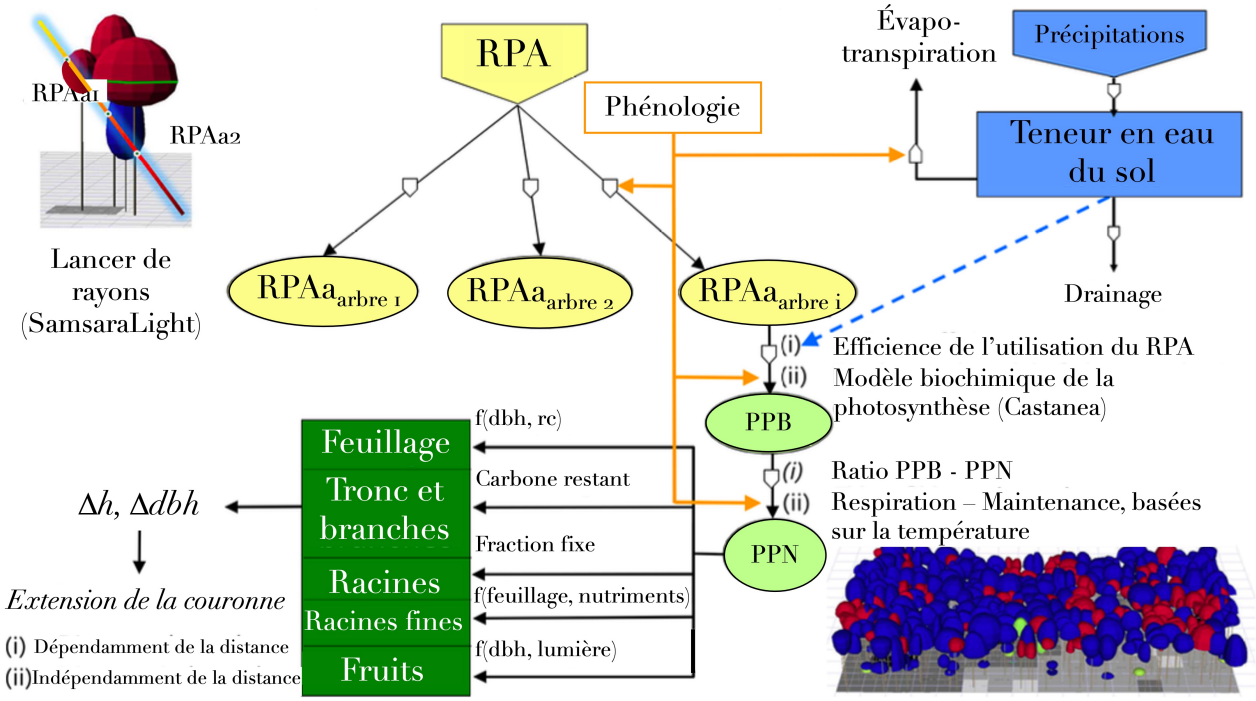

FIGURE 5 – Représentation de HETEROFOR, modèle mécaniste composé des modules radiatif (jaune), hydrique (bleu), carbone (vert) et phénologique (orange). Abréviations : RPA - Rayonnement photosynthétiquement actif ; PPB - Production primaire brute ; PPN - production primaire nette ; h - hauteur de l'arbre ; dbh - diamètre à 1m30 ; rc - rayon de la couronne. Traduit depuis JONARD et al. (2020)

2.2 Module radiatif

La libraire SamsaraLight, implémentée dans CAPSIS par COURBAUD et al. (2003) va déterminer la fraction du rayonnement photosynthétique actif (RPA) absorbée par chaque arbre, ainsi que celle transmise au sol vers la végétation en sous-étage. Cette étape prend en compte les dimensions de la couronne de chaque arbre et la quantité de feuillage, directement influencées par les stades phénologiques. SamsaraLight fonctionne par la méthode de lancer de rayons à travers la canopée, avec un angle incidence calculé heure par heure. HETEROFOR permet de calculer la proportion des rayonnements absorbés et transmis par les différents compartiments de l'arbre sur l'ensemble de la période de végétation. La bilan radiatif va directement influencer la photosynthèse et l'évapotranspiration de chaque arbre.

2.3 Module du carbone

Le module de carbone va permettre de calculer les accroissements en circonférence, en hauteur et en biomasse foliaire grâce à des variables-clés telles que la production primaire brute (PPB), la production primaire nette (PPN), la photosynthèse et la respiration.

Le calcul de la PPB est exécuté de manière horaire sur base de la routine de calcul de la photosynthèse de CASTANEA (DUFRÊNE et al., 2005). Il s'agit d'un modèle biochimique décrivant la photosynthèse selon les équations de FARQUHAR et al. (1980) et utilisant l'approche de BALL et al. (1987) pour prédire la conductance stomatique. Ce modèle nécessite la proportion

de feuilles à l'ombre et au soleil, mais aussi le RPA absorbé par unité de surface, le potentiel hydrique moyen du sol et la concentration d'azote dans les feuilles. En plus d'être directement dépendant du module radiatif, le module carbone dépend donc aussi de la disponibilité en eau.

La production primaire nette (PPN) est déterminée en multipliant l'efficience d'utilisation du carbone par la PPB afin de tenir compte de la respiration. L'efficience d'utilisation du rayonnement est la fraction de la PPB qui correspond à la PPN (de l'ordre de 40 à 60%) dépend des dimensions de l'arbre, de la concurrence avec les autres et de la température de l'air. La consommation de carbone liée à la maintenance et la croissance des tissus est ainsi calculée implicitement. Cette PPN est répartie dans les différents compartiments de l'arbre, à savoir les branches, le tronc, les racines et les feuilles. La répartition est réalisée en donnant la priorité aux compartiments plus fonctionnels tels que les feuilles, les fines racines et les fruits, et ensuite aux compartiments structurels. Le reste de la PPN est ensuite alloué aux compartiments structurels restants suivant des équations allométriques.

La croissance des semis suit le même principe mais est simulée un peu différemment. Le peuplement est divisé en cellules, dans lesquelles des cohortes de régénération peuvent être créées durant l'initialisation du modèle. Les cohortes regroupent des semis de la même espèce par classe de hauteur en leur attribuant des caractéristiques dendrométriques identiques. Ces classes de hauteur sont définies par l'utilisateur dans les fichiers d'initialisation. Les rayons transmis par la canopée sont absorbés en partie par la cohorte la plus haute et transmis à leur tour à la cohorte suivante selon le principe de Lambert-Beer. La quantité de lumière atteignant les semis de chaque cohorte décroit ainsi selon leur hauteur moyenne. L'accroissement individuel est calculé à partir de la transmittance. D'autres variables dendrométriques comme la biomasse foliaire sont ensuite calculées à partir d'équations allométriques. CASTANEA permet d'obtenir la PPB et la PPN à l'échelle de la cohorte. Celles-ci sont ensuite comparées aux valeurs de PPN individuelle des semis pour calculer le nombre de semis survivants. Si la somme des productions individuelles est trop élevée, une proportion des semis sera considérée comme morte (Ryelandt, 2019).

2.4 Module hydrique

Le module hydrique décrit les interactions entre l'atmosphère, le sol et chaque individu du peuplement. Les précipitations incidentes sont premièrement divisées en pluviolessivats et en précipitations interceptées. Les feuilles et l'écorce possèdent une capacité d'interception. Lorsque cette capacité d'interception est à saturation, l'excès d'eau arrive au sol par écoulement le long du tronc ou sous forme de pluviolessivats. L'évaporation au niveau du sol, des feuilles et du tronc est calculée selon l'équation de Penman–Monteith à partir du rayonnement absorbé défini plus tôt, ainsi que des conditions météorologiques. La transpiration des arbres suit le même principe, en définissant la conductance stomatique sur base des mêmes variables. La transpiration du peuplement est ensuite utilisée pour calculer le prélèvement racinaire dans les différents horizons. Chaque horizon est considéré comme étant un réservoir s'étendant sur l'ensemble du peuplement dans lequel l'eau est distribuée de manière homogène. Les transferts entre les horizons par drainage ou par remontées capillaires suivent la loi de Darcy.

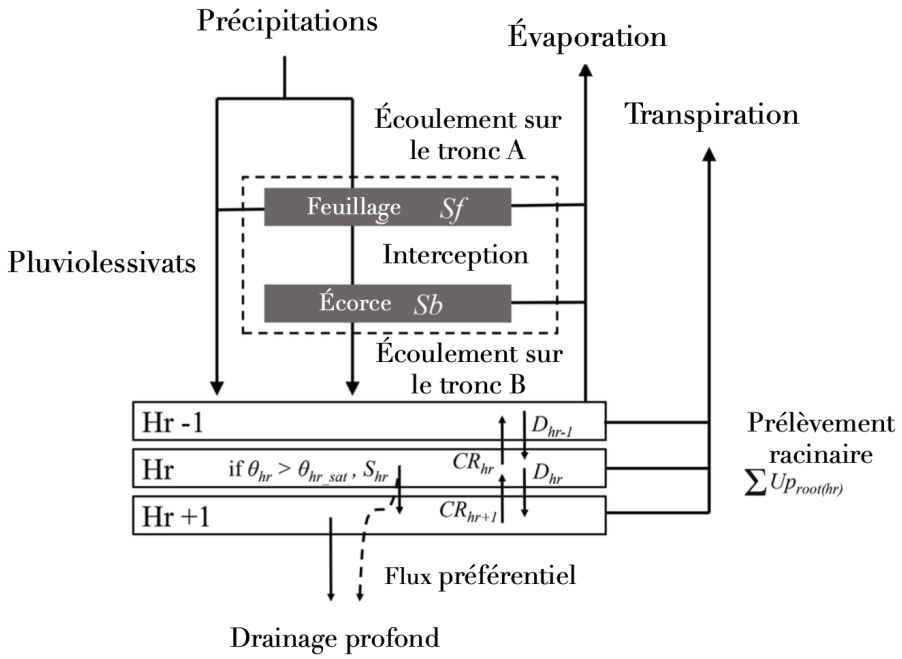

FIGURE 6 – Représentation du module hydrique d'HETEROFOR, traduite depuis de WERGIFOSSE et al. (2020)

2.5 Module de la défaillance hydraulique

La version par défaut d'HETEROFOR simule la transpiration des arbres pour calculer la conductance stomatique à partir de l'assimilation du carbone, du déficit de pression de vapeur et du potentiel hydrique du sol. Cette méthode de calcul décrit cependant la transpiration et la photosynthèse de telle sorte que la réponse des arbres au stress hydrique est entièrement réversible. En cas d'évènements extrêmes comme des vagues de chaleur et des sécheresses, le potentiel hydrique du sol et et le déficit de pression de vapeur baissent. La conductivité stomatique baisse en conséquence. Cependant, après un retour des précipitations, la conductance stomatique sera recalculée sur base de l'humidité de l'air et du sol sans tenir compte des dégâts provoqués par la sécheresse sur le système hydraulique de l'arbre présentés dans la section 3.4 du chapitre État de l'art. Afin de prendre en compte la mémoire du stress provoqué par des évènements extrêmes, une routine du module hydrique a été implémentée dans HETEROFOR pour décrire l'hydraulique des arbres en considérant la défaillance hydraulique due à l'embolie et ses conséquences sur la vitalité de l'arbre, qui se traduisent par une chute prématurée des feuilles et la mortalité des branches.

2.6 Initialisation du modèle

Pour pouvoir être lancé, HETEROFOR nécessite trois types de données principales. Des données météorologiques sont premièrement indispensables telles que le rayonnement, la température et l'humidité de l'air, ainsi que la vitesse et direction du vent. Ensuite des données pédologiques doivent détailler chaque horizon de la station du peuplement. Elles comprennent la taille des horizons, leur fraction grossière, leurs fractions de sable, de limon et d'argile, le pH, leur proportion de racines, ainsi que le contenu en eau résiduelle et à saturation. Enfin, HETEROFOR nécessite des données dendrométriques individuelles, caractérisant le peuple-

ment à travers des mesures de diamètre, de hauteur, de rayon de couronne dans les directions cardinales, de concentrations en nutriments pour chaque compartiment de l'arbre, et enfin des données sur les cohortes de régénération.

Après l'initialisation, le modèle propose de faire évoluer le peuplement sur un nombre d'années choisi. Il permet aussi de mettre en place des opérations de gestion, comme des éclaircies et des plantations. Des facteurs externes à la gestion peuvent également être pris en compte, tels que de la mortalité liée à des dégâts occasionnés par des tempêtes.

3 Données nécessaires à l'initialisation d'HETEROFOR

Les données nécessaires à l'initialisation d'HETEROFOR proviennent du projet REGE+, de campagnes de mesures de ce mémoire et de mémoires précédents ou encore de sources externes comme le CRA-W. La campagne de mesures de ce mémoire a été réalisée avec Félix Guillaume. L'analyse détaillée de celle-ci est disponible dans son propre mémoire (Guillaume, 2023). La totalité des mesures sera détaillée point par point dans les sections suivantes.

3.1 Données climatiques

Les données climatiques proviennent de la station météorologique de Louvain-La-Neuve. Celle-ci est gérée par le centre de recherche agronomique wallon et fait partie du réseau Pameseb (CRA-W, 2023). La station est située dans la ferme de Marbaix, à environ deux kilomètres à vol d'oiseau du bois de Lauzelle. Les données horaires fournies comprennent le rayonnement solaire $[W/m^2]$, la température de l'air $[°C]$, l'humidité relative de l'air [%], la température du sol à 20 centimètres de profondeur $[°C]$, la vitesse du vent à deux mètres de hauteur $[m/s]$, la direction du vent [°] et enfin les précipitations $[mm]$.

Des données plus locales ont été mesurées. Premièrement, des photos hémisphériques ont été réalisées dans les unités de chacune des zones en juillet 2022 par Frédéric André. Celles-ci permettent de caractériser le couvert au-dessus des zones d'étude et de calculer ainsi la fraction de rayonnement transmise aux semis. Ensuite, des capteurs du rayonnement photosynthétique actif (RPA) ont été installés dans la zone HE3 en juillet 2022. Ceux-ci récoltent des données toutes les 5 minutes. Ils permettent eux aussi de tenir compte de l'effet du couvert à travers une mesure continue sur toute la période de végétation.

3.2 Données sylvicoles

3.2.1 Peuplements

Les arbres des quatre peuplements de l'étude (CH, HE1, HE2, HE3) ont été mesurés : position spatiale (x, y), circonférence à 1m30 (c_{130}), hauteur totale (h), hauteur où la couronne est la plus large ($hlce$), hauteur jusqu'à la base de leur couronne (hbc) et rayon dans les quatre directions cardinales (r_n, r_s, r_o et r_e). Ces mesures ont été réalisées en juillet 2021 par Mathilde Bonheure (2022) pour les peuplements CH et HE1, et par l'équipe technique de l'UCLouvain

pour les peuplements HE2 et HE3. Les hauteurs ont été évaluées avec un Hypsomètre Vertex V 360 Bluetooth de la marque Haglof, la circonférence avec un mètre ruban et les positions et dimensions de la couronne avec Field map (Bonheure, 2022).

La régénération a quant à elle été évaluée pendant l'étude REGE+ à travers des comptages de semis par classe de hauteur. Des mesures de hauteur, de diamètre et d'accroissement ont été réalisées annuellement sur les 32 plus hauts semis de chaque cadran dans les 12 unités d'échantillonnage.

3.2.2 Biomasse des semis

La biomasse des semis a été caractérisée pendant les deux dernières semaines de septembre 2022. Elle a été échantillonnée sur l'ensemble des zones d'étude, sur des individus autour de celles-ci pour ne pas compromettre l'étude REGE+. L'objectif de cette campagne était d'obtenir des équations allométriques spécifiques aux individus observés. L'ensemble des données suivantes a ainsi été relevé : le diamètre au collet (d_{collet} $[cm]$), la hauteur (h $[cm]$), la circonférence à 130 centimètres de hauteur (c_{130} $[cm]$), les masses fraiche et sèche des fines racines (d<2mm) (mf_{fr} et ms_{fr} $[g]$), les masses fraiche et sèche des grosses racines (d>2mm) (mf_{gr} et ms_{gr} $[g]$), les masses fraiche et sèche des feuilles ($mf_{feuilles}$ et $ms_{feuilles}$ $[g]$), les masses fraiche et sèche de la tige (mf_{tige} et ms_{tige} $[g]$), les masses fraiche et sèche des branches ($mf_{branches}$ et $ms_{branches}$ $[g]$), la surface spécifique des feuilles (specific leaf area) (SLA) $[m^2/kg]$ et la longueur spécifique des racines (specific root length) (SRL) $[m/kg]$.

Ces données ont été mesurées pour le chêne et le hêtre, répartis selon 4 et 5 classes de hauteur respectivement (Table 1). Des semis ont été prélevés pour chacune des zones ; leur nombre s'élève à 12 pour les chênes, et 15 pour les hêtres, soit 27 au total. Les classes ont été définies en fonction de la répartition des hauteurs des semis. Les chênes étant moins âgés et moins grands que les hêtres, il ne convenait pas de leur associer les mêmes classes.

Table 1 – Classes de hauteur en centimètres définies pour le chêne et le hêtre

Essences	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Nombre total de semis
Chêne	<30	31-50	51-70	>70	/	12
Hêtre	<50	51-100	101-150	151-200	>201	15

Avant de prélever chaque semi, la hauteur de la tige principale ainsi que le diamètre au collet ont été mesurés au mètre pliant et au pied à coulisse électronique. Les racines ont été dégagées du sol à l'aide d'outils de jardinage pour tenter d'en préserver le maximum. Les semis prélevés ont ensuite été répartis dans des sacs en plastique hermétiques en quatre compartiments : racines, tige principale, branches et feuilles. Les échantillons ont été ramenés au laboratoire pour procéder directement aux analyses et ainsi limiter au maximum tout retrait d'eau. Les racines de chaque semis ont été lavées à l'eau courante sur un tamis pour éviter la perte des plus fins éléments, puis séparées en racines fines et en grosses racines à l'aide d'un pied à coulisse électronique.

Les feuilles ainsi que les racines ont été scannées avec un EPSON EXPRESSION 10000. Pour obtenir la surface des feuilles nécessaire au calcul du SLA, le logiciel ImageJ a été utilisé. Un scan permet de ne conserver que les pixels des feuilles en produisant une image binaire

(Annexes - Figure A1). La surface totale des feuilles peut ainsi être calculée en renseignant les dimensions réelles de l'image par rapport au nombre de pixels. Le logiciel RhizoVizion Explorer a été utilisé pour estimer la longueur totale racinaire. Les paramètres du modèle peuvent être ajustés grâce à l'outil de visualisation pour veiller à ce que le modèle ne prenne en compte que de réels axes racinaires et non des doublons ou du bruit quelconque. L'étape du scan des racines était cependant assez chronophage puisqu'une haute définition est nécessaire pour une analyse plus aisée du modèle. Des sous-échantillons ont ainsi été sélectionnés lorsque l'appareil ne pouvait contenir l'ensemble des racines. Enfin, le SRL est habituellement calculé uniquement pour les racines fines. Il a néanmoins également été calculé à part pour les grosses racines en guise de comparaison.

L'ensemble des compartiments a ensuite été pesé pour obtenir la masse fraîche, en séparant les échantillons scannés si nécessaire. Ils ont été mis à l'étuve pendant minimum 48 heures, à 70°C pour les feuilles et à 105°C pour les autres compartiments, comme conseillé par Picard et al. (2012). Le poids sec a ainsi été mesuré, permettant d'obtenir le SRL, le SLA ainsi que le contenu en eau de chaque compartiment.

Dans les sections suivantes, certaines équations d'HETEROFOR ont pu être ajustées plus précisément grâce à ces données. Les analyses ont été réalisées en R sur RStudio.

3.2.3 Équations allométriques des semis

HETEROFOR contient des équations allométriques pour estimer les variables suivantes : la biomasse ligneuse , la biomasse des feuilles, le rapport entre biomasse ligneuse aérienne et biomasse racinaire (Root/Shoot ratio), l'indice de surface foliaire LAI (surface foliaire normalisée par la surface du sol occupée par la couronne) et le rayon de la couronne. Ces variables sont estimées à partir de variables explicatives facilement mesurables : le diamètre au collet et la hauteur. Les modèles intégrés dans HETEROFOR sont linéaires (LM) et non-linéaires (NLM), deux méthodes de régression ont ainsi été utilisées. La première prend la fonction "lm" du package "stats" en R et consiste en une régression linéaire par la méthode des moindres carrés (residual sum of squares) (RSS) (Belzile, s. d. ; Ihaka, s. d.). La deuxième est une régression d'équations non-linéaires avec la fonction "nlm" du même package. Deux méthodes d'optimisation ont été choisies pour optimiser cette dernière : la méthode du maximum de vraisemblance (likelihood maximum) (ML) et des moindres carrés (residual sum of squares) (RSS).

Trois indicateurs statistiques sont calculés en guise de comparaison pour sélectionner la meilleure des méthodes pour chaque relation allométrique : le coefficient de détermination R^2, l'écart quadratique moyen EQM et le critère d'information d'Akaike AIC (Équations 10, 11 et 12).

$$R^2 = 1 - \frac{\mathrm{SCR}}{\mathrm{SCT}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2} \tag{10}$$

$$EQM = \sqrt{\frac{\mathrm{SCR}}{n}} \tag{11}$$

$$AIC = 2k - 2\ln L \tag{12}$$

où :

SCR = Somme des Carrés des Résidus
SCT = Somme des Carrés Totaux
y_i = valeur observée
$\hat{y}_i$ = valeur prédite
$\bar{y}$ = moyenne des valeurs observées
n = nombre d'observations
k = nombre de paramètres
L = maximum de vraisemblance

Les régressions linéaires optimisées par la fonction "lm" ne calculent pas directement le maximum de vraisemblance, l'argument - 2 ln L est donc calculé en fonction de la somme des carrés des résidus, du nombre d'observations et du poids, avec la fonction "AIC" du package "stats" (Pinheiro & Bates, s. d. ; Ripley, s. d.).

$$AIC = 2k + n \log \frac{SCR}{n} + n + n \log 2\pi - \sum \log w \tag{13}$$

où :

w = poids

3.2.3.1 Diamètre au collet en fonction de la hauteur

La première relation allométrique concerne le diamètre au collet (d_{collet} $[cm]$) et la hauteur (h $[cm]$). Deux équations sont testées, l'une étant non linéaire et l'autre linéaire, en fixant le coefficient c à 0 (Équation 14).

$$d_{collet} = a + b \times h + c \times h^2 \tag{14}$$

Un test ANOVA a premièrement été réalisé pour déterminer s'il était nécessaire de différencier les données dendrométriques du chêne de celles du hêtre ou si une régression en confondant les espèces était suffisante. Malgré une p-valeur de 0,219 indiquant que le facteur de différenciation d'espèce n'améliore pas le modèle, il a été choisi d'établir une courbe par espèce pour être le plus fidèle possible aux données dans la gamme observée. Les deux régressions expliquées précédemment ont donc été testées (Figure 7).

Les indicateurs statistiques montrent globalement de meilleurs résultats pour le modèle linéaire. C'est donc celui-là qui a été sélectionné. Les régressions orthogonales de la figure 8 montrent toutes deux que le diamètre est très légèrement surestimé pour la gamme des valeurs les plus hautes et sous-estimé pour la gamme des plus basses.

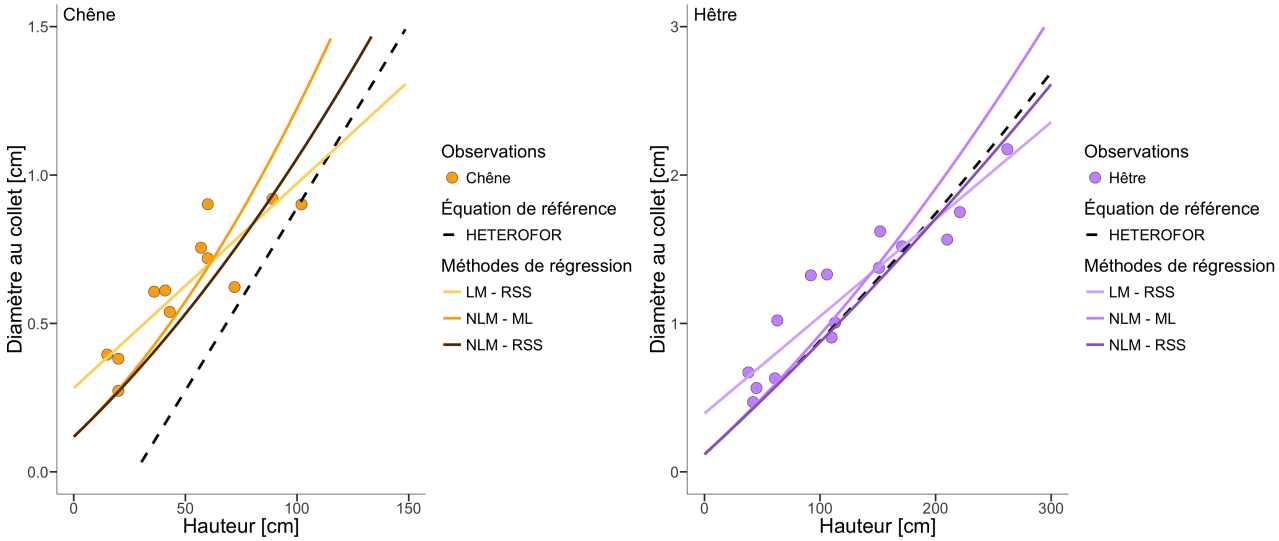

FIGURE 7 – Méthodes de régression pour l'équation allométrique du diamètre au collet en fonction de la hauteur (Eq. 14). LM : modèle linéaire, NLM : modèle non linéaire ; RSS : méthode des moindres carrés, ML : maximum de vraisemblance. La courbe HETEROFOR reprend les paramètres du modèle par défaut pour chaque espèce.

TABLE 2 – Indicateurs statistiques pour les équations allométriques du diamètre au collet en fonction de la hauteur

Espèces	Modèle	Méthode	a	b	c	R^2	AIC	RMSE
Chêne	Linéaire	RSS	0.28200	0.00690	-	0.776	-15.80	0.0975
Chêne	Non-linéaire	ML	0.118	0.00718	3.89e-05	0.337	8.69	0.168
Chêne	Non-linéaire	RSS	0.11800	0.00718	2.22e-05	0.475	6.53	0.1490
Hêtre	Linéaire	RSS	0.39375	0.00654	-	0.865	-3.65	0.1750
Hêtre	Non-linéaire	ML	0.11800	0.00718	8.90e-06	0.647	8.61	0.2840
Hêtre	Non-linéaire	RSS	0.11800	0.00718	3.80e-06	0.734	7.82	0.2460

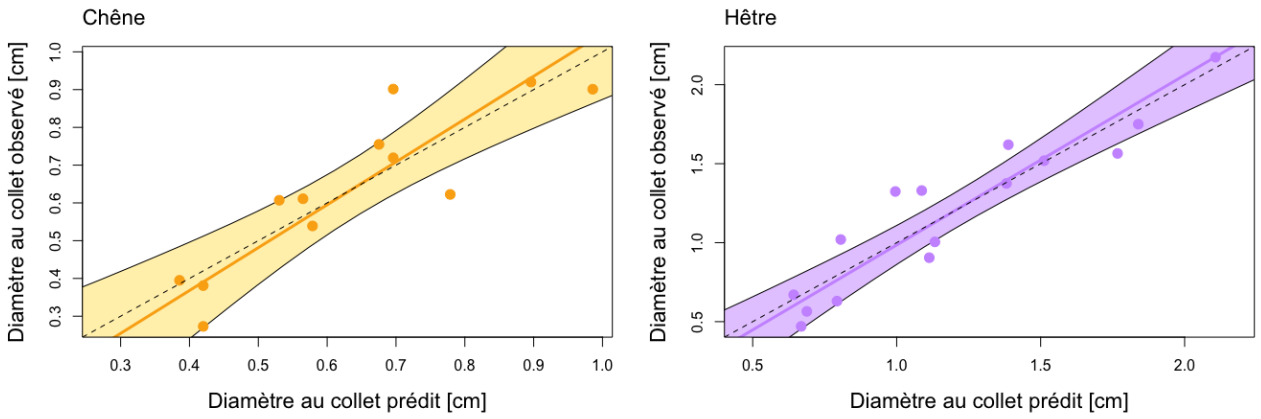

FIGURE 8 – Régression orthogonale des relations allométriques pour le chêne (jaune) et le hêtre (violet) pour l'équation 14 avec un intervalle de confiance de 95 %

3.2.3.2 Biomasse ligneuse aérienne en fonction de la hauteur et du diamètre au collet

La deuxième relation allométrique estime la biomasse ligneuse aérienne (B_{la} $[g]$) en fonction de la hauteur et du diamètre au collet. Deux formes de l'équation non linéaire 15 sont testées, en fixant le facteur de forme β à 1 ou en le laissant libre. Le produit de la hauteur par le carré du diamètre permet de faire varier la biomasse ligneuse aérienne en fonction d'un proxy du volume au facteur de forme près.

$$B_{la} = \alpha \times (h \times d^2_{collet})^{\beta} \tag{15}$$

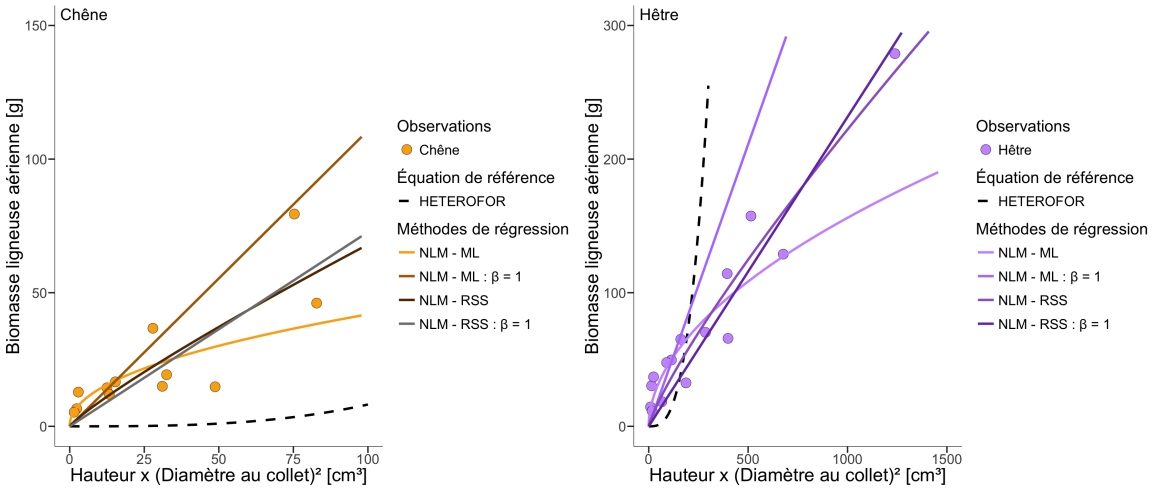

FIGURE 9 – Méthodes de régression pour l'équation allométrique de la biomasse ligneuse aérienne en fonction de la hauteur et du diamètre au collet (Eq. 15). NLM : modèle non linéaire ; RSS : méthode des moindres carrés, ML : maximum de vraisemblance. La courbe HETEROFOR reprend les paramètres du modèle par défaut pour chaque espèce.

La méthode des moindres carrés (RSS) semble donner de meilleurs résultats en ne tenant compte que du R^2 et de l'erreur quadratique moyenne. Le critère d'Akaike suggère cependant que le meilleur compromis entre précision et parcimonie sur le nombre de paramètres est offert par la méthode ML à 2 paramètres. C'est donc cette courbe qui a été sélectionnée. Les données pour les plus gros volumes ne sont pas très nombreuses, ce qui provoque une forte disparité dans la forme des courbes. Aucune d'entre elles ne suit l'équation théorique d'HETEROFOR.

TABLE 3 – Indicateurs statistiques pour les équations allométriques de la biomasse ligneuse aérienne en fonction de la hauteur et du diamètre au collet

Espèces	Modèle	Méthode	α	β	R^2	AIC	RMSE
Chêne	Non-linéaire	ML	4.681	0.476	0.505	16.5	14.3
Chêne	Non-linéaire	ML	1.110	1	0.107	32.4	19.2
Chêne	Non-linéaire	RSS	1.230	0.871	0.643	3553	12.2
Chêne	Non-linéaire	RSS	0.727	1	0.638	3607	12.3
Hêtre	Non-linéaire	ML	4.128	0.526	0.768	18.9	33.1
Hêtre	Non-linéaire	ML	0.422	1	-0.515	40.0	84.4
Hêtre	Non-linéaire	RSS	0.705	0.833	0.910	12762	20.6
Hêtre	Non-linéaire	RSS	0.232	1	0.892	15275	22.6

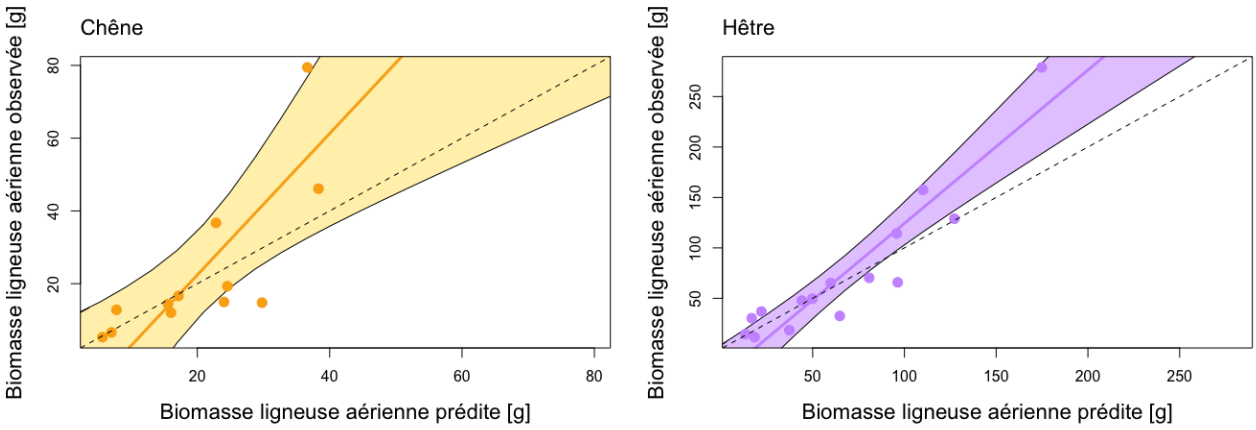

FIGURE 10 – Régression orthogonale des relations allométriques pour le chêne (jaune) et le hêtre (violet) pour l'équation 15 avec un intervalle de confiance de 95 %

3.2.3.3 Biomasse des feuilles en fonction du diamètre au collet

La troisième relation allométrique détermine la biomasse des feuilles (B_f [g]) en fonction du diamètre au collet (Eq. 16).

$$B_f = \alpha \times d_{collet}^{\beta} \tag{16}$$

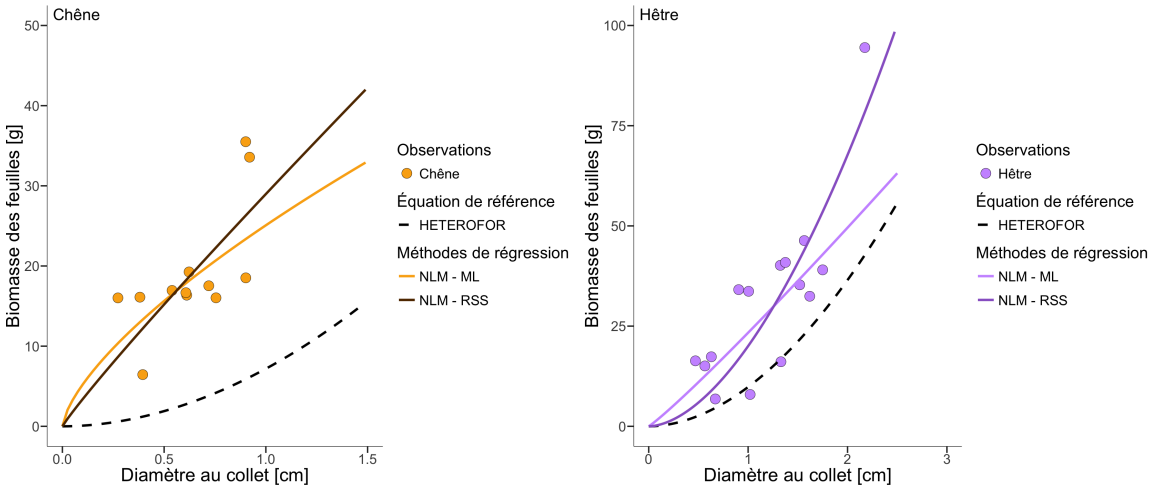

FIGURE 11 – Méthodes de régression pour l'équation allométrique de la biomasse des feuilles en fonction du diamètre au collet (Eq. 16). NLM : modèle non linéaire ; RSS : méthode des moindres carrés, ML : maximum de vraisemblance. La courbe HETEROFOR reprend les paramètres du modèle par défaut pour chaque espèce.

Les deux méthodes de régression pour les modèles non linéaires ont été testées. Les données du chêne sont majoritairement groupées autour de 17 grammes, qui sont ensuite approximées sous une courbe logarithmique, là où celles pour le hêtre et celles de référence sont exponentielles. La méthode ML semble une nouvelle fois donner un meilleur AIC, pour une précision similaire.

TABLE 4 – Indicateurs statistiques pour les équations allométriques de la biomasse des feuilles en fonction du diamètre au collet

Espèces	Modèle	Méthode	α	β	R^2	AIC	RMSE
Chêne	Non-linéaire	ML	25.075	0.681	0.431	10.6	5.71
Chêne	Non-linéaire	RSS	28.973	0.931	0.479	720	5.46
Hêtre	Non-linéaire	ML	23.35	1.09	0.573	24.6	13.60
Hêtre	Non-linéaire	RSS	20.02	1.76	0.693	4010	11.6

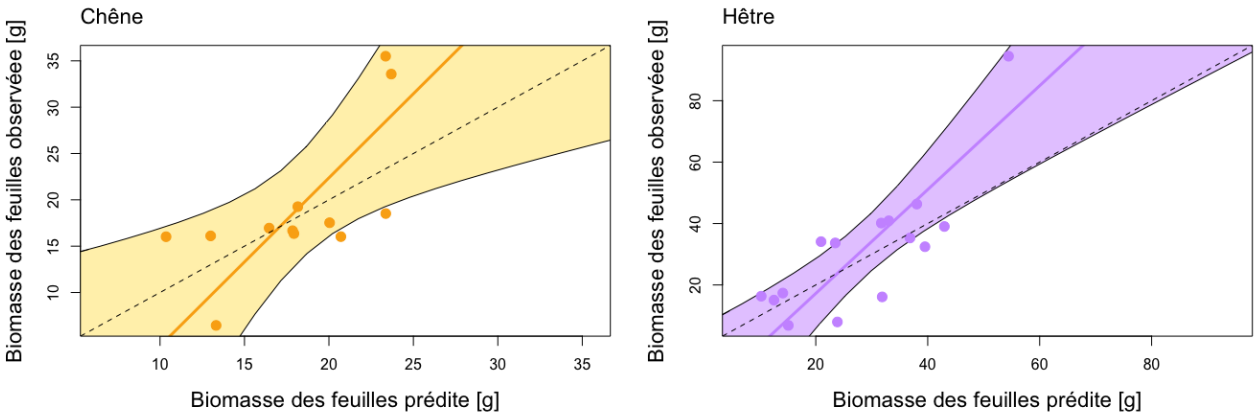

FIGURE 12 – Régression orthogonale des relations allométriques pour le chêne (jaune) et le hêtre (violet) pour l'équation 16 avec un intervalle de confiance de 95 %

3.2.3.4 Root/Shoot ratio en fonction de la hauteur

La quatrième relation allométrique concerne le Root/Shoot ratio (rsr [−]). Celui-ci est défini par la biomasse racinaire ($B_{racines}$ [g]) divisée par la biomasse ligneuse aérienne (B_{la} [g]). Il est prédit avec la hauteur des semis selon l'équation 17.

$$rsr = B_{racines}/B_{la} = a + b \times e^{-c \times h} \tag{17}$$

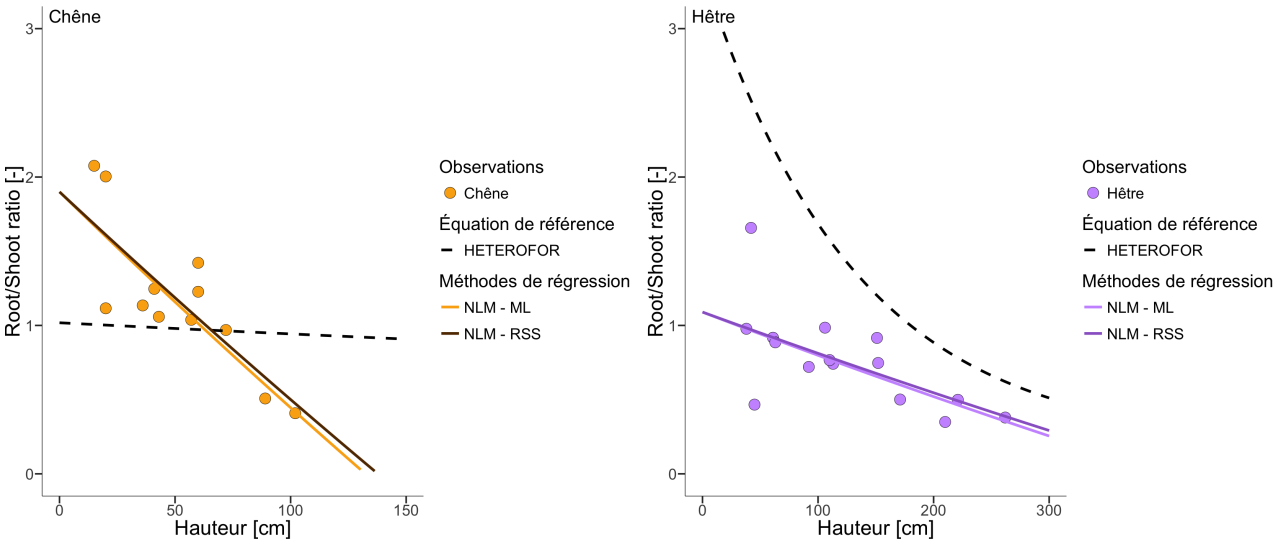

FIGURE 13 – Méthodes de régression pour l'équation allométrique du Root/Shoot ratio en fonction de la hauteur (Eq. 17). NLM : modèle non linéaire ; RSS : méthode des moindres carrés, ML : maximum de vraisemblance. La courbe HETEROFOR reprend les paramètres du modèle par défaut pour chaque espèce.

TABLE 5 – Indicateurs statistiques pour les équations allométriques Root/Shoot ratio en fonction de la hauteur

Espèces	Modèle	Méthode	a	b	c	R^2	AIC	RMSE
Chêne	Non-linéaire	ML	-16.50	18.40	0.000823	0.667	1.77	0.273
Chêne	Non-linéaire	RSS	-16.50	18.40	0.000791	0.672	7.76	0.271
Hêtre	Non-linéaire	ML	-5.35	6.44	0.000463	0.415	10.40	0.242
Hêtre	Non-linéaire	RSS	-5.35	6.44	0.000441	0.418	7.75	0.242

On peut premièrement noter que les courbes de référence entre les deux espèces ont des allures très différentes. Le hêtre possèderait une fraction plus importante de racines durant ses premières années, pour ensuite progressivement augmenter sa proportion de feuilles. Le chêne aurait tendance quant à lui à conserver un rsr constant. Les résultats des régressions ne suivent pas ces tendances, en ayant des courbes presque linéaires. Le rsr finit par devenir négatif lorsque qu'il sort de la gamme observée. Ces équations ne sont donc applicables que pour les plus petites cohortes de régénérations. Au-delà de 150 centimètres pour le chêne et 400 centimètres pour le hêtre, il ne convient pas de les utiliser. Les équations d'HETEROFOR seront donc conservées pour ce cas-ci. La méthode ML a une nouvelle fois été choisie pour les mêmes raisons que précédemment.

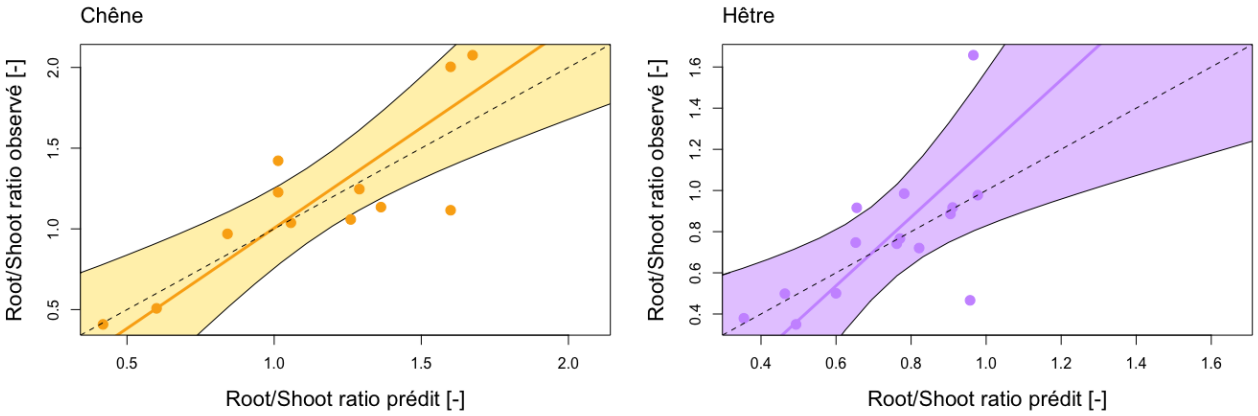

FIGURE 14 – Régression orthogonale des relations allométriques pour le chêne (jaune) et le hêtre (violet) pour l'équation 17 avec un intervalle de confiance de 95 %

3.3 Données pédologiques

Le fichier pédologique est issu de deux campagnes de mesures : le mémoire d'Alexandre VANBENEDEN (2022) ainsi que le projet de recherche financé par le SPW sur l'« Évaluation des stress hydriques en sols forestiers wallons : diminuer les incertitudes et favoriser l'extrapolation » mené par Caroline Vincke. L'objectif initial était de constituer six "fichiers sols" pour les six zones d'étude. Les fichiers sols initiaux sont ceux établis par Alexandre, l'un pour les plateaux et l'autre pour les versants sur lesquels se trouvent les zones de hêtres et de chênes respectivement. Pour caractériser plus localement chacune des six zones, des mesures complémentaires ont été effectuées pour la densité apparente et la rétention. La fosse de l'étude de Caroline Vincke est

située à quelques dizaines de mètres de la zone HE1 et détaille le profil sur les 250 premiers centimètres de profondeur. Des données précises pour chaque horizon ont pu être ajoutées au fichier sol, telles que la profondeur de chaque horizon, les teneurs en sable, limon et argile, la présence de carbone organique ainsi que le pH du sol. Des données de rétention ont aussi été récoltées. L'analyse de celles-ci est détaillée dans la section 3.3.2.

Le profil du sol de la fosse pédologique a été décrit par Hugues Titeux et Anne Doat. Cette description est résumée dans le tableau 6. Au lieu d'un plateau sableux comme présenté dans la section 1.1, on retrouve des horizons limoneux constitués de lœss pour les premiers horizons. Certaines zones des plateaux du bois de Lauzelle contiennent encore des limons qui n'ont pas été érodés. La zone HE1 est située sur une zone (x)Lba qui fait état d'un sol sablo-limoneux à drainage naturel principalement favorable. La Carte Numérique des Sols de Wallonie indique que les autres zones de hêtre reposent sur des sols limoneux à drainage naturel favorable Aba(0) (SPW, 2015). Cela peut être expliqué par le fait que les zones HE2 et HE3 sont plutôt situées en haut de versant que sur plateau. Les zones de chênes sont regroupées sous le même peuplement en bas de versant, sur un sol Aba(b)0 très similaire à celui des zones HE2 et HE3. La répartition des types de profil de sol au sein du bois ainsi qu'un modèle numérique de terrain sont montrés dans les figures A2 et A3 en annexe.

TABLE 6 – Description du profil de la zone HE1

Horizon	Type	Profondeur [cm]	Couleur	Texture
1	Ah	0 - 10	Noir	Limoneux
2	E	10 - 40	Brun jaunâtre foncé	Limoneux
3	Bt	40 - 80	Brun	Argilo-limoneux
4	BC	80 - 120	Brun	Argilo-limoneux
5	$2BC_1$	120 - 150	Rouge jaunâtre	Argilo-sableux
6	$2BC_2$	150 - 230	Rouge jaunâtre (70%)	Argilo-sableux (70%)
			Brun jaunâtre foncé (30%)	Sableux (30%)
7	$2Bg$	230 - 250	Brun jaunâtre	Sableux

A défaut d'informations plus précises, les horizons holorganiques, à savoir l'horizon de la litière OL, l'horizon fragmenté OF et l'horizon humifère OH, ont été repris des fichiers initiaux. Ils ont toutefois été adaptés pour les zones de chênes, en considérant que la qualité de la litière et l'apport supplémentaire en lumière provoque une décomposition plus rapide. Un seul horizon holorganique a ainsi été conservé, avec une épaisseur de 4.69 centimètres (Table 7). Des instabilités dans le calcul des transferts hydriques ont été détectés lorsque les horizons étaient trop peu épais. Pour cette raison, les horizons OF et OH ont été fusionnés.

TABLE 7 – Comparaison des profondeurs des horizons pour les zones de chêne et de hêtre

	Hêtre		Chêne	
Horizon	Limite inférieure [cm]	Limite supérieure [cm]	Limite inférieure [cm]	Limite supérieure [cm]
OL	8.09	4.69	-	-
OF-OH	4.69	0	4.69	0

3.3.1 Densité apparente et fraction grossière

La densité apparente d correspond à la masse de sol sec divisée par son volume apparent, c'est-à-dire le volume occupé par le sol lors de son prélèvement. La fraction grossière est définie quant à elle par le volume de pierres divisé par le volume de sol apparent. Ces deux variables ont été évaluées grâce aux prélèvements réalisés avec des anneaux Kopecky de 250 cm^3. Ceux-ci ont été effectués à trois reprises autour de chaque zone, à 5, 15 et 25 centimètres de profondeur. Le nombre total d'échantillons s'élève ainsi à 54. Après le prélèvement, les échantillons ont été ramenés au laboratoire pour être pesés et mis à l'étuve à 105°C pendant 48 heures. Les sols du bois de Lauzelle étant très peu caillouteux, la majorité des échantillons ne contenait pas de cailloux. Il a donc été décidé de fixer les fractions grossières à zéro.

3.3.2 Rétention du sol

Pour obtenir des courbes de rétention du sol, de nouveaux anneaux Kopecky de 250 cm^3 ont été analysés avec le logiciel HYPROP-FIT de METER Group. Cette méthode consiste à faire sécher progressivement à l'air libre des échantillons de sols de volume connu et mesurer l'évolution du potentiel hydrique et de la teneur en eau. Ces variables sont évaluées grâce à des tensiomètres insérés dans les Kopecky et à une balance. Le séchage à l'air libre ne permet cependant pas d'atteindre un potentiel hydrique suffisamment bas. Des mesures complémentaires ont donc été effectuées au WP4C pour obtenir des valeurs de teneur en eau aux alentours d'un pF de 4,2. Des échantillons complémentaires de teneur en eau gravimétrique ainsi que de potentiel hydrique mesuré au WP4C ont également été pris en compte dans l'analyse. La récolte de ces données est détaillée dans la section 4.1. Les Kopecky ont été prélevés à 5, 15 et 25 centimètres de profondeur pour quatre zones d'étude, en regroupant les données des trois zones de chênes puisqu'elles reposent sur la même station.

Pour la zone HE1, des Kopecky ont été analysés avec HYPROP sur l'ensemble des horizons minéraux grâce aux données récoltées par Anne Doat dans la fosse pédologique à proximité. Chaque horizon a été échantillonné à trois reprises. Des données complémentaires de teneur en eau à pF 3,5 et 4,2 ont été obtenues à l'aide de casseroles à pression.

Les données fournies par HYPROP-FIT ont d'abord été traitées sur Excel pour supprimer les valeurs incohérentes, telles que des différences de teneur en eau pour un même potentiel hydrique. Le logiciel HYPROP-FIT a la capacité de traiter plusieurs courbes de rétention en même temps, mais les options de régression sont peu développées. Il a donc été décidé de travailler en R, avec la fonction *fitsoilwater_App* du package soilphysics (de LIMA et al.,

2021). Cette fonction permet d'accéder à une application sur Shiny et d'ajuster les courbes de rétention par la méthode des moindres carrés en rentrant des données de succion et de teneur en eau. *fitsoilwater_App* permet d'optimiser plusieurs fonctions de rétention d'eau différentes. L'équation utilisée dans HETEROFOR est celle de van Genuchten (1980) (Équation 18). Il est possible d'appliquer des contraintes aux paramètres de l'équation de van Genuchten, en fixant les valeurs des teneurs en eau à saturation et résiduelle à celles mesurées (teneurs en eau maximale et minimale) ou à 0 pour la teneur en eau résiduelle (Équations 19 et 20).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + ((\alpha \times 10^{pF})^n)^m} \tag{18}$$

$$\theta = \theta_{min} + \frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{1 + ((\alpha \times 10^{pF})^n)^m} \tag{19}$$

$$\theta = \frac{\theta_s}{1 + ((\alpha \times 10^{pF})^n)^m} \tag{20}$$

où :

θ = Teneur en eau du sol $[m^3/m^3]$
θ_s = Teneur en eau du sol à saturation $[m^3/m^3]$
θ_r = Teneur en eau du sol résiduelle $[m^3/m^3]$
pF = Potentiel matriciel $[cm]$
α = Paramètre $[1/cm]$
n = Paramètre $[-]$
m = Paramètre, fixé à $1 - \frac{1}{n}$ $[-]$
θ_{max} = Teneur en eau du sol mesurée maximale $[m^3/m^3]$
θ_{min} = Teneur en eau du sol mesurée minimale $[m^3/m^3]$

Les résultats de la régression des trois équations sont montrés à la figure 15. Il est important de noter que l'une des trois courbes échantillonnées pour le premier horizon minéral de la zone HE1 se distinguait par ses hautes valeurs de teneur en eau à faible pF. Il a donc été estimé que cette différence pouvait provenir d'une teneur en carbone organique plus élevée. L'horizon Ah est épais de 10 centimètres, il est ainsi possible qu'une partie de l'horizon organique supérieur ait été prélevé. A défaut de meilleures informations, cette courbe a été séparée et utilisée pour estimer la rétention des horizons organiques. Aussi, puisque les mesures de teneur en eau gravimétrique ont été réalisées sur les 30 premiers centimètres, celles-ci n'ont pas été prises en compte pour les courbes des 5 derniers horizons de HE1. Les régressions donnent dans l'ensemble de meilleurs résultats pour la méthode où θ_r est fixée à 0. θ_r est définie comme étant la teneur en eau à laquelle la conductivité du sol tend vers 0. Elle devrait être de l'ordre de 10% pour les sols limoneux (van Genuchten et al., 1991). Cette méthode a toutefois été choisie car elle correspond le mieux à la gamme de valeurs observées dans le bois de Lauzelle.

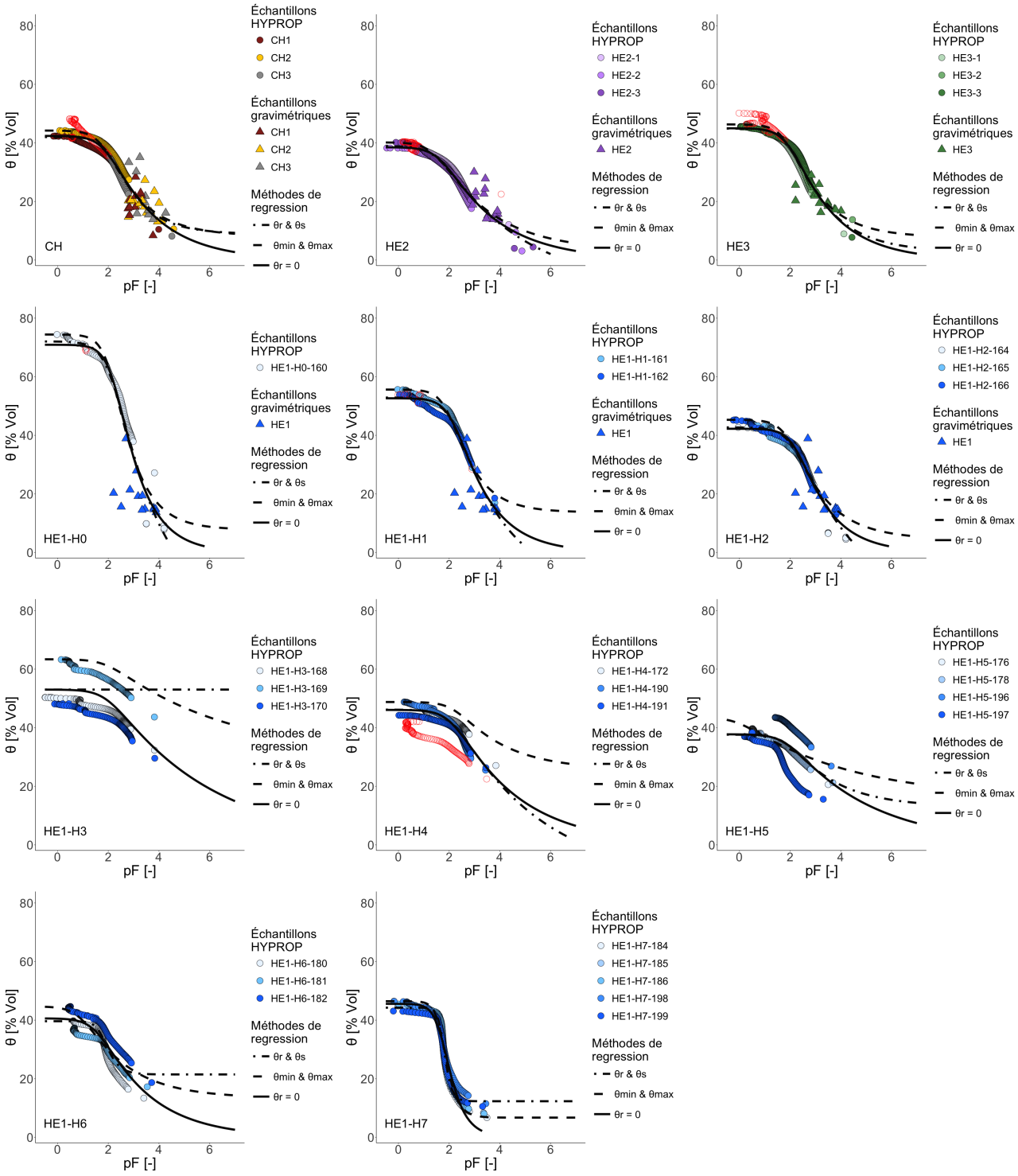

FIGURE 15 – Courbes de rétention selon van GENUCHTEN (1980) construites sur base des teneurs en eau et des potentiels matriciels mesurés. Les données proviennent du logiciel HYPROP et de teneurs en eau gravimétriques. Trois méthodes de régression sont testées : paramètres θ_r et θ_s fixés aux valeurs observées (θ_{min} & θ_{max}), θ_r fixé à 0 ($\theta_r = 0$) et θ_r et θ_s laissés libres (θ_r & θ_s). Les points en rouge correspondent aux données considérées comme outliers.

4 Suivi temporel du statut hydrique du sol et des semis

Dans cette section seront détaillées les données issues de la campagne de mesure qui permettront d'évaluer les performances du modèle. Quatre variables seront ainsi analysées : la teneur en eau et le potentiel hydrique du sol, ainsi que le potentiel hydrique des semis au niveau de leur tige et de leurs feuilles. Les mesures d'accroissement des semis effectuées dans le cadre du projet REGE+ seront également utilisées.

4.1 Teneur en eau du sol

La teneur en eau du sol a été évaluée selon deux méthodes : par des sondes TDR et par des prélèvements de sols.

Les sondes TDR CS615 de Campbell Scientific permettent de mesurer la constante diélectrique du sol grâce à deux tiges en acier de 30 centimètres de long. Ces valeurs sont ensuite transformées en teneur en eau volumique grâce à des équations de calibration. Les sondes ont été placées verticalement, échantillonnant ainsi le sol sur 30 centimètres de profondeur. Il en résulte des données horaires, et ce depuis le début de l'expérience REGE+. 24 sondes ont été installées, une paire de sonde pour chaque zone et chaque unité. Les sondes n'ont pas été calibrées avant le début de l'expérience REGE+. Ne pouvant être retirées au risque de compromettre celle-ci, les mesures de la constante diélectrique ont été couplées à des mesures ponctuelles de la teneur en eau gravimétrique. Ces prélèvements ont été effectués de manière hétérogène tout au long de la campagne de mesure, pour obtenir différentes teneurs en eau. Huit séries de prélèvements ont été effectuées au total. Cela consistait en la prise d'un échantillon de sol sur 30 centimètres de profondeur à la tarière pour permettre une calibration des sondes TDR. Les échantillons ont été conservés dans des sacs en plastique hermétiques jusqu'à la mesure du poids frais en laboratoire. Ils ont ensuite séché pendant un minimum de 48 heures dans une étuve mise à 105°C. La masse sèche a alors été mesurée, ainsi que la masse des racines et des pierres le cas échéant.

La calibration des sondes TDR est disponible dans la section 3.3.2.1. du mémoire de Guillaume (2023).

4.2 Potentiel hydrique du sol

Le potentiel hydrique a également été prélevé de manière ponctuelle et continue.

Premièrement, deux triplets de tensiomètres TEROS 21 du groupe METER ont été placés à 15 centimètres de profondeur dans l'unité de traitement et l'unité témoin de la zone HE3. Ceux-ci ont enregistré des données horaires de température et de potentiel hydrique dans un datalogger. Des mesures complémentaires ont été réalisées au WP4C sur les échantillons prélevés pour les teneurs en eau gravimétriques, donc pour toutes les zones et unités.

4.3 Potentiel hydrique des semis

Le potentiel hydrique des semis a été évalué par deux méthodes différentes.

La première méthode est une mesure continue du potentiel hydrique de la tige. Cela a été réalisé grâce à des psychromètres PSY1 ICT Internationnal. Ils ont été installés seulement sur la zone HE3, à partir du 22 juin 2022. Leur nombre initial était de 6, mais 4 d'entre eux ont dû être démontés le 10 juillet. Un seul psychromètre par unité est donc resté jusqu'au 12 août 2022, où deux nouveaux psychromètres ont été installés. Un résumé de chaque sonde avec sa période d'installation est montré dans la table 8.

TABLE 8 – Sondes PSY1 et période d'installation, C étant pour l'unité témoin et T pour le traitement

Sonde	Période d'installation
HE3-C-1	22 juin - 10 juillet
HE3-T-1	22 juin - 10 juillet
HE3-C-2	22 juin - 10 juillet
HE3-T-2	22 juin - 10 juillet
HE3-C-3	22 juin - 04 novembre
HE3-T-3	22 juin - 04 novembre
HE3-C-4	12 août - 04 novembre
HE3-T-4	12 août - 04 novembre

Période	Nombre de sondes actives
22 juin - 10 juillet	6
10 juillet - 12 août	2
12 août - 04 novembre	4

Chaque psychromètre mesurait ainsi le potentiel hydrique sur la tige de 8 semis différents. Le psychromètre sur tige a été préféré au psychromètre sur feuille car il est plus adapté aux conditions de terrain. En effet, le psychromètre appliqué sur les feuilles nécessite des feuilles très lisses en plus d'être plus délicat à manipuler.

La deuxième méthode de mesure du potentiel hydrique est la chambre à pression de PMS Instruments. Celle-ci permet d'obtenir directement le potentiel hydrique en prélevant une feuille des semis. La mesure est réalisée en plaçant une feuille avec le pétiole hors de la chambre et en augmentant progressivement la pression grâce à une bombonne de gaz. Lorsque du liquide émane du pétiole, la pression est notée et considérée comme étant le potentiel hydrique de la feuille. Hormis quelques mesures pour obtenir le potentiel de base avant l'aube, les prélèvements ont majoritairement été réalisés aux alentours du midi solaire. Ils ont été effectués au minimum une fois par semaine pour chaque unité pendant toute la période de relevés des psychromètres. Pour limiter d'éventuels influences dues à l'exposition, la taille et la localisation des feuilles, il a été décidé de mesurer uniquement les plus grandes feuilles supérieures des semis à l'ombre lors du prélèvement. Les feuilles étaient ensuite ramenées au laboratoire pour mesurer leur superficie avec le logiciel ImageJ comme précédemment expliqué.

Résultats

Dans ce chapitre, les résultats des simulations du modèle HETEROFOR seront comparés aux observations des campagnes de mesures. Ces dernières seront d'abord analysées pour pouvoir mieux comprendre les problématiques inhérentes à ce mémoire. L'analyse complète des observations est détaillée dans le mémoire de Félix Guillaume (2023).

1 Variables observées

1.1 Statut hydrique du sol

L'évolution du contenu en eau du sol est montrée dans la figure 16. De manière générale, celui-ci est plus faible pour les unités sous traitement. L'écart des précipitations incidentes entre 2021 et 2022 provoque toutefois des réponses différentes au sein d'une même unité. En effet, alors que la vitesse d'assèchement est de même ordre pour les deux unités en 2021, l'unité témoin semble s'assécher plus vite que celle de traitement en 2022. Si un écart est présent au point le plus sec en 2021 entre les deux unités, ce n'est pas le cas pour 2022. La recharge en eau est, quant à elle, moins rapide pour les unités de traitement, ce qui correspond aux attentes puisqu'une quantité moins importante d'eau arrive au sol. L'impact des toits est donc plus marqué pour les périodes de recharge que pour celles de décharge.

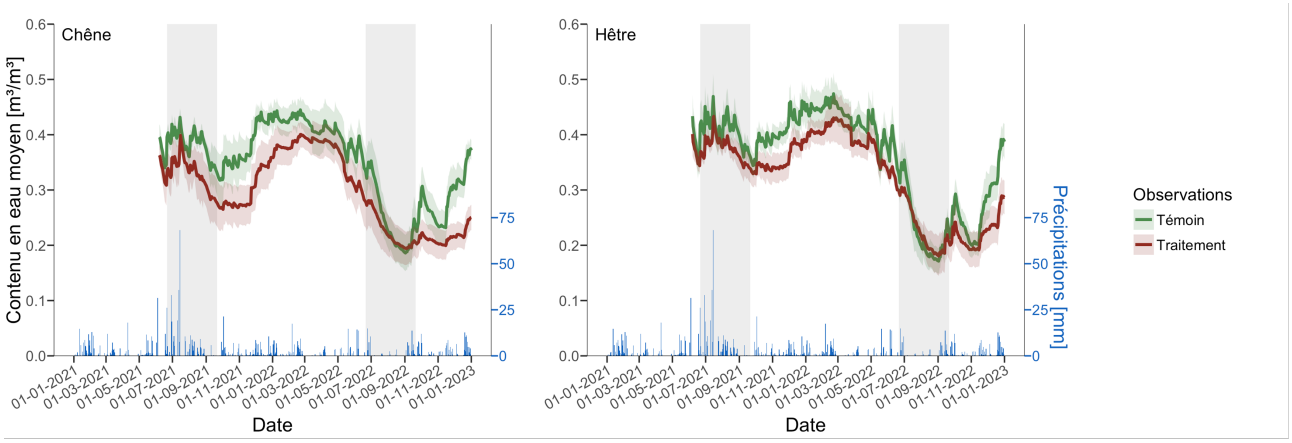

Figure 16 – Évolution des contenus en eau observés au cours du temps par espèce et par traitement. Les observations sont la moyenne des contenus en eau mesurés par des TDR sur les 30 premiers centimètres de sol. Chaque courbe correspond ainsi à la moyenne de six mesures. Les intervalles de confiance sont fixés à 95%. Les zones grisées correspondent à la saison estivale, du 21 juin au 21 septembre. Les données de pluviométrie proviennent du réseau Pamseb CRA-W (2023).

La figure 17 présente l'évolution du potentiel hydrique du début de l'été jusqu'à début novembre dans la zone HE3. Les deux unités suivent un comportement attendu puisque le potentiel hydrique baisse pendant les périodes de sécheresse puis remonte quand il y a des précipitations. Comme pour le contenu en eau, le potentiel hydrique des unités de traitement baisse moins vite que les unités témoin puisque qu'il commence à diminuer plus tôt et qu'il atteint des minima moins négatifs. Néanmoins, les différences entre les unités sont moins marquées. Pour la deuxième période de sécheresse, le potentiel hydrique de l'unité témoin devient plus négatif que celui de l'unité de traitement.

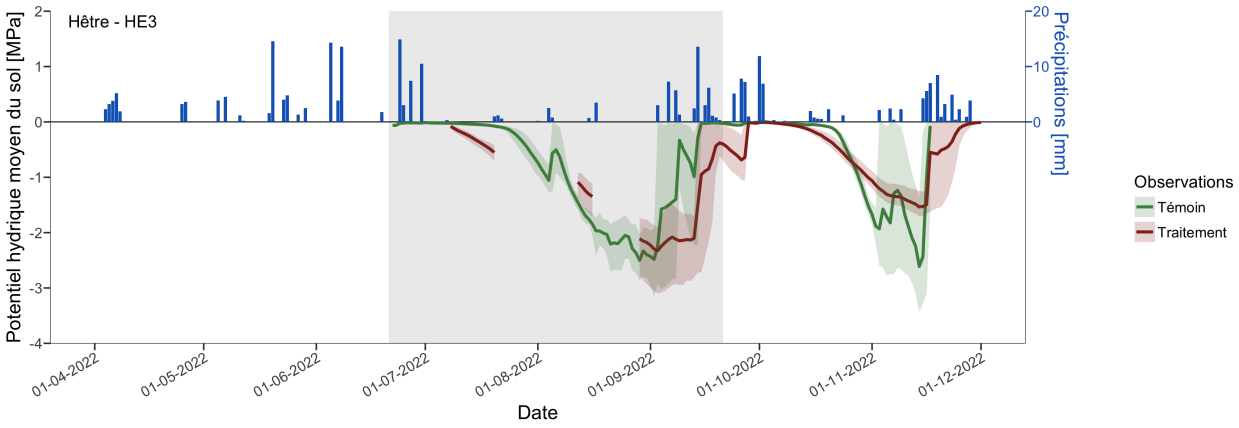

FIGURE 17 – Évolution des potentiels hydriques du sol observés au cours du temps par espèce et par traitement. Les données de référence sont la moyenne du potentiel hydrique mesuré par des TEROS à 15 centimètres de profondeur. Chaque courbe correspond ainsi à la moyenne de trois mesures. Les intervalles de confiance comprennent les minima et maxima quotidiens. Les zones grisées correspondent à la saison estivale, du 21 juin au 21 septembre. Les données de pluviométrie proviennent du réseau Pamseb CRA-W (2023).

1.2 Statut hydrique des semis

Le potentiel hydrique des semis a été mesuré à deux niveaux : dans la tige et dans les feuilles. La figure 18 montre ces observations, distinguées en mesures ponctuelles pour les feuilles et en mesures continues pour les tiges. Pour assurer le transport de l'eau vers l'atmosphère, il est attendu que le potentiel soit plus négatif pour les feuilles, ce qui est bien visible ci-dessous. Les différences entre les semis sous traitement et témoins ne sont cependant pas celles attendues. En effet, le potentiel hydrique de la tige des semis est majoritairement plus négatif pour les unités témoins. Les variations journalières sont assez similaires entre les deux unités, mais la différence de potentiel de la tige des semis atteint 1 MPa au premier septembre. Après la recharge à la fin de l'été, cette tendance s'inverse pour redevenir plus intuitive.

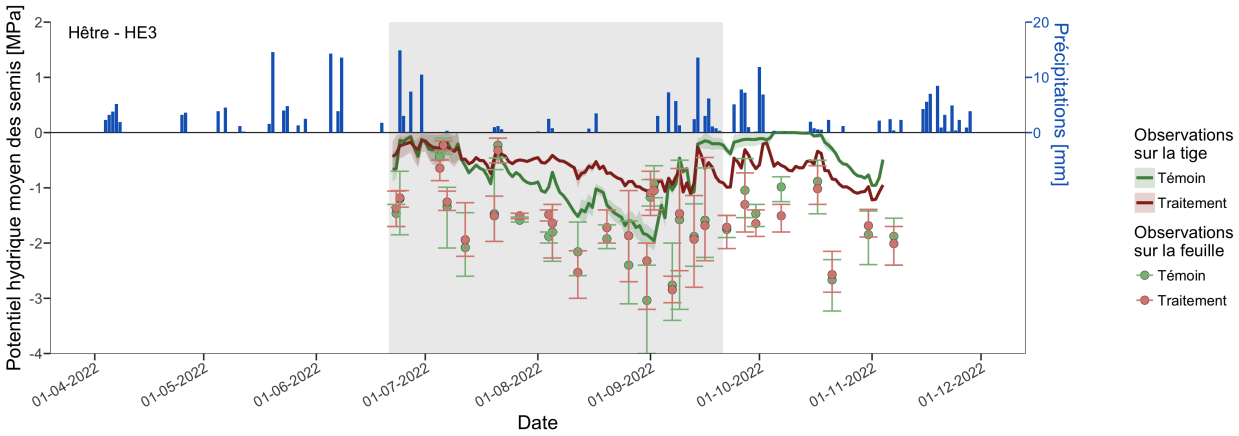

FIGURE 18 – Évolution des potentiels hydriques des semis observés au cours du temps par traitement pour la zone HE3. Les observations comprennent les potentiels sur la tige mesurés continuellement par des PSY1 et sur les feuilles ponctuellement par un AP4. Les intervalles de confiance comprennent les minima et maxima quotidiens. Les zones grisées correspondent à la saison estivale, du 21 juin au 21 septembre. Les données de pluviométrie proviennent du réseau Pamseb CRA-W (2023).

2 Analyse des performances du modèle

2.1 Paramétrisation des fichiers sols

Avant de comparer le fonctionnement hydraulique des semis, les deux fichiers sols ont été adaptés pour reproduire le plus fidèlement possible l'évolution du contenu en eau dans le sol. Ces fichiers sols sont d'une part le fichier créé pour les zones de plateaux du bois de Lauzelle où se trouvent les peuplements de hêtre, et d'autre part celui créé pour les zones de versant des peuplements de chêne. La zone HE1 a été choisie comme zone de calibration pour les premières simulations puisqu'il s'agit de la zone pour laquelle il y a le plus de données disponibles. Les premiers résultats ont montré une teneur en eau trop basse durant l'été sec de 2022, en particulier pour les unités de traitement. Les teneurs en eau ont ainsi été limitées à un point de flétrissement de 0,15 m^3/m^3 pour les horizons minéraux, ce qui a permis de se rapprocher des observations. Les teneurs en eau de la capacité au champ ainsi que les teneurs en eau à saturation ont également été fixées respectivement à 0,45 et 0,5 m^3/m^3. Les distributions des racines fines dans chaque horizon ont aussi été adaptées en augmentant le prélèvement dans les horizons organiques et dans les horizons plus en profondeur.

HETEROFOR fournit le contenu en eau journalier par horizon. Pour pouvoir les comparer aux données de référence mesurées par les TDR qui intègrent les 30 premiers centimètres, une moyenne pondérée des teneurs en eau des horizons a été effectuée sur les résultats d'HETEROFOR. Puisqu'il est difficile de déterminer quels horizons organiques ont été traversés par les TDR, il a été décidé de conserver l'intégralité de ceux-ci. Ils représentent ainsi 8,09 et 4,69 centimètres respectivement pour le hêtre et le chêne. Dans les deux cas, l'horizon Ah a été repris intégralement. L'horizon E n'est pris quant à lui que partiellement pour atteindre les 30 centimètres, soit 11,91 centimètres pour le hêtre et 15,31 centimètres pour le chêne.

La figure 19 montre ainsi les résultats obtenus pour les zones CH1 et HE1 avec le module hydrique par défaut sans la prise en compte de la défaillance hyraulique (voir section 2.5 du chapitre Matériels et méthodes). Cette figure détaille par traitement l'évolution du contenu en eau prédit et observé en 2022 avec les courbes de rétention en eau fournies par défaut par HETEROFOR sur base des fonctions de pédotransfert de Weynants et al. (2009). De manière générale, il peut être constaté que le contenu en eau est sous-estimé. Les variations journalières sont mieux retransmises pour les unités témoins. Les unités de traitement atteignent un plateau autour de 0.2 m^3/m^3, qui est très marqué pour le hêtre. La première recharge à la fin de l'été est visible pour les unités témoins mais pas pour les unités de traitement. La recharge en fin d'année est, quant à elle, prise en compte pour toutes les unités.

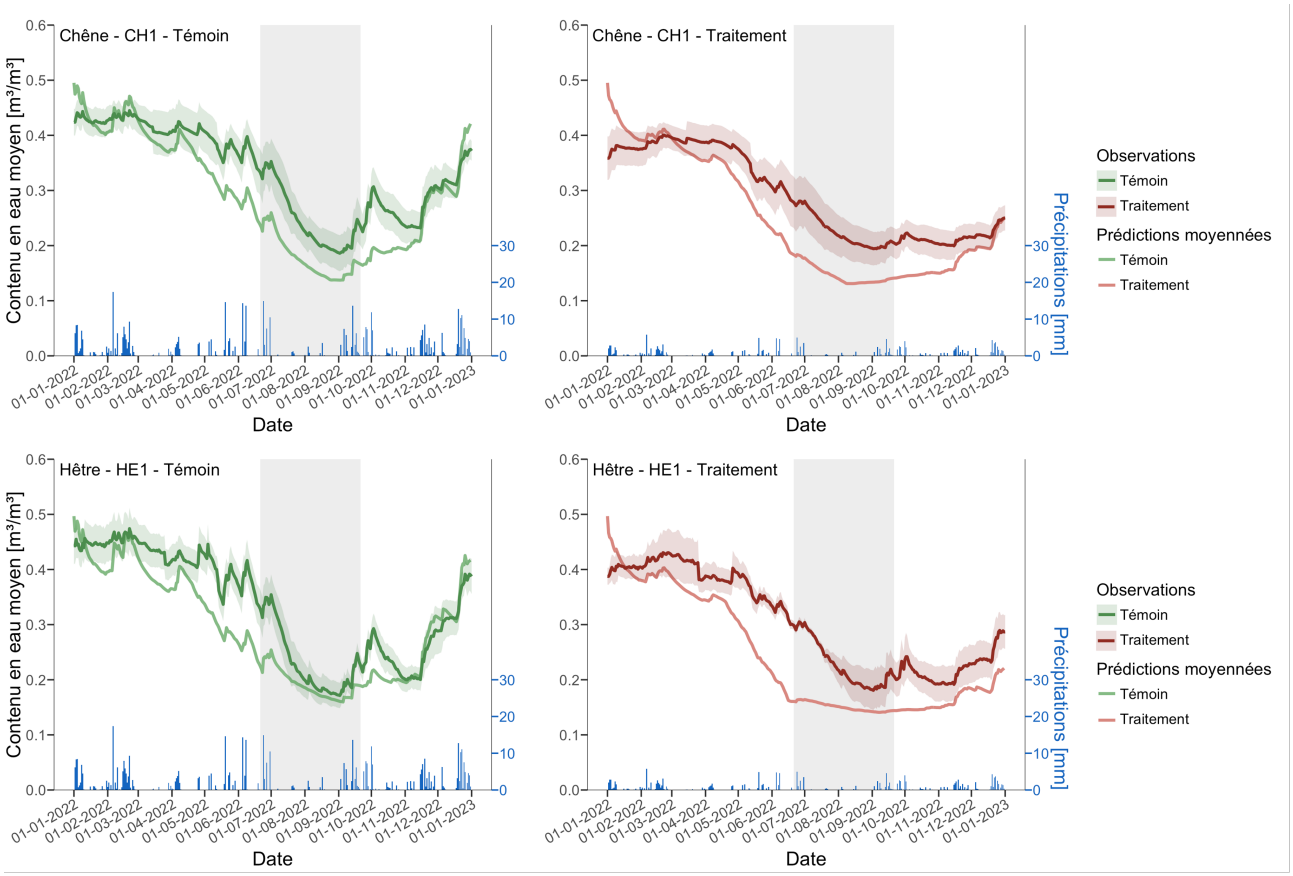

Figure 19 – Évolution des contenus en eau prédits et observés au cours du temps par espèce et par traitement en utilisant les fichiers sols avec les courbes de rétention en eau fournies par défaut par HETEROFOR sur base des fonctions de pédotransfert de Weynants et al. (2009). Les simulations correspondent à la moyenne pondérée des contenus en eau des horizons inclus dans les 30 premiers centimètres de profondeur pour la zone de chêne CH1 (en haut) et de hêtre HE1 (en bas). Les données de référence sont la moyenne des contenu sen eau mesurés par des TDR sur les 30 premiers centimètres de sol. L'intervalle de confiance est fixé à 95%. Les zones grisées correspondent à la saison estivale, du 21 juin au 21 septembre. Les données de pluviométrie proviennent du réseau Pamseb CRA-W (2023).

Pour mieux comprendre la tendance de la moyenne pondérée du contenu en eau des 30 premiers centimètres, le détail de la teneur en eau pour chaque horizon considéré est présenté à la figure 20. Dans chacun des cas, il peut être remarqué que les variations les plus importantes

concernent les horizons organiques OL et OF (courbes claires). Ce sont ces horizons qui sont responsables des variations journalières mieux retransmises pour les unités témoins. Pour les horizons minéraux (courbes foncées), la décharge est très semblable pour les quatre unités. La différence entre traitements n'apparait qu'après la sécheresse estivale. Les horizons minéraux ne se rechargent pas pour les unités de traitement parce que l'apport réduit en précipitations ne permet pas la recharge des horizons organiques. Il n'y a donc pas de transferts hydriques vers les horizons minéraux. Il est important de rappeler que la proportion des horizons organiques est presque deux fois plus élevée pour le hêtre, ce qui abaisse considérablement la moyenne pondérée. Cela explique les valeurs plus faibles pour l'unité de traitement du hêtre par rapport à celles du chêne visibles à la figure 19.

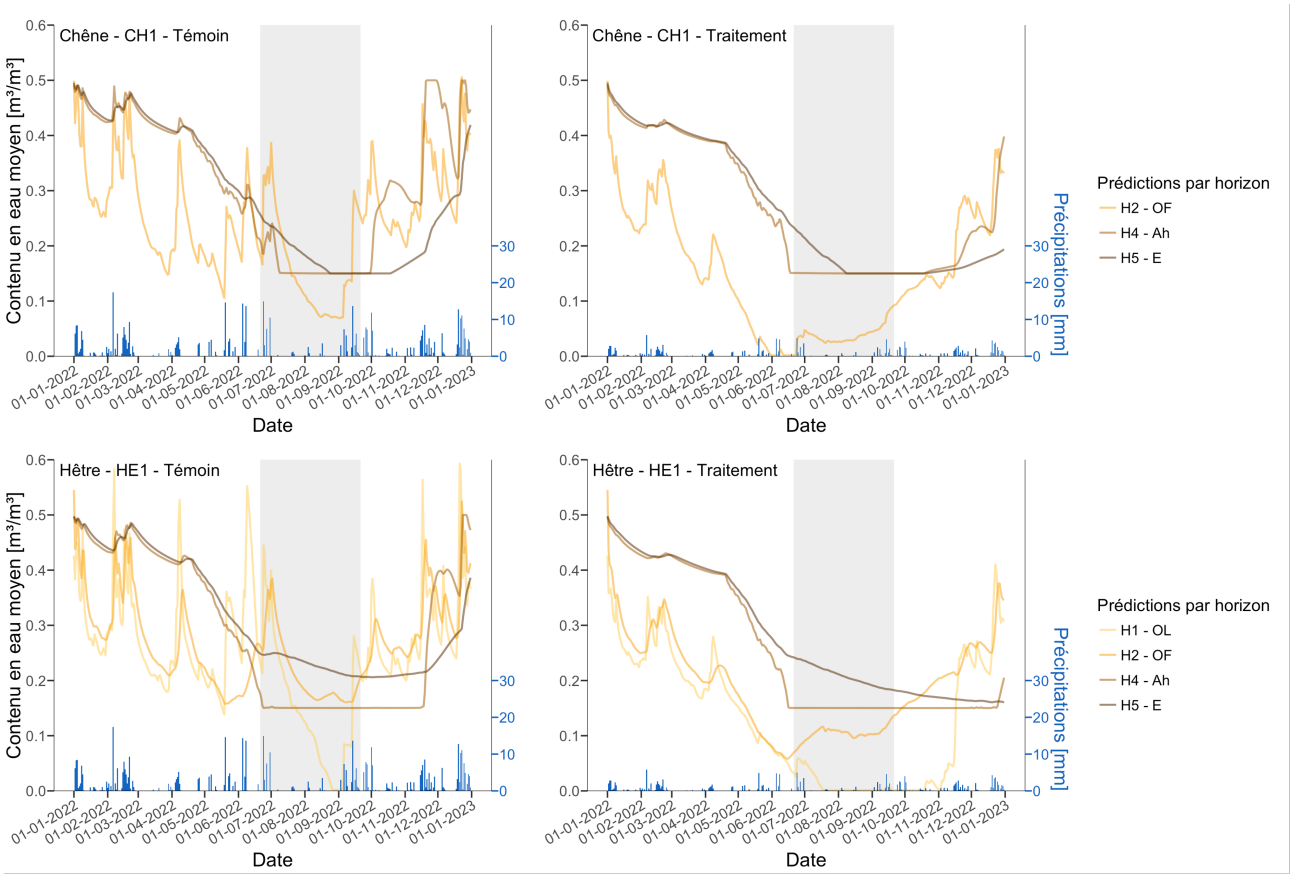

FIGURE 20 – Évolution des contenus en eau prédits par horizon au cours du temps par espèce et par traitement en utilisant les fichiers sols avec les courbes de rétention en eau fournies par défaut par HETEROFOR sur base des fonctions de pédotransfert de WEYNANTS et al. (2009). Les simulations correspondent aux contenus en eau des horizons inclus dans les 30 premiers centimètres de profondeur pour la zone de chêne CH1 (en haut) et de hêtre HE1 (en bas). Les zones grisées correspondent à la saison estivale, du 21 juin au 21 septembre. Les données de pluviométrie proviennent du réseau Pamseb CRA-W (2023).

2.2 Impact des courbes de rétention d'eau

Dans cette section, les paramètres des courbes de rétention présentées dans la section 3.3.2 du chapitre Matériel et méthodes ont été ajoutés aux fichiers sols d'initialisation. Les bornes

supérieures et inférieures des teneurs en eau, soit les teneurs à saturation et résiduelles, sont toujours fixées à 0.5 et 0.15 m^3/m^3 pour les horizons minéraux. Pour les horizons organiques, aucun paramètre de rétention d'eau n'a été fixé. Les paramètres obtenus pour les courbes locales ne permettaient pas d'améliorer les prédictions pour ces horizons-là. Pour le chêne, les meilleurs résultats sont apparus en appliquant les paramètres de rétention obtenus pour la zone HE1, en utilisant pour chaque horizon des zones de chênes les paramètres des horizons de HE1 dont la texture s'en rapprochait le plus.

Les résultats peuvent être comparés aux résultats précédents. La figure 21 montre les prédictions moyennes avec ou sans les courbes de rétention locales. Les données de référence sont affichées sous forme de faisceau des 6 courbes mesurées par les TDR. L'ajout des courbes de rétention permet globalement de rehausser les contenus en eau moyens, les rapprochant ainsi des observations. Ce n'est cependant pas le cas toute l'année pour la zone HE1, pour laquelle le contenu en eau tombe plus bas pendant l'été avec l'ajout des courbes de rétention. En plus de cela, l'amplitude des recharges semble trop importante puisque le contenu eau commence en dessous des observations à la fin de l'été puis les dépasse à la fin de l'année.

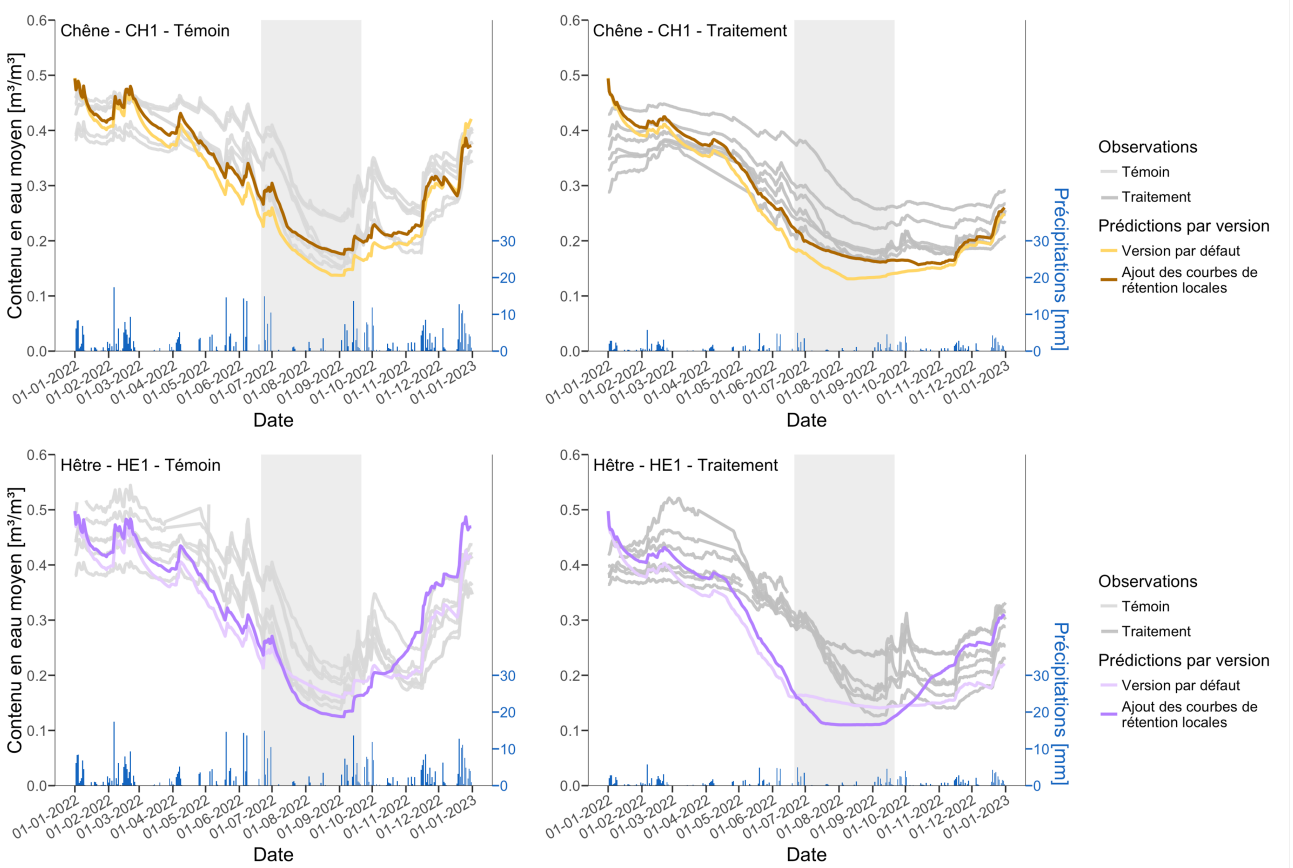

FIGURE 21 – Comparaison des évolutions des contenus en eau prédits et observés au cours du temps par espèce et par traitement en utilisant ou non les courbes de rétention locales. Les simulations correspondent à la moyenne pondérée des contenus en eau des horizons inclus dans les 30 premiers centimètres de profondeur pour la zone de chêne CH1 (en haut) et de hêtre HE1 (en bas). Les données de référence reprennent les contenus en eau mesurés par les six sondes TDR sur les 30 premiers centimètres de sol. Les zones grisées correspondent à la saison estivale, du 21 juin au 21 septembre. Les données de pluviométrie proviennent du réseau Pamseb CRA-W (2023).

Le détail du contenu en eau pour chaque horizon est présenté à la figure 22. De manière générale, les courbes du hêtre sont légèrement abaissées et celles du chêne rehaussées par rapport aux résultats obtenus avec les courbes de rétention par défaut. Les courbes des horizons minéraux sont très proches l'une de l'autre. Ceci est dû au fait que les paramètres des courbes de rétention sont très semblables. Elles ont en effet les mêmes bornes ainsi que des paramètres α et n très similaires (0.00559 cm^{-1} et 1.399 pour l'Ah, 0.00458 cm^{-1} et 1.435 pour l'horizon E). Les courbes des horizons organiques ne changent que très peu puisque les paramètres n'ont pas été modifiés. Seules les transferts hydriques avec les horizons minéraux sont responsables des légères variations.

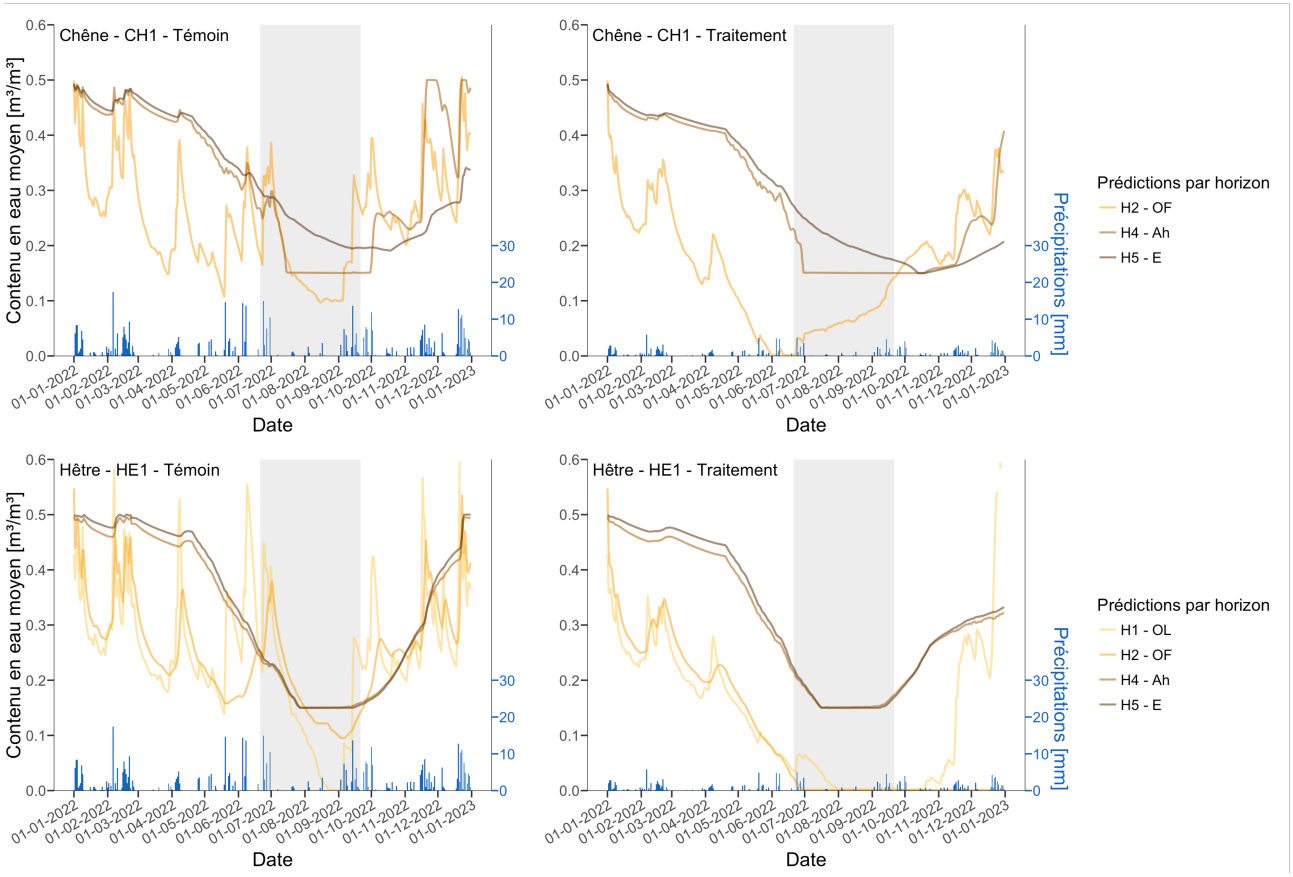

FIGURE 22 – Évolution des contenus en eau prédits par horizon au cours du temps par espèce et par traitement en utilisant ou non les courbes de rétention locales. Les simulations correspondent aux contenus en eau des horizons inclus dans les 30 premiers centimètres de profondeur pour la zone de chêne CH1 (en haut) et de hêtre HE1 (en bas). Les zones grisées correspondent à la saison estivale, du 21 juin au 21 septembre. Les données de pluviométrie proviennent du réseau Pamseb CRA-W (2023).

2.3 Impact de la cavitation

La figure 23 présente les résultats après activation du module de cavitation, avec en comparaison les courbes présentées dans les sections précédentes. Puisque l'ajout des courbes de rétention semblait améliorer les performances du modèle, elles ont aussi été utilisées pour le lancement du module de cavitation. Les différences sont cependant minimes, surtout pour le chêne. Pour le hêtre, la courbe de l'unité soumise à la réduction des pluies fait l'objet d'une

recharge moins prononcée qui atteint 0.25 m^3/m^3, soit 0.05 m^3/m^3 de moins que sans la cavitation. Même si le pic d'apport en eau d'octobre n'est toujours pas visible dans les prédictions, l'activation de la cavitation semble mieux suivre le comportement des observations.

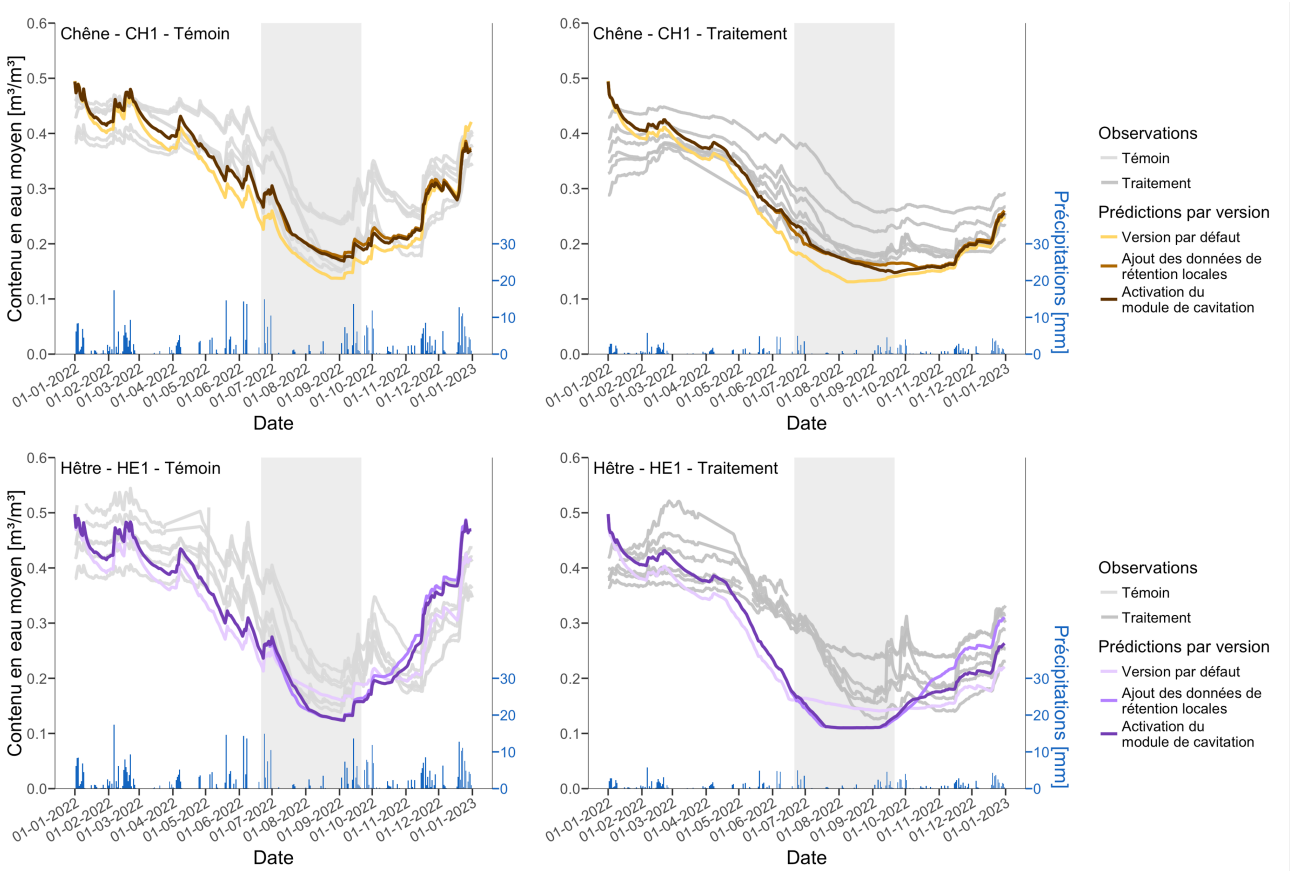

FIGURE 23 – Comparaison des évolutions des contenus en eau prédits et observés au cours du temps par espèce et par traitement en utilisant ou non le module de cavitation. Les simulations correspondent à la moyenne pondérée des contenus en eau des horizons inclus dans les 30 premiers centimètres de profondeur pour la zone de chêne CH1 (en haut) et de hêtre HE1 (en bas). Les données de référence reprennent les contenus en eau mesurés par les six sondes TDR sur les 30 premiers centimètres de sol. Les zones grisées correspondent à la saison estivale, du 21 juin au 21 septembre. Les données de pluviométrie proviennent du réseau Pamseb CRA-W (2023).

2.4 Résultats généraux pour le statut hydrique

Dans cette section sont présentés les résultats pour les quatre variables de comparaison sur base des meilleurs paramètres d'initialisation obtenus pour le contenu en eau. Ces paramètres sont ceux définis dans la section précédente, en activant donc le module de cavitation et en utilisant les courbes de rétention locales. Ainsi, en plus du contenu en eau du sol, les potentiels hydriques du sol, de la tige et des feuilles ont été analysés. La transpiration des arbres adultes a aussi été extraite du modèle pour pouvoir la comparer à celle des cohortes de régénération.

La figure 24 reprend l'évolution des contenus en eau avec en parallèle la transpiration des arbres adultes et des cohortes de régénération. Les courbes sont cette fois-ci regroupées uniquement par espèce pour pouvoir observer les différences entre les unités témoin et de

traitement. Les graphiques du bas permettent d'illustrer l'importance des flux transpiratoires de la futaie et des cohortes de régénération. La transpiration des arbres adultes est comparable pour les deux espèces. Celle des cohortes est cependant plus importante pour le hêtre, ce qui contribue également à assécher plus fortement le sol dans ces zones.

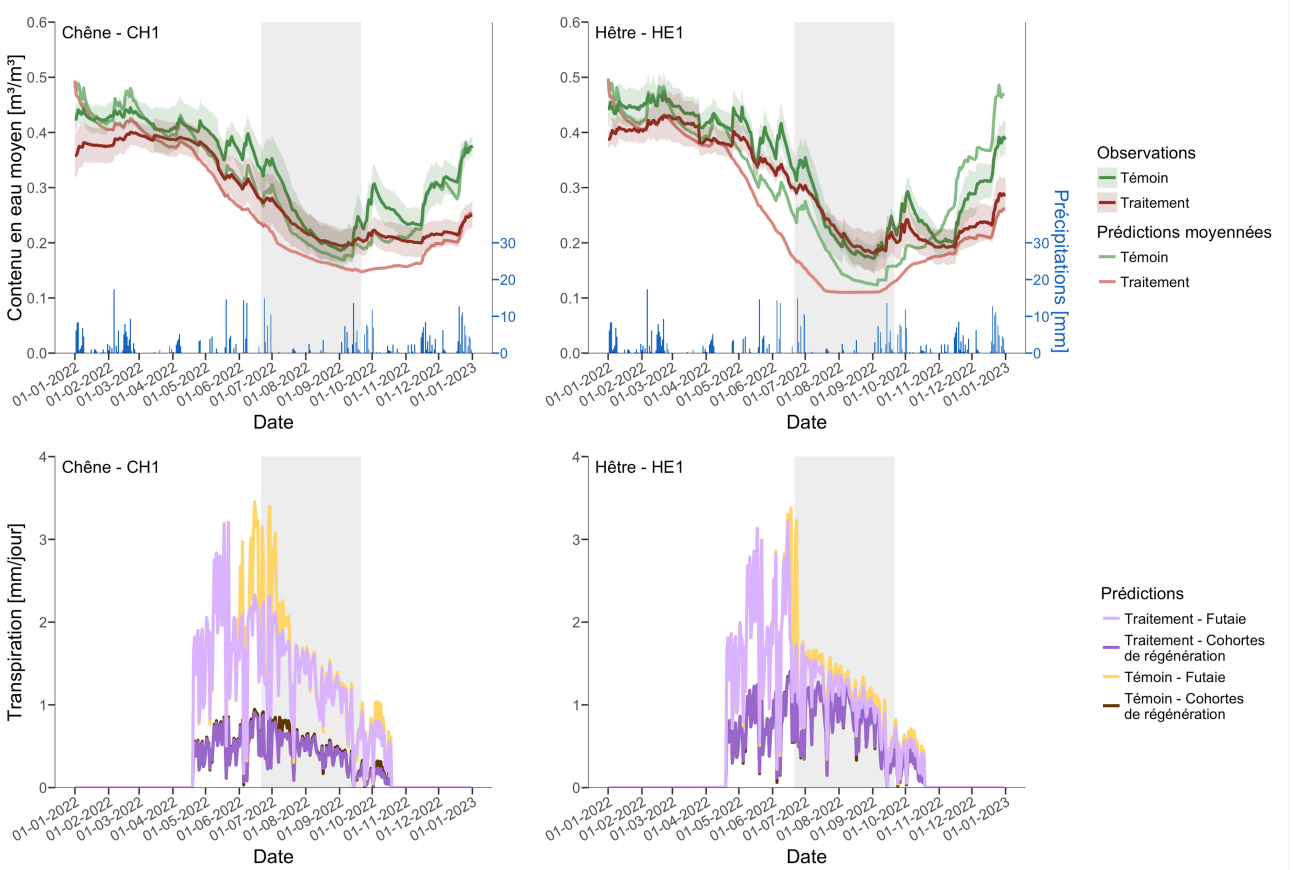

FIGURE 24 – Évolution des contenus en eau observés et prédits ainsi que de la transpiration prédite au cours du temps par espèce et par traitement en utilisant le module de cavitation. Les observations sont la moyenne des contenus en eau mesurés par des TDR sur les 30 premiers centimètres de sol. Chaque courbe correspond ainsi à la moyenne de six mesures. Les intervalles de confiance sont fixés à 95%. La transpiration prédite est normalisée par unité de surface. Les zones grisées correspondent à la saison estivale, du 21 juin au 21 septembre. Les données de pluviométrie proviennent du réseau Pamseb CRA-W (2023).

Les évolutions des potentiels hydriques du sol et des semis sont montrées à la figure 25. Ceux-ci suivent moins bien la tendance des observations. De manière générale, les prédictions atteignent des potentiels plus négatifs pour le chêne que pour le hêtre. Dans les deux cas, le modèle prédit une chute du potentiel hydrique proche de celle des observations. Il ne reproduit cependant pas la deuxième sécheresse après la fin de l'été, ce qui était déjà le cas pour le contenu en eau. Les variations journalières ne sont pas non plus retransmises par le modèle. Les prédictions pour le potentiel hydrique des semis au niveau de la tige et des feuilles sont très proches les unes des autres, celles pour les feuilles étant légèrement plus négatives. Ces différences suivent les observations présentées dans la section 1.2, mais sont moins prononcées.

Il peut être noté également que le potentiel du sol prédit parait plus négatif que celui des semis. Le fonctionnement hydraulique des semis nécessite pourtant d'avoir des potentiels infé-

rieurs à ceux du sol pour maintenir le flux d'eau vers les feuilles. Cette différence est facilement expliquée par le fait que le potentiel hydrique des semis est prédit en intégrant les potentiels hydriques des horizons dans lesquels les racines puisent de l'eau. Le potentiel hydrique du sol est ici montré pour l'horizon Ah qui est celui dans lequel les sondes TEROS était placé. Les variables peuvent donc être comparées entre observations et prédictions, mais difficilement entre les semis et le sol.

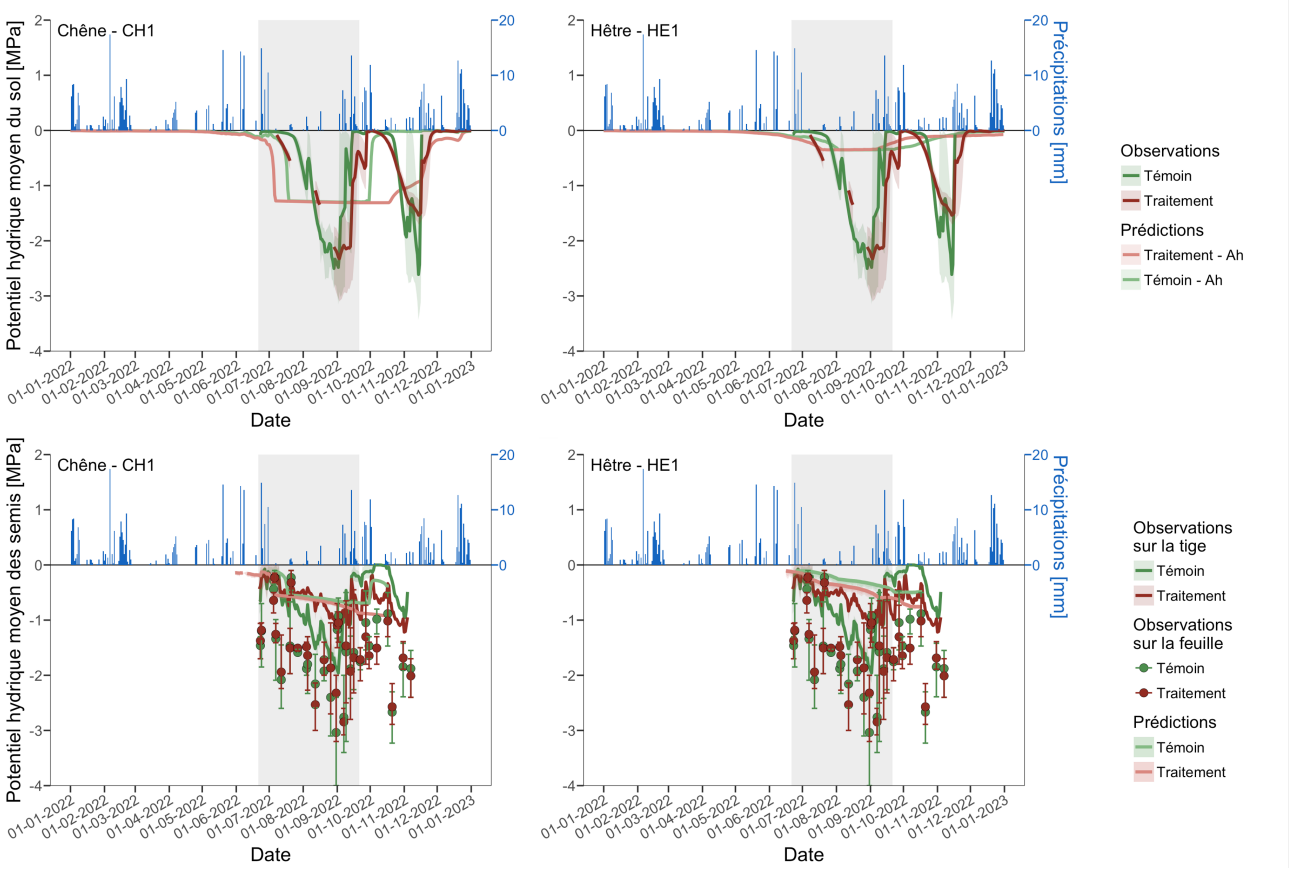

FIGURE 25 – Évolution des potentiels hydriques du sol, de la tige et des feuilles des semis observés au cours du temps par espèce et par traitement en utilisant le module de cavitation. Les données de référence du potentiel hydrique sont la moyenne des potentiels mesurés par des TEROS à 15 centimètres de profondeur. Chaque courbe correspond ainsi à la moyenne de trois mesures. Les observations des potentiels des semis comprennent les potentiels sur la tige mesurés continuellement par des PSY1 et sur les feuilles ponctuellement par un AP4. Les intervalles de confiance comprennent les minima et maxima quotidiens. Les zones grisées correspondent à la saison estivale, du 21 juin au 21 septembre. Les données de pluviométrie proviennent du réseau Pamseb CRA-W (2023).

2.5 Impact des relations allométriques locales

Dans cette section, l'impact des relations allométriques locales sera étudié à travers l'accroissement en hauteur des semis. Les données dendrométriques brutes des semis ont été traitées pour obtenir des données d'accroissement par zone et par traitement. Pour les prédictions d'HETEROFOR, seules une moyenne de la hauteur et une moyenne de l'accroissement sont disponibles par cohorte de régénération. Pour l'ensemble des figures suivantes, deux méthodes

sont testées et comparées : l'une prenant en compte les relations allométriques par défaut d'HETEROFOR et l'autre celles construites dans la section 3.2.3 du chapitre Matériels et méthodes.

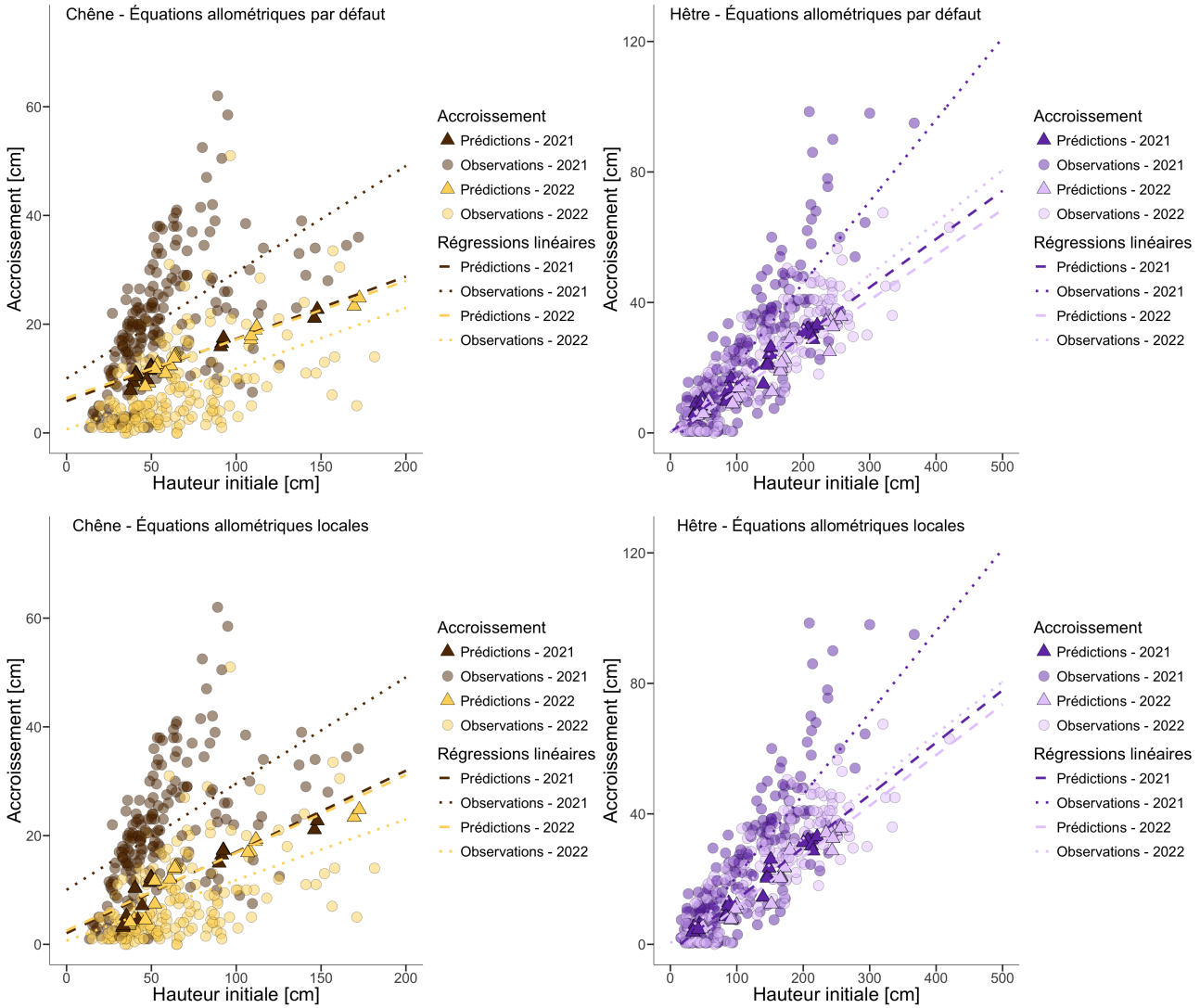

FIGURE 26 – Accroissements mesurés et simulés en fonction de la hauteur des semis distingués par année de croissance et par essence. Les graphiques du haut montrent les prédictions avec les relations allométriques d'HETEROFOR par défaut. Les graphiques du bas montrent celles obtenues avec les relations allométriques locales.

Les accroissements prédits et observés sont distingués par traitement et par année de croissance à la figure 26. Ces graphiques mettent en évidence la différence d'accroissement entre les années 2021 et 2022. La sécheresse de 2022 a été moins propice à l'accroissement en hauteur des semis. Les régressions linéaires des prédictions sont situées entre les deux régressions des observations pour le chêne et légèrement en-dessous de celles du hêtre. Les prédictions varient assez peu entre les deux années puisque les accroissements ne sont pas fonction du statut hydrique du sol mais seulement de la transmittance.

La figure 27 montre la régression orthogonale des valeurs prédites et observées des accroissements. Les graphiques donnent des résultats qui confirment la figure précédente. L'ajout des relations allométriques réduit la variabilité pour le chêne, mais reste semblable pour le hêtre. Le chêne n'est pourtant pas biaisé puisque la droite d'identité est comprise dans son intervalle de confiance. Les résultats montrent également une surestimation de l'accroissement des jeunes

semis et une sous-estimation de celui des plus vieux. Le hêtre montre un comportement inverse, avec un biais puisque la droite d'identité n'est pas incluse dans son intervalle de confiance. L'accroissement pour les semis les plus âgés est lui aussi sous-estimé.

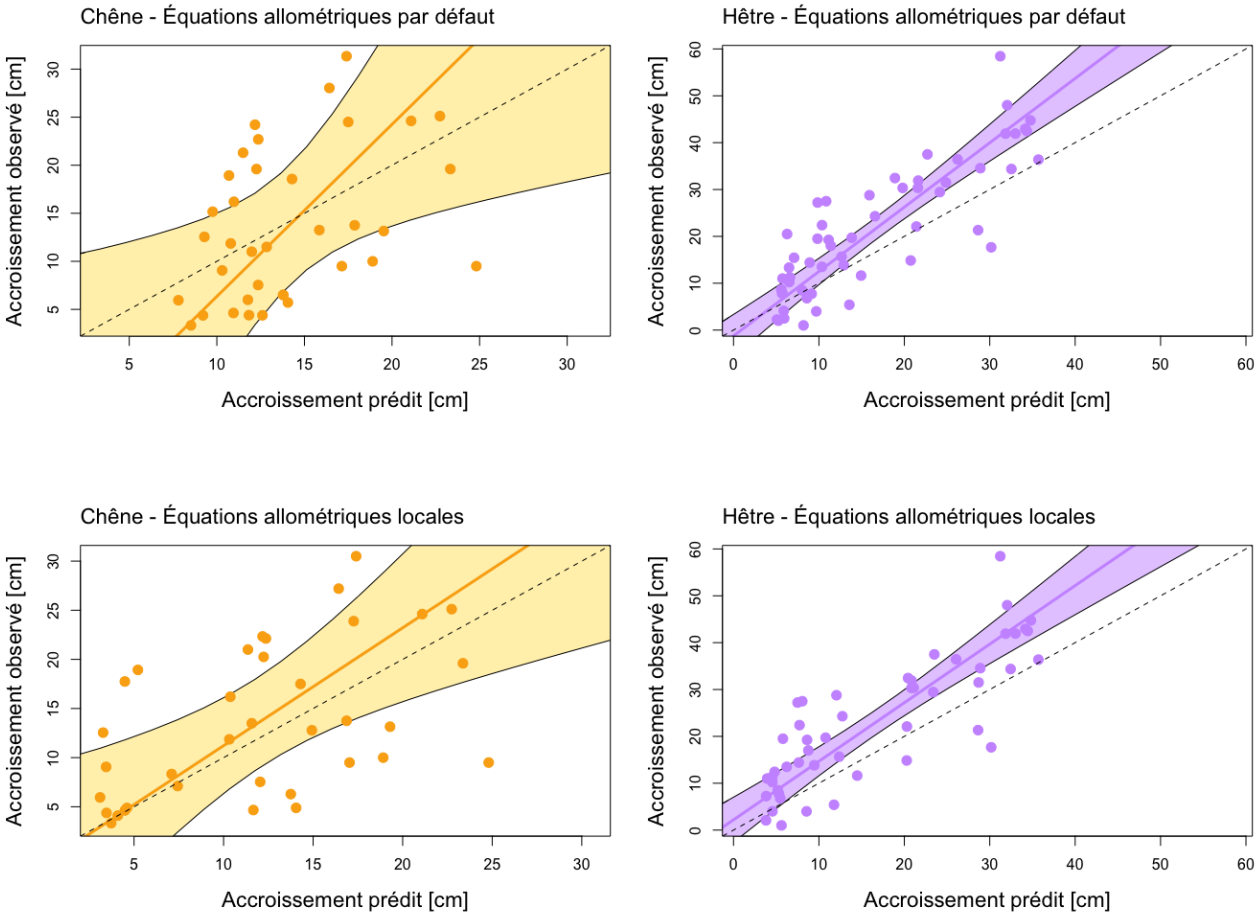

FIGURE 27 – Régression orthogonale entre les valeurs observées et prédites des accroissements pour le chêne (jaune) et le hêtre (violet) avec un intervalle de confiance de 95%. Les graphiques du haut montrent les régressions avec les relations allométriques d'HETEROFOR par défaut. Les graphiques du bas montrent celles obtenues avec les relations allométriques locales.

3 Tests de différentes hypothèses pour expliquer les résultats de l'expérience de réduction des pluies

Cette section vise à répondre aux questionnements soulevés par Guillaume (2023) pour les résultats inattendus de l'évolution du potentiel hydrique de la tige des semis. Ces questionnements peuvent être résumés en trois hypothèses, qui seront ensuite testées avec HETEROFOR. D'abord, le dispositif de réduction des pluies a pu engendrer une distribution des racines différente entre les unités témoins et les unités de traitement. Les racines des semis des unités de traitement pourraient se trouver plus en profondeur à cause de l'apport plus réduit en précipitations, les rendant ainsi plus résilients à la sécheresse de l'été 2022. Ensuite, bien que les centres des unités soient éloignés de quelques mètres, des différences d'éclairement ont été détectées. L'unité témoin aurait reçu trois fois plus d'éclairement que l'unité de traitement, accélérant ainsi la transpiration des semis et la fermeture des stomates. Enfin, les dispositifs pour l'expérience de REGE+ ont nécessité l'installation d'une tranchée de 30 centimètres de profondeur et d'une bâche pour éviter la diffusion latérale d'eau dans le sol entre l'unité de traitement et les environs. L'inconvénient de cette installation réside dans le fait que les racines des arbres adultes à proximité des unités ont pu être endommagées, réduisant ainsi le prélèvement et la transpiration des arbres adultes. Il est tout de même important de rappeler que le nombre de répétitions des observations pour le potentiel hydrique est très faible, atténuant ainsi la fiabilité de ces analyses et hypothèses. Néanmoins, les hypothèses seront testées une à une dans les trois sections suivantes en faisant varier certains paramètres d'HETEROFOR.

3.1 Impact de la distribution racinaire

Pour tester l'influence de la distribution des racines dans les horizons de sol, la proportion des racines dans les horizons intégralement compris dans les 30 premiers centimètres a été augmentée/diminuée et relocalisée dans les horizons plus en profondeur. Ces modifications ont été effectuées proportionnellement à la distribution de racines initiales. Ainsi, pour prendre en exemple la zone HE1, la proportion des racines dans les 30 premiers centimètres équivaut initialement à 50%, avec 5% pour l'OH, 37,5% pour l'Ah et 7,5% dans l'E. Pour augmenter cette proportion de 10% en respectant l'importance de chaque horizon, 1.5% ont été rajoutés dans l'OH et 10% dans l'Ah. La proportion dans l'horizon E a été diminuée de 4% et donc de 1.5% pour sa portion présente dans les 30 premiers centimètres. L'ensemble des scénarios est montré dans le tableau A2 en annexe.

L'impact de la distribution racinaire sur l'évolution du contenu en eau est montré à la figure 28. Les deux espèces suivent le même comportement pour les six premiers mois de l'année pour lesquels l'augmentation de la proportion des racines dans les 30 premiers centimètres fait diminuer le contenu en eau moyen. Cette tendance s'inverse pourtant pour le chêne à partir du mois de juillet, où le contenu en eau des proportions élevées en racines dans les horizons supérieurs s'assèche moins vite (hormis pour la courbe de proportion de 30%).

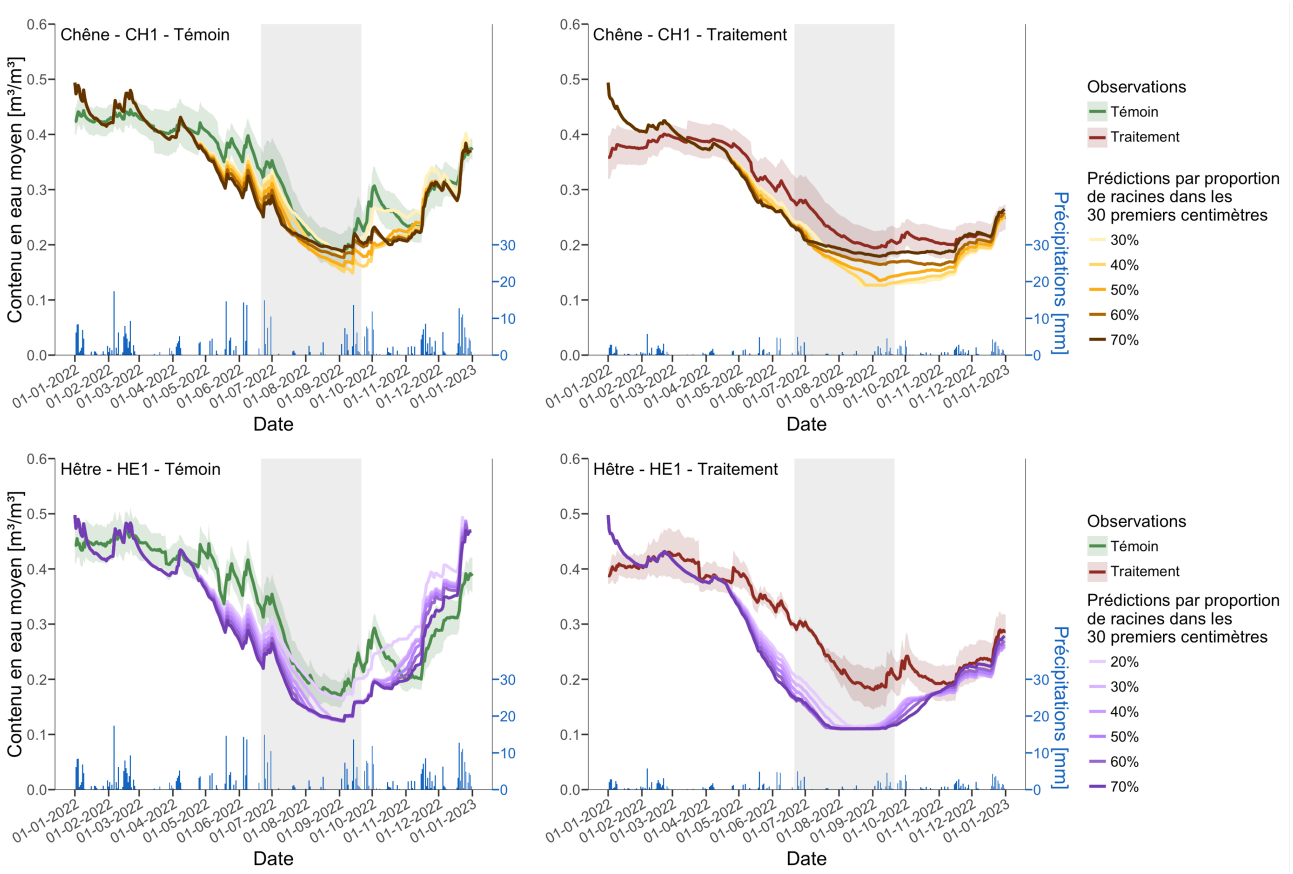

FIGURE 28 – Comparaison des évolutions du contenu en eau du sol prédit et observé au cours du temps par espèce et par traitement en fonction de la proportion racinaire dans les 30 premiers centimètres de profondeur. Les simulations correspondent à la moyenne pondérée des contenus en eau des horizons inclus dans les 30 premiers centimètres de profondeur pour la zone de chêne CH1 (en haut) et de hêtre HE1 (en bas). Les données de référence sont la moyenne des contenus en eau mesurés par des TDR sur les 30 premiers centimètres de sol. L'intervalle de confiance est fixé à 95%. Les zones grisées correspondent à la saison estivale, du 21 juin au 21 septembre. Les données de pluviométrie proviennent du réseau Pamseb (CRA-W, 2023).

L'évolution du potentiel hydrique est plus fastidieuse à analyser puisque les résultats sont bornés. La figure 29 montre que la distribution des racines influence la vitesse de charge et de décharge en eau mais pas son amplitude puisque presque l'ensemble des courbes atteignent un même plateau. Quelques courbes se distinguent du reste, notamment celle pour laquelle 70% des racines se trouvent dans les 30 premiers centimètres pour le chêne. Cette courbe tend à prendre en compte la deuxième période de sécheresse en ayant une deuxième décharge à la fin de l'année.

L'évolution des potentiels hydriques des semis n'apporte pas plus de réponses sur l'influence de la distribution des racines. Les comportements des courbes entre le chêne et le hêtre sont à nouveau opposés. Le potentiel hydrique diminue en effet avec une proportion croissante de racines en profondeur pour le chêne et inversement pour le hêtre. Ces courbes ont été placées en annexe à la figure A4.

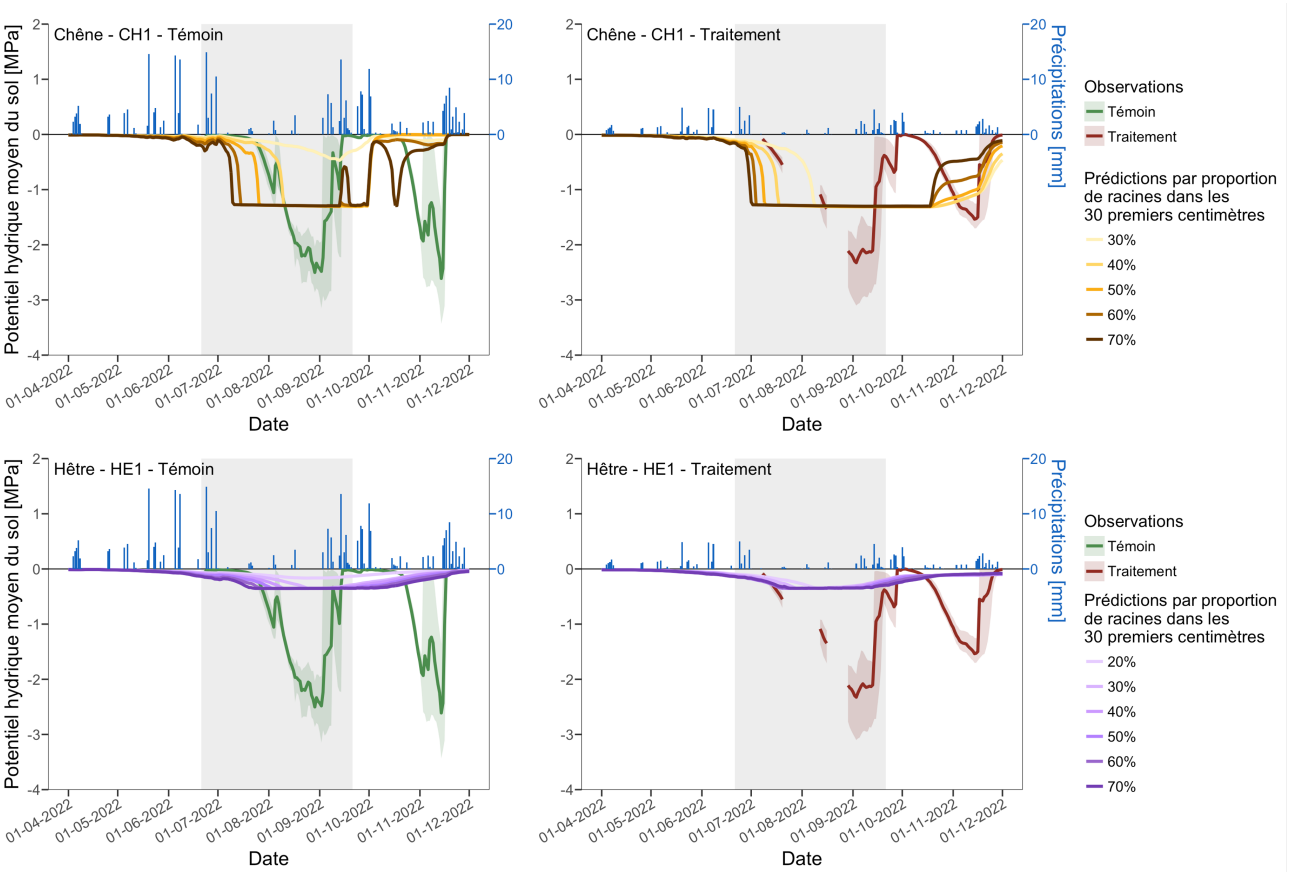

FIGURE 29 – Comparaison des évolutions du potentiel hydrique du sol prédit et observé au cours du temps par espèce et par traitement en fonction de la proportion racinaire dans les 30 premiers centimètres de profondeur. Les simulations correspondent au potentiel hydrique de l'horizon Ah pour la zone de chêne CH1 (en haut) et de hêtre HE1 (en bas). Les données de référence sont la moyenne des potentiels hydriques mesurés par des TEROS à 15 centimètres de profondeur. L'intervalle de confiance est fixé aux potentiels minimum et maximum journaliers. Les zones grisées correspondent à la saison estivale, du 21 juin au 21 septembre. Les données de pluviométrie proviennent du réseau Pamseb (CRA-W, 2023).

Des tests supplémentaires auraient pu être effectués en relocalisant les racines des trois premiers horizons encore plus en profondeur sans respecter les importances respectives initiales des distributions des racines. Par exemple, les proportions des racines de l'horizon E auraient pu être maintenues constantes au lieu de les diminuer.

3.2 Impact de la transpiration des arbres adultes

Pour tester l'impact de la création de la tranchée sur l'unité de traitement, la transpiration des arbres adultes a été modifiée dans le calcul du statut hydrique du sol.

La figure 30 montre ainsi l'évolution du contenu en eau au cours du temps en fonction de 0%, 25%, 50%, 75% et 100% de la transpiration initiale des arbres adultes. Ces simulations ont été réalisées uniquement pour la zone HE3 puisque c'est la seule qui contenait des données de potentiel hydrique. Le retrait progressif de la transpiration des arbres adultes (de 100%

vers 0%) provoque une élévation des courbes du contenu en eau. Pour l'unité témoin, ce test n'améliore pas les prédictions puisque même si les courbes de 75% et de 50% se rapprochent des observations, les tendances sont moins bien respectées. En effet, la décharge de ces courbes est moins intense puisque les arbres prélèvent moins. Pour l'unité de traitement, la décharge de la version de référence (100%) est trop rapide par rapport aux observations. L'enlèvement d'une partie de la transpiration des arbres adultes (75% et 50%) atténue l'intensité de la décharge pour mieux correspondre aux observations. Il peut être aussi noté que pour cette zone, la recharge à la fin de l'été est prise en compte pour les deux unités.

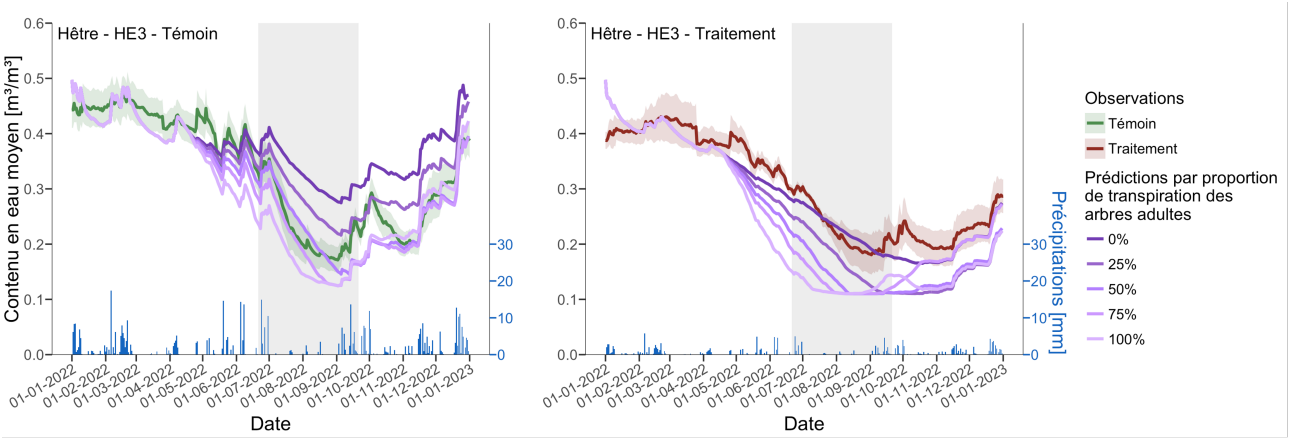

FIGURE 30 – Comparaison des évolutions du contenu en eau du sol prédit et observé au cours du temps par espèce et par traitement en fonction de la transpiration de la futaie. Les simulations correspondent à la moyenne pondérée des contenus en eau des horizons inclus dans les 30 premiers centimètres de profondeur pour la zone de hêtre HE3. Les données de référence sont la moyenne des contenus en eau mesurés par des TDR sur les 30 premiers centimètres de sol. L'intervalle de confiance est fixé à 95%. Les données de pluviométrie proviennent du réseau Pamseb (CRA-W, 2023). Les zones grisées correspondent à la saison estivale, du 21 juin au 21 septembre.

Les résultats semblent confirmer l'hypothèse de la réduction de la transpiration des arbres adultes. Cependant les simulations réalisées durant ce test surestiment cette réduction. La réduction a pu avoir un effet sur l'évolution du contenu en eau mais ne peut pas expliquer entièrement les différences.

Les potentiels hydriques n'ont pas donné plus de résultats pouvant valider l'hypothèse de la transpiration des arbres adultes (Figures A5 et A6 en annexe).

3.3 Impact de l'éclairement

Dans cette section, l'hypothèse de l'éclairement est étudiée. Des capteurs ont mesuré le rayonnement photosynthétiquement actif dans les unités de la zone HE3. Une différence du rayonnement transmis sous la canopée a été détectée entre l'unité de traitement et l'unité témoin. L'unité témoin a reçu près de trois fois plus de rayonnement que l'unité de traitement.

Plusieurs méthodes ont été envisagées pour tester différents scénarios d'éclairement. La première consistait à augmenter la radiation horaire dans le fichier d'initialisation comprenant les données climatiques. L'inconvénient de cette méthode provient du fait que l'entièreté du

peuplement aurait été soumis à une radiation plus élevée et non uniquement le sous-étage. L'indice de surface foliaire LAI aurait également pu être modifié pour que les arbres adultes transmettent une proportion plus importante de rayonnement aux cohortes. Cela aurait cependant impacté la transpiration des arbres adultes en baissant leur surface foliaire. La troisième méthode proposait de simuler des éclaircies au début de l'année 2022 pour créer des trouées et augmenter l'apport en lumière. Aucune de ces méthodes ne permettent idéalement d'augmenter le rayonnement en sous-étage sans impacter la transpiration des arbres adultes. La méthode des éclaircies a dès lors été choisie.

Des éclaircies ont ainsi été effectuées à divers degrés d'intensité. Elles ont été définies sur base de la surface terrière initiale du peuplement de hêtre de la zone HE3 (28 m^2/ha). Cinq scénarios ont été simulés et nommés en fonction du pourcentage de surface terrière initiale : 100% (scénario de référence), 75%, 50%, 25% et 0%.

Les résultats sont montrés dans la figure 31. Les différences entre les courbes sont moins marquées qu'en limitant la transpiration des arbres comme dans la section précédente. Le prélèvement d'arbres a cependant pour effet de rehausser la moyenne du contenu en eau des 30 premiers centimètres du sol. Le prélèvement des arbres par les éclaircies réduit la transpiration totale des arbres, mais celle-ci est presqu'entièrement compensée par l'augmentation de la transpiration des semis. A nouveau, les résultats des potentiels hydriques ne permettent pas d'appuyer ou d'infirmer l'hypothèse de l'impact du rayonnement.

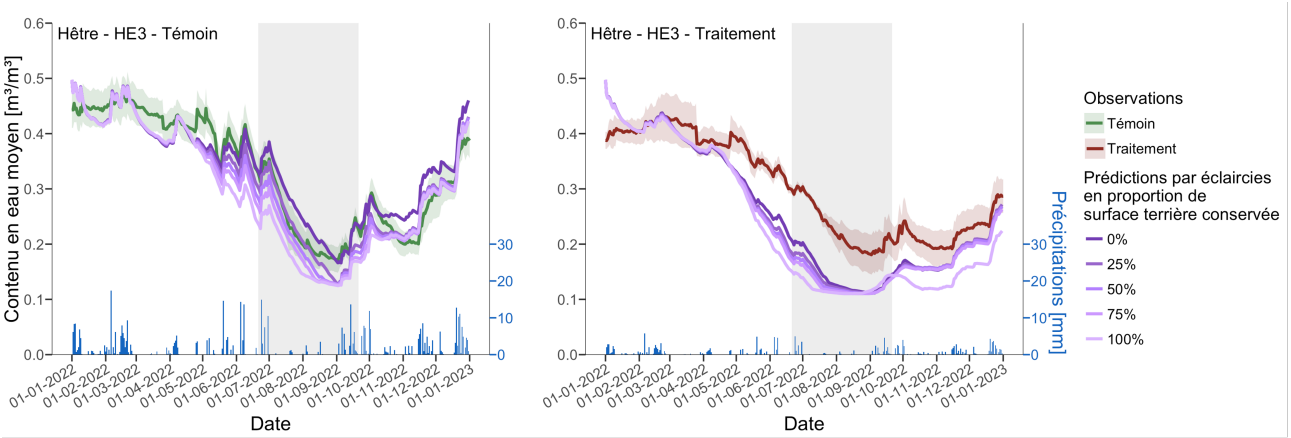

FIGURE 31 – Comparaison des évolutions du contenu en eau du sol prédit et observé au cours du temps par espèce et par traitement en fonction de la surface terrière après éclaircie. Les simulations correspondent à la moyenne pondérée des contenus en eau des horizons inclus dans les 30 premiers centimètres de profondeur pour la zone de hêtre HE3. Les données de référence sont la moyenne des contenus en eau mesurés par des TDR sur les 30 premiers centimètres de sol. L'intervalle de confiance est fixé à 95%. Les zones grisées correspondent à la saison estivale, du 21 juin au 21 septembre. Les données de pluviométrie proviennent du réseau Pamseb (CRA-W, 2023).

Discussion

Ce dernier chapitre synthétise les résultats et reprend les discussions commencées dans le chapitre précédent.

Les meilleurs performances du modèle ont été réalisées en tenant compte des courbes de rétention locales et en activant le module de la défaillance hydraulique. Ces performances ont cependant été établies uniquement sur base de l'évolution du contenu en eau. Elles auraient pu être effectuées en parallèle sur les potentiels hydriques du sol et des semis. D'autres tests auraient pu être effectués pour essayer d'éviter l'apparition des plateaux pour les potentiels hydriques.

Les évolutions des potentiels hydriques prédits n'ont donc pas pu aider à affirmer ou à infirmer les hypothèses de la distribution des racines, de la transpiration des arbres adultes et de l'éclairement local. Les plateaux proviennent probablement des courbes de rétention locales. En effet, HETEROFOR calcule la conductivité du sol sur base des paramètres des courbes de rétention selon les fonctions de pédotransfert de Weynants et al. (2009). Vu que les paramètres ont été optimisés seulement pour les courbes de rétention, il est possible que les paramètres de conductivité calculés ne soient pas très réalistes. Une analyse supplémentaire des données de conductivité récoltées lors de la mesure de la rétention d'eau avec HYPROPFIT aurait pu être intéressante. Celles-ci auraient pu ensuite être comparées aux conductivités calculées par le modèle. La deuxième explication pour ces plateaux peut provenir valeurs fixées pour les teneurs à saturation et les teneurs au point de flétrissement des horizons Ah et E.

Les analyses des trois hypothèses ont par conséquent été menées sur l'évolution du contenu en eau. La distribution des racines dans les différents horizons de sol est l'hypothèse qui est la moins affirmée par les résultats. Le contenu en eau semble relativement peu sensible à la distribution des racines. Des tests supplémentaires en faisant varier les racines encore plus en profondeur pourraient appuyer ou non cette hypothèse.

Le statut hydrique est très sensible à la variation de la transpiration des arbres adultes. Les réductions de la transpiration sont cependant très importants. Il était difficile de déterminer quelle proportion de la transpiration des arbres adultes aurait pu être réduite lors de la création de la tranchée. Elles devraient toutefois être inférieure à 25%.

La dernière hypothèse concernant la différence d'éclairement local a été simulée à travers des éclaircies à divers degrés d'intensité. Ces éclaircies ont produit l'effet escompté mais au prix du changement de la transpiration des arbres adultes à l'échelle du peuplement. La différence avec le test précédent est que les arbres adultes ne sont pas simplement retirés du calcul du statut hydrique du sol mais bien prélevés du peuplement. L'éclairement arrivant sur les semis est donc bien augmenté au contraire du test précédent. La transpiration des cohortes a donc augmenté, compensant ainsi la perte de transpiration des arbres adultes.

Conclusion

Ce mémoire visait à interpréter les résultats d'une expérience menée par REGE+ portant sur l'impact d'une réduction des pluies sur le statut hydrique de semis de chêne et de hêtre. Tout le travail a été réalisé en utilisant le modèle HETEROFOR pour reproduire la dynamique temporelle de la teneur en eau moyenne sur les 30 premiers centimètres du sol, du potentiel hydrique du sol à 15 centimètres de profondeur, du potentiel hydrique de la tige et des feuilles des semis ainsi que de leur accroissement. Les teneurs en eau et les accroissements ont bien été reproduits par le modèle en utilisant les courbes de rétention locales et le nouveau module hydrique qui tient compte de la mémoire de réponse au stress hydrique. Les prédictions de l'évolution des potentiels hydriques du sol et des semis ont montré des résultats moins satisfaisants. Même si le modèle prédisait bien la baisse des potentiels lors de la sécheresse estivale, les variations journalières n'ont pas été retrouvées dans les prédictions.

Après l'analyse des performances du modèle, trois types de scénarios ont été simulés pour tenter d'expliquer les potentiels hydriques plus négatifs pour l'unité témoin sur les semis. Ces scénarios n'ont pas pu être analysés pour le potentiel hydrique mais des enseignements ont pu être tirés de l'évolution du contenu en eau du sol. D'abord, l'influence du déplacement des racines dans les horizons plus en profondeur sur le contenu en eau n'a pas permis de valider la première hypothèse qui soutenait que les semis soumis à la réduction des pluies développeraient des racines plus en profondeur. Ensuite, la transpiration des arbres adultes a été progressivement retirée du calcul du statut hydrique du sol. Ce test avait été réalisé suite à la création de la tranchée nécessaire au dispositif de réduction des pluies. Le contenu en eau s'est révélé être très sensible au prélèvement par les arbres adultes. Les proportions de transpiration enlevées dans le calcul du statut hydrique du sol sont cependant trop importantes par rapport à ce que la tranchée aurait pu provoquer. Enfin, le dernier test concernait la mise en place d'éclaircies pour mettre en lumière les cohortes de régénération. Ce test comprenait cependant un effet secondaire de réduction de la transpiration des arbres adultes. Les résultats ont montré que la transpiration des cohortes de régénération contre-balançait la perte de celle des arbres adultes.

Aucune des trois hypothèses n'a pu être entièrement validée par les résultats des scénarios de distribution racinaire, de la transpiration des arbres adultes et de l'éclairement local. Les simulations ont néanmoins mis en évidence quelques limites du modèle, notamment les fonctions de pédotransfert liant la conductivité du sol à sa rétention. Les résultats ont toutefois pu valider le fonctionnement du module de la défaillance hydraulique.

La récolte des données utilisées dans le cadre de ce mémoire s'est clôturée avant la fin de l'expérience de REGE+. L'analyse des données récoltées en 2023 sera intéressante car elle permettra d'identifier potentiellement les séquelles de la forte sécheresse de l'année 2022.

Bibliographie

Agnan, Y. (2021). *LBIR1336 - Sciences du sol et excursions intégrées - Fiches stationelles*.

Alcamo, J., Ash, N. J., Butler, C. D., Calicott, J. B., Capistrano, D., Carpenter, S. R., Castilla, J. C., Chambers, R., Chopra, K., Cropper, A., Daily, G. C., Dasgupta, P., de Groot, R., Dietz, T., & Duraiappah, A. K. (2003). *Ecosystems and human well-being : a framework for assessment*. Island Press.

Ball, J., Woodrow, I., & Berry, J. (1987). A Model Predicting Stomatal Conductance and Its Contribution to the Control of Photosynthesis Under Different Environmental Conditions. *Progress in Photosynthesis Research*, *4*, 221-224. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0519-6_48

Baudry, O. (2014). Bois de Lauzelle - Plan d'aménagement 2015-2035.

Belzile, L. (s. d.). *The lm function*. Récupérée 9 novembre 2023, à partir de https://lbelzile.github.io/lineaRmodels/the-lm-function.html

Bonheure, M. (2022). Effets des caractéristiques du peuplement et du traitement sylvicole sur la résilience des forêts face aux tempêtes dans le contexte du changement climatique. *UCLouvain*.

Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Péan, C. (2023). *IPCC, 2023 : climate change 2023 : synthesis report. contribution of working groups i, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Récupérée 15 août 2024, à partir de https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/

Claessens, H., Grégoire, J.-C., Guns, A., Himpens, S., Hoyaux, J., Laurent, C., Marbaix, P., Marchal, D., Mertens, P., Ponette, Q., Servais, A., Vancayemberg, F., & Vincke, C. (2017). *Le changement climatique et ses impacts sur les forêts wallonnes. Recommandations aux décideurs, propriétaires et gestionnaires* (Brieuc Quévy).

Courbaud, B., Coligny, F., & Cordonnier, T. (2003). Simulating radiation distribution in a heterogeneous Norway spruce forest on a slope. *Agricultural and Forest Meteorology*, *116*, 1-18. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00254-X

Couvreur, V., Ledder, G., Manzoni, S., Way, D. A., Muller, E. B., & Russo, S. E. (2018). Water transport through tall trees : a vertically explicit, analytical model of xylem hydraulic conductance in stems. *Plant, Cell & Environment*, *41*(8), 1821-1839. https://doi.org/10.1111/pce.13322

CRA-W. (2023). *Réseau Pameseb* [Agromet.be]. Récupérée 6 novembre 2023, à partir de https://agromet.be/fr/reseau-pameseb/

De Liocourt, F. (1898). De l'aménagement des sapinières. *Bulletin trimestriel - Société forestière de Franche-Comté & Belfort*, p. 396-409.

Decoster, I. (s. d.). *L'UCLouvain récompensée pour la gestion durable du Bois de Lauzelle* [UCLouvain]. Récupérée 11 octobre 2023, à partir de https://uclouvain.be/fr/decouvrir/

presse / actualites / l - uclouvain - recompensee - pour - la - gestion - durable - du - bois - de - lauzelle.html

de Lima, R. P., da Silva, A. R., & da Silva, Á. P. (2021). soilphysics : An R package for simulation of soil compaction induced by agricultural field traffic. *Soil and Tillage Research*, *206*, 104824. https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104824

de Wergifosse, L., André, F., Beudez, N., de Coligny, F., Goosse, H., Jonard, F., Ponette, Q., Titeux, H., Vincke, C., & Jonard, M. (2020). HETEROFOR 1.0 : a spatially explicit model for exploring the response of structurally complex forests to uncertain future conditions – Part 2 : Phenology and water cycle. *Geoscientific Model Development*, *13*(3), 1459-1498. https://doi.org/10.5194/gmd-13-1459-2020

Dixon, H. H., & Joly, J. (1895). II. On the ascent of sap. *Proceedings of the Royal Society of London*, *57*(340), 3-5. https://doi.org/https://doi.org/10.1098/rspl.1894.0126

Draye, X., & Lutts, S. (2020). *LBIR1251 - Physiologie végétale*.

Dufour-Kowalski, S., Courbaud, B., Dreyfus, P., Meredieu, C., & Coligny, F. (2011). Capsis : An open software framework and community for forest growth modelling. *Annals of Forest Science*, *69*, 221-233. https://doi.org/10.1007/s13595-011-0140-9

Dufrêne, E., Davi, H., François, C., Maire, G. l., Dantec, V. L., & Granier, A. (2005). Modelling carbon and water cycles in a beech forest : Part I : Model description and uncertainty analysis on modelled NEE. *Ecological Modelling*, *185*(2), 407-436. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.01.004

Farquhar, G., von Caemmerer, S., & Berry, J. (1980). A biochemical model of photosynthetic CO. *Planta*, *149*, 78-90. https://doi.org/10.1007/BF00386231

Ferraris, J.-J.-F. (1771). Carte de cabinet des Pays-Bas autrichiens levée à l'initiative du comte de Ferraris. Récupérée 13 août 2024, à partir de https://opac.kbr.be/library/publication.aspx?_lg=nl-BE

Grote, R., & Pretzsch, H. (2002). A model for individual tree development based on physiological processes. *Plant Biology*, *4*(2), 167-180. https://doi.org/10.1055/s-2002-25743

Guillaume, F. (2023). Impact d'un dispositif de réduction des précipitations sur le statut hydrique de semis de chênes et de hêtres. *UCLouvain*.

Helliwell, D. R. (1997). Dauerwald. *Forestry : An International Journal of Forest Research*, *70*(4), 375-379. https://doi.org/10.1093/forestry/70.4.375

Ihaka, R. (s. d.). *R : Fitting Linear Models*. Récupérée 9 novembre 2023, à partir de https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/stats/html/lm.html

Jacquemin, F., Kervyn, T., Branquart, E., Delahaye, L., Dufrêne, M., & Claessens, H. (2014). Les forêts anciennes en Wallonie. 1ère partie : Concepts généraux.

Johnson, D. M., Wortemann, R., McCulloh, K. A., Jordan-Meille, L., Ward, E., Warren, J. M., Palmroth, S., & Domec, J.-C. (2016). A test of the hydraulic vulnerability segmentation hypothesis in angiosperm and conifer tree species. *Tree Physiology*, *36*(8), 983-993. https://doi.org/10.1093/treephys/tpw031

Jonard, M., André, F., de Coligny, F., de Wergifosse, L., Beudez, N., Davi, H., Ligot, G., Ponette, Q., & Vincke, C. (2020). HETEROFOR 1.0 : a spatially explicit model

for exploring the response of structurally complex forests to uncertain future conditions – Part 1 : Carbon fluxes and tree dimensional growth. *Geoscientific Model Development*, *13*(3), 905-935. https://doi.org/10.5194/gmd-13-905-2020

Lamarque, P., Tondeur, A., Marbaix, P., Gaino, B., & van Ypersele, J.-P. (2022). *L'adaptation aux changements climatiques en Wallonie : synthèse et points d'attention pour l'actualisation des connaissances*. Plateforme wallonne pour le GIEC.

Latte, N., Perin, J., Lejeune, P., & Claessens, H. (2022). Le point sur l'équilibre feuillus/résineux et son évolution en forêt wallonne. *Forêt.Nature*, *165*. Récupérée 14 août 2024, à partir de https://foretnature.be/article-foret-nature/le-point-sur-lequilibre-feuillus-resineux-et-son-evolution-en-foret-wallonne/

Möller, A. (1922). *Der Dauerwaldgedanke : Sein Sinn und seine Bedeutung*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-50866-0

Pammenter, N., & Willigen, C. (1998). A mathematical and statistical analysis of the curves illustrating vulnerability of xylem to cavitation. *Tree physiology*, *18*, 589-593. https://doi.org/10.1093/treephys/18.8-9.589

Perre, R., Bythell, S., Bogaert, P., Claessens, H., Ridremont, F., Tricot, C., Vincke, C., & Ponette, Q. (2015). La carte bioclimatique de Wallonie : un nouveau découpage écologique du territoire pour le choix des essences forestières. *Forêt.Nature*, *135*, 47-58.

Picard, N., Saint-Andre, L., & Henry, M. (2012). *Manual for building tree volume and biomass allometric equations : from field measurement to prediction*. FAO/CIRAD. Récupérée 13 avril 2023, à partir de http://www.fao.org/docrep/018/i3058e/i3058e.pdf

Pinheiro, J., & Bates, D. (s. d.). *R : Akaike's An Information Criterion*. Récupérée 8 novembre 2023, à partir de https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/stats/html/AIC.html

Pommerening, A. (2004). A review of the history, definitions and methods of continuous cover forestry with special attention to afforestation and restocking. *Forestry*, *77*(1), 27-44. https://doi.org/10.1093/forestry/77.1.27

Pretzsch, H., Forrester, D. I., & Rötzer, T. (2015). Representation of species mixing in forest growth models. A review and perspective. *Ecological Modelling*, *313*, 276-292. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.06.044

ProSilva. (s. d.). *History of Foundation of PROSILVA Europa 1989* [Pro Silva]. Récupérée 14 août 2024, à partir de https://www.prosilva.org/founding/

REGE+. (2022). *Expérience de limitation des pluies*. Récupérée 12 avril 2023, à partir de https://www.regeplus.be/fr/data-sets/rainfall-limitation-experiment/

Ripley, B.-D. (s. d.). *R : Extract AIC from a Fitted Model*. Récupérée 8 novembre 2023, à partir de https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/stats/html/extractAIC.html

Ryan, M. G., Phillips, N., & Bond, B. J. (2006). The hydraulic limitation hypothesis revisited. *Plant, Cell & Environment*, *29*(3), 367-381. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01478.x

Ryan, M. G., & Yoder, B. J. (1997). Hydraulic Limits to Tree Height and Tree Growth. *BioScience*, *47*(4), 235-242. https://doi.org/10.2307/1313077

Ryelandt, B. (2019). Modeling oak and beech regeneration in mixed and uneven-aged forests : a process-based approach for changing environments.

Sanderson, J., Whitbread, F. C., & Clarkson, D. T. (1988). Persistent xylem cross-walls reduce the axial hydraulic conductivity in the apical 20 cm of barley seminal root axes : implications for the driving force for water movement. *Plant, Cell & Environment*, *11*(4), 247-256. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1988.tb01143.x

Schenke, C. (s. d.). *Relief de la Wallonie - Modèle Numérique de Terrain (MNT) 2021-2022*. https://metawal.wallonie.be/geonetwork/srv/api/records/a004e570-99d6-4fe5-b83d-49b774409278

SPW. (2015). *Carte numérique des sols de wallonie - série*. Récupérée 5 août 2024, à partir de https://metawal.wallonie.be/geonetwork/geoportailwal/api/records/c5bedf2b-1cac-4231-9d9a-854e0ef2c9ce

Taiz, L., Angus, M., Moller, I. M., & Zeiger, E. (2015). *Plant Physiology and Development, Sixth Edition*. Sinauer Associates Incorporated.

Termonia, P., Schaeybroeck, B. V., Cruz, L. D., Troch, R. D., Hamdi, R., Vannitsem, S., Duchêne, F., Willems, P., Tabari, H., Leuven, K., Uytven, E. V., Leuven, K., Hosseinzadehtalaei, P., Leuven, K., Lipzig, N. V., Leuven, K., Wouters, H., Leuven, K., Broucke, S. V., ... Pottiaux, E. (2018). Combining regional downscaling expertise in belgium : CORDEX and beyond, 119.

Troup, R. S. (1927). Dauerwald. *Forestry : An International Journal of Forest Research*, *1*(1), 78-81. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.forestry.a062850

Tuilier, P.-A. (2004). Entre déboisement, boisement et reboisement, deux siècles d'histoire des forêts belges (1750-1950). In A. Corvol (Éd.), *Les forêts d'Occident : Du Moyen Âge à nos jours* (p. 279-298). Presses universitaires du Midi. Récupérée 12 août 2024, à partir de https://books.openedition.org/pumi/24996

Tyree, M., & Sperry, J. (1989). Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. *Ann. Rev. Plant Biol*, *40*, 19-36.

Vanbeneden, A. (2022). Simulations de dynamiques forestières dans le bois de Lauzelle selon différentes stratégies de gestion multifonctionnelle. *UCLouvain*.

van Genuchten, M. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils1. *Soil Science Society of America Journal*, *44*. https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

van Genuchten, M., Leij, F., & Yates, S. R. (1991). The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. Récupérée 15 mai 2024, à partir de https://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?retc

Vincke, C. (2022). *LBIRF2104 - Écologie forestière - Le continuum sol-arbre atmosphère*.

Walthert, L., Ganthaler, A., Mayr, S., Saurer, M., Waldner, P., Walser, M., Zweifel, R., & von Arx, G. (2021). From the comfort zone to crown dieback : Sequence of physiological stress thresholds in mature European beech trees across progressive drought. *Science of The Total Environment*, *753*, 141792. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141792

Weynants, M., Vereecken, H., & Javaux, M. (2009). Revisiting vereecken pedotransfer functions : introducing a closed-form hydraulic model. *Vadose Zone Journal*, *8*(1), 86-95. https://doi.org/10.2136/vzj2008.0062

Impact du stress hydrique sur le développement de semis de chêne et de hêtre

Modélisation du fonctionnement hydraulique des semis soumis à une réduction des pluies

Gilles Tilman

Les forêts jouent un rôle primordial pour la société humaine depuis des milliers d'années. Anciennement utilisées uniquement pour leur source de nourriture et de matériau, de nouvelles fonctions ont émergé ces dernières décennies. Le concept de service écosytémique est apparu pour désigner tous les bénéfices octroyés à l'homme par la forêt. Ceux-ci regroupent des services à petite échelle comme des zones récréatives, une protection des sols et du cycle de l'eau pour les populations locales, mais aussi plus globalement pour la séquestration du carbone et la protection de la biodiversité. Un nouvel enjeu est apparu à la fin du XX^{e} siècle, déstabilisant certaines méthodes de gestion et nécessitant une révision de la sylviculture. Le réchauffement climatique est responsable d'une hausse de la température moyenne annuelle des 30 dernières années de 1,9 °C par rapport à l'ère pré-industrielle. La gestion forestière se doit de se tourner vers des méthodes favorisant la résilience des forêts en diversifiant les modes de gestion utilisés mais aussi la pluralité des espèces favorisées dans les peuplements. Pour être mieux préparé aux changements climatiques, il est nécessaire d'accroître les connaissances sur les dangers qui menacent les forêts. Ce mémoire se base sur une expérience de réduction des pluies qui vise à en évaluer l'impact sur le développement de semis de chêne et de hêtre. Il a nécessité des mesures de croissance des semis ainsi que le suivi du statut hydrique du sol et des semis. Six zones d'étude comportent une unité témoin et une unité de traitement dans laquelle les précipitations sont limitées à 33% grâce à un toit transparent. L'objectif du mémoire est d'interpréter les résultats de l'expérience d'exclusion des pluies à l'aide de la modélisation. Le modèle HETEROFOR a été utilisé pour reproduire la dynamique temporelle de la teneur en eau du sol, du potentiel hydrique de la tige et des feuilles ainsi que de la croissance en hauteur des semis.

Université catholique de Louvain

Faculté des bioingénieurs

Croix du Sud, 2bte L7.05.01, 1348 Louvain-La-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/agro