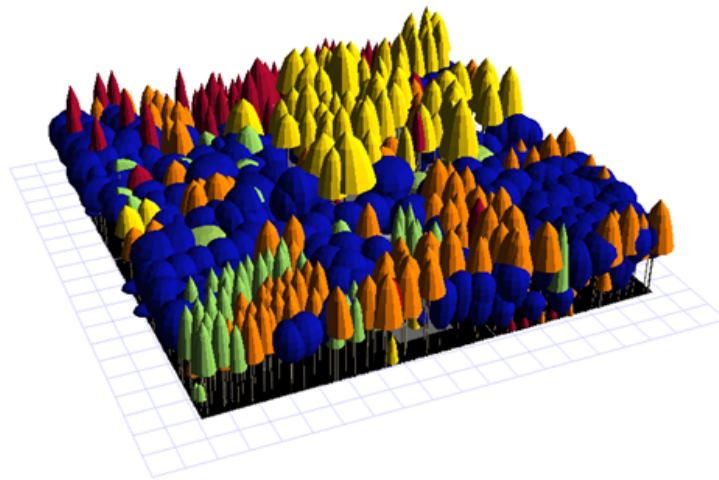


Faculté des bioingénieurs

Modélisation de la production primaire brute et de l'évapotranspiration dans une forêt de hêtre et de douglas et simulations selon différents scénarios climatiques

Auteur : Guillaume De Meue
Promoteurs : Mathieu Jonard, Caroline Vincke
Lecteurs : Hugues Goosse, Bernard Heinesch
Année académique 2019-2020
Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement

Modélisation de la production primaire brute et de
l'évapotranspiration dans une forêt de hêtre et de douglas et
simulations selon différents scénarios climatiques



Guillaume DE MEUE

Promoteurs : Mathieu JONARD
Caroline VINCKE

Année académique 2019-2020

*Merci à mes promoteurs, Mathieu Jonard et Caroline Vincke,
d'avoir assuré la guidance de ce mémoire.*

*Je souhaite aussi remercier entre autres Frédéric André, Louis de
Wergifosse, Thibaut Thyrion, Tanguy Manise, Bernard Heinesch,
Bernard Longdoz, Marc Aubinet, François Plume, Olivier Bouchez,
François Rahir, Hugues Goosse et Wafa Chebbi pour leur aide et
leur intérêt.*

Merci à ma famille et mes amis pour leur soutien.

*Que toutes les autres personnes impliquées de près ou de loin dans
la réalisation de ce mémoire trouvent en ces quelques mots toute
ma reconnaissance.*

Modélisation de la production primaire brute et de l'évapotranspiration dans une forêt de hêtre et de douglas et simulations selon différents scénarios climatiques

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contexte	1
1.1.1	Les enjeux de la gestion forestière	1
1.1.2	L'apport de la modélisation aux grandes questions en foresterie	2
1.1.3	Les raisons du développement du modèle HETEROFOR	4
1.2	Objectifs	5
2	Matériel et méthodes	6
2.1	Fonctionnement général du modèle HETEROFOR	6
2.2	Site d'étude : L'Observatoire Terrestre de Vielsalm	8
2.2.1	Présentation générale du site et historique sylvicole	8
2.2.2	Instrumentation	8
2.2.3	Projets de recherches	8
2.2.4	Description des parcelles et du peuplement	9
2.3	Préparation des fichiers d'initialisation du modèle	11
2.3.1	Variables météorologiques	11
2.3.1.1	Rayonnement	12
2.3.1.2	Température de l'air	13
2.3.1.3	Température de la surface du sol	14
2.3.1.4	Précipitations	15
2.3.1.5	Humidité relative	16
2.3.1.6	Vitesse du vent	17
2.3.1.7	Direction du vent	19
2.3.2	Horizons du sol	19
2.3.3	Inventaires dendrométriques	20
2.3.3.1	Positionnement des arbres et délimitation des placettes	21
2.3.3.2	Circonférence à hauteur de poitrine	22
2.3.3.3	Hauteur totale	22
2.3.3.4	Hauteur de base de couronne et hauteur de plus large extension de la couronne	23
2.3.3.5	Rayons de houppier	24
2.3.3.6	Composition chimique	28
2.3.3.7	Eclaircies	28

2.4	Paramétrisation du modèle	28
2.4.1	Ratio $\frac{PPN}{PPB}$	29
2.4.2	Accroissement en hauteur	30
2.5	Traitement des données pour l'évaluation du modèle	32
2.5.1	Phénologie	33
2.5.2	Teneur en eau du sol et réserve en eau utile relative	34
2.5.3	Pluviolessivats	35
2.5.4	Transpiration à l'échelle de l'arbre	35
2.5.5	Evapotranspiration	36
2.5.6	Production primaire brute	37
2.5.7	Croissance radiale	39
2.6	Simulations climatiques	40
3	Résultats	43
3.1	Evaluation	43
3.1.1	Phénologie	43
3.1.2	Teneur en eau du sol et réserve en eau utile relative	46
3.1.3	Pluviolessivats	49
3.1.4	Transpiration individuelle	50
3.1.5	Evapotranspiration	53
3.1.6	Production primaire brute	61
3.1.7	Croissance radiale	77
3.2	Expériences de simulation	81
4	Discussion	89
4.1	Reproduction des résultats observés à Vielsalm	89
4.2	Expériences de simulation pour le futur à Vielsalm	93
5	Conclusion	97

Annexes

Les annexes sont présentées dans un document séparé.

1 Introduction

1.1 Contexte

1.1.1 Les enjeux de la gestion forestière

Les forêts sont des écosystèmes dynamiques dont le comportement est régi par toute une série de facteurs d'origine naturelle ou anthropique. Le type de sol, les conditions climatiques ou le type de sylviculture adoptée en sont des exemples. Or, aujourd'hui, nous sommes dans un monde en prise au changement climatique. Les modifications du climat futur vont affecter la croissance des forêts. L'augmentation des températures et de la concentration en CO_2 est avérée. Le régime des précipitations est modifié tout comme l'intensité et la fréquence des événements extrêmes. Certains de ces changements affectent positivement la croissance des forêts. Par exemple, l'augmentation de la concentration en CO_2 favorise la photosynthèse. D'autres ont, par contre, un effet négatif comme les sécheresses prolongées qui induisent des stress hydriques. Comme tous ces facteurs varient simultanément et interagissent entre eux, il peut être difficile de prédire l'impact général du changement climatique sur une forêt particulière. D'autant que les changements sont incertains. Différents scénarios peuvent donc être envisagés pour couvrir l'étendue des possibilités. De plus, le sens et l'amplitude des variations de climat se différencient à l'échelle locale, engendrant des effets spécifiques selon l'endroit considéré.

Il est légitime de s'interroger sur l'impact qu'ont ces changements sur nos forêts notamment en raison des nombreux services écosystémiques qu'elles nous rendent. Parmi eux on peut citer en particulier le rôle d'atténuation du changement climatique, acté entre autre par la séquestration de carbone dans la biomasse et les sols, et qui dépend de deux mécanismes antagonistes du point de vue des échanges de CO_2 : la photosynthèse qui capte du CO_2 et la respiration qui en libère.

Afin de pouvoir profiter de ces services, les forêts peuvent être gérées de différentes manières. La foresterie traditionnelle a longtemps préconisé l'adoption de futaies régulières pour leur facilité de gestion. Avec des objectifs précis comme la production de bois, les itinéraires sylvicoles sont faciles à déterminer et consistent souvent à faire des plantations suivies d'éclaircies et de coupes à blanc. Simplifier la structure et la composition des forêts permet un meilleur contrôle de leur évolution et d'évaluer facilement leur rentabilité, dans des conditions environnementales stables. Mais le manque de diversité présente aussi des inconvénients, principalement en cas de perturbations. Ainsi en Wallonie, les épicéas sont en proie à des attaques de scolytes alors que les pessières occupent environ un tiers de la surface forestière (André *et al.*, 2019). L'épicéa est également sensible aux tempêtes en raison de son enracinement plutôt superficiel. Cela peut notamment conduire à des pertes économiques importantes en cas de dégâts de grande ampleur.

Un mode de gestion alternatif qui se développe en Wallonie est la sylviculture Pro

Silva. Elle vise à remplir des objectifs de production en assurant la rentabilité de la forêt mais selon une approche qui se veut plus proche de la nature et qui protège les écosystèmes. Les investissements sont limités et la régénération naturelle est valorisée (Baar *et al.*, 2008). Les récoltes se font de manière ponctuelle pour maintenir un couvert continu. Eviter de mettre les sols à nu présente des avantages comme protéger la biodiversité et diminuer les risques d'érosion. Cela implique une sylviculture dynamique aux interventions limitées dans des peuplements irréguliers et idéalement mélangés en associant des essences avec différentes stratégies d'acquisition et de consommation des ressources.

De manière générale, diversifier les essences et mélanger les âges permet de renforcer la résilience des écosystèmes forestiers, c'est-à-dire leur capacité à récupérer un fonctionnement normal après une perturbation. En effet, cela permet d'avoir une variété de réponses aux perturbations. Cet atout présente un intérêt grandissant au vu des incertitudes liées au changement climatique. Mais des écosystèmes aussi complexes sont difficiles à appréhender et à gérer. Les normes sylvicoles sont moins clairement définies et la rentabilité financière est plus compliquée à estimer. Il est donc nécessaire de pouvoir identifier et préciser les modes de gestion les plus prometteurs pour faire face à toutes une série d'incertitudes. Elles ont trait au choix des essences, de leur répartition, de la manière de la conduire dans un contexte changeant et incertain au regard de l'évolution du climat et des perturbations qu'elle entraîne.

1.1.2 L'apport de la modélisation aux grandes questions en foresterie

Les expérimentations en forêt se concentrent généralement sur l'étude d'un nombre limité de facteurs et sur une période de temps restreinte. Elles permettent d'obtenir des réponses précises en conditions réelles mais n'apportent que peu de considération aux interactions entre différents facteurs. De plus, face à la multitude de conditions stationnelles, de facteurs environnementaux et d'itinéraires sylvicoles envisageables, il n'est pas réaliste de tester toutes les combinaisons possibles sur le terrain. La durée du cycle sylvicole est également un frein puisque de nombreuses années d'observation sont nécessaires avant d'obtenir des résultats pertinents. Une alternative pour l'étude des forêts est donc la modélisation qui permet de réaliser facilement de nombreuses simulations dans une variété de conditions différentes en considérant les interactions de multiples facteurs.

Différents types de modèles existent. Des modèles de type empirique permettent de prédire l'évolution d'écosystèmes simples dans des conditions stables. Les tables de production en sont l'exemple le plus connu. Elles fournissent des prédictions de production de bois précises pour des conditions de croissance bien définies dans les peuplements purs et équiennes. Mais l'habileté des modèles empiriques à gérer des conditions changeantes est limitée. C'est pourquoi des modèles mécanistes basés sur la description des processus régissant la croissance des forêts ont été développés. Afin de limiter leur complexité et les

temps de calcul, ils ont d’abord été conçus pour prédire l’évolution de forêts à l’échelle de la parcelle pour des peuplements mono-spécifiques et équiennes. Ils permettent donc d’étudier l’évolution des forêts dans des conditions environnementales changeantes pour des peuplements réguliers mais gèrent difficilement les peuplements à la composition et à la structure complexes. Au vu de l’intérêt grandissant apporté à ces derniers, il était nécessaire d’avoir recourt à des modèles prenant l’hétérogénéité spatiale en considération. Ainsi, des approches par cohorte ont été développées pour tenir compte de la structure verticale. Mais ce n’est pas suffisant pour pleinement évaluer l’impact de l’agrégation spatiale dans des peuplements mélangés. La dimension horizontale doit aussi être considérée en adoptant une approche spatialement explicite à l’échelle de l’arbre. En effet, la variabilité des caractéristiques des arbres et les conditions locales de croissance sont prépondérantes dans l’évolution des forêts mixtes et structurées. Pour croître, un arbre donné a besoin de ressources dont la disponibilité est limitée et influencée par les arbres avoisinants. Le comportement physiologique et morphologique de l’arbre, déjà dépendant de sa taille et de son espèce, peut se réguler pour favoriser l’accès aux ressources limitantes en fonction des interactions avec les arbres voisins. On pense bien sûr à la compétition notamment pour la lumière, mais des interactions positives sont également possibles. En s’intéressant à la représentation des mélanges d’espèces en modélisation, Pretzsch *et al.* (2015) a recensé de nombreux modèles de croissance forestière. Les modèles individus-centrés et spatialement explicites sont peu nombreux et parmi eux, seuls trois prennent en compte à la fois le transfert radiatif, le cycle de l’eau et la phénologie. MAESPA (Duursma et Medlyn, 2012) se base sur une représentation détaillée de la couronne des arbres pour décrire précisément l’absorption du rayonnement et la répartition de l’eau. Ce modèle ne convient pas pour faire des simulations sur plusieurs années car il ne tient pas compte de l’allocation du carbone, de la respiration et de la croissance dimensionnelle des arbres. EMILION (Bosc, 2000) est un modèle spécifique aux espèces du genre *Pinus*, avec une approche structurale détaillée, se limitant également à des simulations d’un an. La croissance dimensionnelle est par contre bien décrite dans le modèle BALANCE (Grote et Pretzsch, 2002), permettant des simulations à plus long terme. Ce modèle prend en compte les échanges de carbone et de nutriments. L’estimation de la distribution du rayonnement est simple et la photosynthèse est calculée sur un pas de temps d’une dizaine de jours. Deux autres exemples de tels modèles sont iLand et NOTG. iLand (Seidl *et al.*, 2012) est un modèle simulant la dynamique des paysages forestiers en considérant la compétition, la croissance, la mortalité et la régénération des arbres à l’échelle individuelle mais avec des concepts simplifiés et un niveau de détails intermédiaire. Le modèle NOTG (Simioni *et al.*, 2016) a été spécifiquement développé pour étudier l’importance de la structure spatiale de la parcelle sur les cycles du carbone et de l’eau dans des écosystèmes complexes. Il est peu adapté aux simulations à long terme car les dimensions des arbres sont mises à jour sur base de relations empiriques fixes.

1.1.3 Les raisons du développement du modèle HETEROFOR

Rares sont les modèles à tenir compte à la fois de la complexité fonctionnelle et spatiale. Les modèles existants répondant difficilement aux attentes, le développement d'un nouveau modèle spatialement explicite et individu-centré se basant sur l'utilisation des ressources (eau, lumière, nutriments) a donc été initié. HETEROFOR a ainsi vu le jour sous une appellation rappelant son habilité à modéliser le fonctionnement de forêts hétérogènes (HETEROgenous FORest). Il se distingue des autres modèles de ce type par les concepts sur lesquels il se base. Ainsi, le rayonnement intercepté est estimé en utilisant une approche de lancer de rayons plutôt qu'en calculant un index de disponibilité de la lumière. Le calcul de la photosynthèse et de la transpiration des arbres se fait à une résolution temporelle fine permettant de prendre en compte les variations horaires de climat et du statut hydrique du sol. Le cycle de l'eau repose sur la loi de Darcy, plutôt que sur un modèle "bucket" et partitionne les précipitations lorsqu'elles atteignent la canopée. La représentation de la structure des arbres est moins complexe que d'autres modèles comme BALANCE. Une autre motivation pour le développement d'HETEROFOR est le souhait d'intégrer un module décrivant précisément la nutrition des arbres et le cycle des nutriments. La considération des contraintes nutritionnelles semble en effet importante pour modéliser la croissance des forêts, en particulier pour prédire les réponses aux changements climatiques (Jonard *et al.*, 2015). Enfin, le désir de travailler avec une plateforme de modélisation collaborative a conduit à élaborer progressivement HETEROFOR au sein de la plateforme Capsis (Dufour-Kowalski *et al.*, 2012), en y intégrant divers modules (interception de la lumière, phénologie, cycle de l'eau, allocation du carbone...). Cette dernière présente comme avantages d'utiliser un environnement de développement commun partageant des structures de données, des objets, des méthodes, des bibliothèques, et d'offrir un système d'exécution, une interface conviviale et des outils de visualisation. (Jonard *et al.*, 2020)

1.2 Objectifs

Le modèle HETEROFOR est l'outil désigné pour aborder deux grandes questions que soulèvent le changement climatique et les tendances de gestion forestière :

- Quels sont les réponses des forêts aux changements climatiques ?
- Comment prédire l'évolution d'une forêt complexe ?

Intégrer et structurer les connaissances des différents processus régissant la croissance des forêts au sein d'un modèle mécaniste est une stratégie pertinente pour relever ce défi. Mais la construction d'un modèle nécessite des choix de conception et reproduire parfaitement la réalité est bien sûr illusoire. C'est pourquoi il est fondamental d'évaluer le modèle, d'identifier ses forces et ses limites. Les performances du modèle HETEROFOR ont ainsi été évaluées pour des forêts feuillues dans Jonard *et al.* (2020) et de Wergifosse *et al.* (2020a). Réaliser des études de cas pour différents sites, présentant des conditions et des caractéristiques différentes, permet de tester la capacité du modèle à reproduire l'évolution des forêts dans des situations variées. Dans ce mémoire, l'étude porte sur un site forestier localisé en Ardenne qui possède différents atouts. La complexité du peuplement, composé d'un mélange de feuillus et de résineux, permet de mettre le modèle à l'épreuve, notamment en ce qui concerne le comportement des conifères. Le suivi à long terme du site, avec des mesures de qualité pour un grand nombre de variables, permet une validation rigoureuse du modèle basée sur de nombreux critères. En particulier la production primaire brute et l'évapotranspiration peuvent être évaluées grâce à la présence d'un système d'eddy covariance qui mesure les échanges gazeux au sommet de la canopée.

Ce mémoire vise donc à valider le modèle HETEROFOR sous divers aspects pour un site forestier complexe et à simuler ensuite l'évolution de ce dernier sous différents scénarios climatiques.

2 Matériel et méthodes

2.1 Fonctionnement général du modèle HETEROFOR

Cette section présente dans les grandes lignes le fonctionnement du modèle au moyen d’une description largement inspirée de Jonard *et al.* (2020) et de Wergifosse *et al.* (2020a). Ces deux références peuvent être consultées pour des informations plus détaillées.

HETEROFOR est un modèle hébergé dans Capsis (Computer-Aided Projection for Strategies in Sylviculture), une plateforme de simulation dédiée à la croissance des forêts et aux modèles dynamiques (Dufour-Kowalski *et al.*, 2012). L’outil Capsis fournit un système d’exécution et une interface utilisés par HETEROFOR pour générer et afficher les résultats. Les procédures d’initialisation et d’évolution sont propres à HETEROFOR mais la structure des données et les méthodes utilisées dépendent de Capsis.

L’initialisation permet de créer les arbres et les horizons du sol. Pour ce faire, l’utilisateur doit charger différents fichiers de données contenant des informations sur les paramètres des espèces d’arbres, les données d’inventaire (position, dimensions et composition chimique des arbres), le sol (propriétés physiques et chimiques) et la météo (données horaires). Durant l’évolution, HETEROFOR calcule la croissance annuelle des arbres sur base des processus implémentés. A la fin de chaque pas de temps annuel, les dates phénologiques clés relatives au développement, au jaunissement et à la chute des feuilles sont calculées à partir des données météo pour chacune des espèces feuillues. Grâce à ces dates et aux taux de développement, de jaunissement et de chute des feuilles, l’état du feuillage est déterminé à l’échelle journalière. Cela joue un rôle important dans l’établissement du bilan radiatif, réalisé à l’aide du module SamsaraLight de Capsis (Courbaud *et al.*, 2003). Celui-ci se base sur une approche de lancer de rayons pour calculer les proportions de rayonnement solaire transmis au sol et absorbé par le tronc et la couronne de chaque arbre en distinguant les composantes, directe et diffuse, du rayonnement. Prédire la distribution de l’énergie solaire dans l’écosystème forestier est nécessaire pour estimer l’évapotranspiration et la photosynthèse.

A chaque heure, le contenu en eau de chaque horizon est mis à jour. Les précipitations sont divisées en trois composantes distinctes : les pluviollessivats (partie des précipitations qui atteint directement le sol), les écoulements de tronc et l’interception. Le feuillage et l’écorce disposent d’une certaine capacité de stockage d’eau se régénérant grâce à l’évaporation. Lorsque le feuillage est arrivé à saturation, le surplus de précipitations rejoint les pluviollessivats. Quand l’écorce est saturée, l’eau s’écoule le long des troncs, formant les écoulements de tronc. Le premier horizon du sol est approvisionné en eau par les pluviollessivats et écoulements de tronc. Les sorties d’eau se font par prélèvement racinaire et évaporation. L’évaporation est calculée avec l’équation de Penman-Monteith

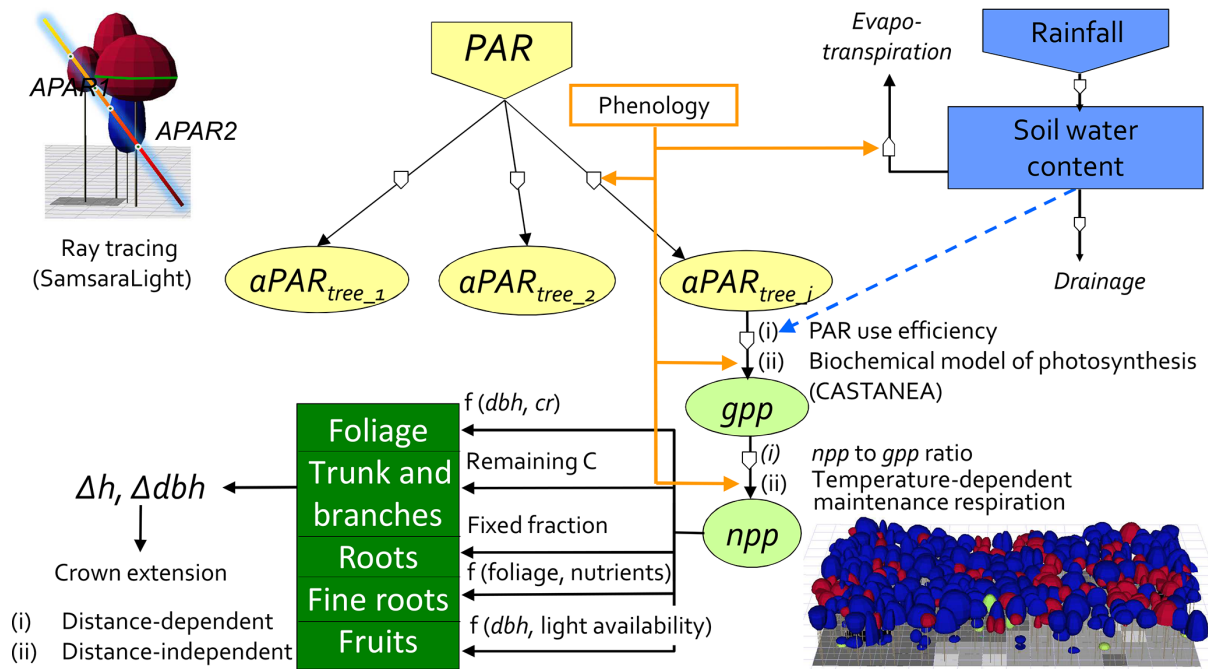


FIGURE 1 – Schéma conceptuel du fonctionnement du modèle HETEROFOR (image issue de Jonard *et al.* (2020))

en se basant sur le rayonnement absorbé. Cette équation est également utilisée pour estimer la transpiration individuelle des arbres en déterminant la conductance stomatique à partir des caractéristiques des arbres, du potentiel hydrique du sol et des conditions météorologiques. Les échanges d'eau entre horizons se font par remontées capillaires et drainage. Ils sont calculés sur base du gradient de potentiel hydrique du sol selon la loi de Darcy et à l'aide de fonctions de pédo-transfert pour déterminer les propriétés hydrauliques du sol. Dans l'option par défaut, utilisée tout au long de ce mémoire, les flux d'eau sont calculés à l'échelle de la parcelle, en agrégeant les flux individuels et les propriétés de chaque arbre (transpiration des arbres, capacités de stockage du feuillage et des troncs...). Chaque arbre puise donc dans une réserve d'eau commune et homogénéisée pour tout le peuplement.

Dans ce mémoire, la production primaire brute (PPB) est calculée au pas de temps horaire en utilisant la méthode de calcul de photosynthèse du module CASTANEA de Capsis (Dufrêne *et al.*, 2005). Celle-ci se base sur la proportion de feuilles d'ombre et de lumière, le rayonnement photosynthétiquement actif direct et diffus par unité de surface foliaire et le potentiel hydrique moyen du sol. A la fin de l'année, la production primaire nette (PPN) est déduite de la production primaire brute de l'année en retirant ce qui est utilisé pour la respiration de maintenance et de croissance. Dans ce mémoire, la respiration est estimée comme une fraction de la PPB. La PPN est allouée aux différentes parties de l'arbre en privilégiant les organes fonctionnels tels que les feuilles et les fines racines, la répartition entre ces deux compartiments dépendant du statut nutritionnel de l'arbre. Des relations allométriques sont ensuite utilisées pour définir l'allocation du

carbone aux parties structurales (tronc, branches, grosses racines) et déduire la croissance dimensionnelle de l'arbre en tenant compte de la compétition avec les arbres voisins. Le fonctionnement général du modèle HETEROFOR est illustré à la Figure 1.

Un module portant sur la nutrition des arbres et le cycle des nutriments a récemment été implémenté mais n'a pas été utilisé dans ce mémoire.

2.2 Site d'étude : L'Observatoire Terrestre de Vielsalm

2.2.1 Présentation générale du site et historique sylvicole

Le site d'étude est localisé dans le Grand Bois de Vielsalm, en Ardenne, à l'est de la Belgique (50 °18'18" N, 5 °59'53" E). L'observatoire est installé à une altitude d'environ 470 mètres, au sein d'une forêt mixte mature. Les espèces majoritaires environnantes sont le hêtre, le douglas, l'épicéa et le sapin pectiné. Les plantations de hêtres, épicéas et sapins ont été réalisées en 1908, tandis que les douglas ont été plantés en 1935 et 1937. Des éclaircies ont été effectuées début d'année en 2001, milieu d'année en 2003 et fin d'année en 2004. Le sol est classifié comme un cambisol dystrique et est légèrement en pente (3%) dans la direction nord-ouest. La température annuelle moyenne est de 7 °C et les précipitations annuelles moyennes sont de 1000 mm (Hurdebise *et al.*, 2017)(Aubinet *et al.*, 2018).

2.2.2 Instrumentation

Le site est équipé d'un système d'eddy covariance, installé sur une tour, qui permet de mesurer les échanges de CO₂ et de vapeur d'eau au sommet de la canopée. Les mesures ont commencé en 1996 avec un système installé à 36 mètres au-dessus du niveau du sol. Il a été élevé à 40 mètres en 1997 et à 52 mètres en 2009. En 2014, l'instrumentation a été mise à jour et placée à 51 mètres au-dessus du niveau du sol. Le dispositif au sommet de la tour est également constitué d'une station micro-météorologique. La température et la teneur en eau du sol, ainsi que le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) sont également mesurés en continu sur le site (Aubinet *et al.*, 2018). Les différents capteurs utilisés et les mises à jour de ce matériel de mesures sont donnés dans De Ligne et Manise (2016).

2.2.3 Projets de recherches

L'Observatoire Terrestre de Vielsalm est intégré au réseau ICOS (Integrated Carbon Observation System) qui est une infrastructure de recherche dont l'objectif est de quantifier et comprendre le bilan des gaz à effet de serre (plus particulièrement celui du CO₂) en Europe. Dans le cadre du projet ICOS, 5 placettes circulaires de 25 mètres de rayon

ont été délimitées aux alentours de la tour (Figure 2). Le suivi des placettes 1 (placette hêtre) et 2 (placette douglas) est la priorité du projet ICOS.

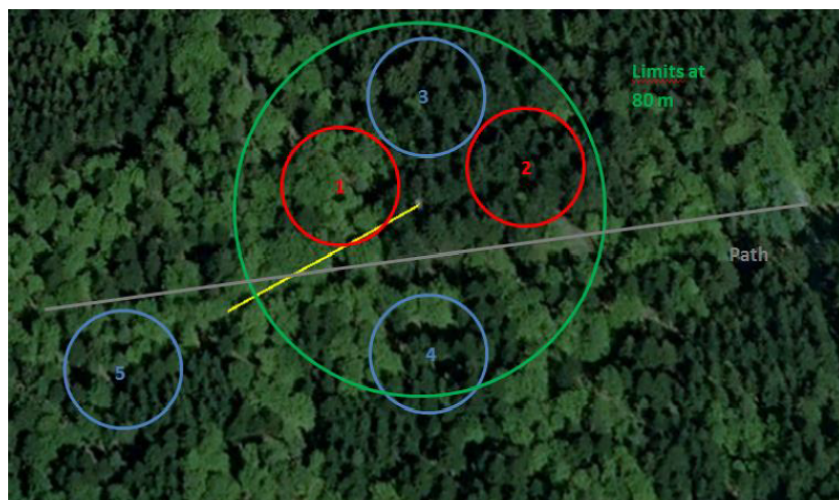


FIGURE 2 – Plan des sous-parcelles du site de l’Observatoire Terrestre de Vielsalm (image issue de De Ligne et Manise (2016))

2.2.4 Description des parcelles et du peuplement

Pour ce mémoire, la période d’étude commence en 2009 afin d’éviter les complications dues au changement de hauteur de la tour, le changement de 2014 étant négligeable. La délimitation des peuplements considérés s’est basée sur la disponibilité des mesures d’inventaire, en particulier les circonférences à hauteur de poitrine, indispensables pour initialiser notre modèle individu-centré. En 2009, on est en mesure de reconstruire une parcelle dont le périmètre suit approximativement les contours du rectangle circonscrit qui engloberait les placettes ICOS 1 et 2 (Figure 2). Dans ce mémoire, cette zone est appelée "la petite parcelle". En 2015, grâce à des données plus exhaustives, la zone exploitée est plus large et correspond approximativement au disque limité par un trait vert sur la Figure 2. Cette zone est appelée "la grande parcelle". La petite parcelle est étudiée entre 2009 et 2019 et la grande entre 2015 et 2019. Une description de la composition des peuplements aux différentes années considérées est proposée au Tableau 1.

TABLEAU 1 – Caractéristiques des parcelles pour les différentes espèces et pour les parcelles entières. N est le nombre d'arbres de la parcelle, la densité d'arbres est le nombre (entier) de tiges par hectare, C130 est la circonférence moyenne des troncs à 130 cm de hauteur.

Inventaire (superficie)	Essence	N	Densité d'arbres (N/ha)	Surface terrière (m ² /ha)	C130 (cm)
Petite parcelle 2009 (0,6 ha)	<i>Quercus</i>	1	2	0,1	92,0
	<i>Fagus sylvatica</i>	58	90	9,4	109,6
	<i>Picea abies</i>	6	9	2,2	163,8
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	39	61	23,2	215,1
	<i>Pinus sylvestris</i>	7	11	2,3	159,1
	<i>Abies alba</i>	17	26	6,5	170,8
	Total	128	199	43,7	155,0
Grande parcelle 2015 (1,9 ha)	<i>Quercus rubra</i>	5	3	0,4	127
	<i>Tsuga heterophylla</i>	14	7	0,9	124,3
	<i>Quercus</i>	1	1	0,04	95,0
	<i>Fagus sylvatica</i>	170	88	8,8	103,1
	<i>Betulus</i>	1	1	0,03	92,0
	<i>Picea abies</i>	151	78	6,4	79,7
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	73	38	14,3	201,4
	<i>Pinus sylvestris</i>	9	5	1,1	166,8
	<i>Abies alba</i>	93	48	9,3	135,6
	Total	517	267	41,3	117,9
Grande parcelle 2019 (1,9 ha)	<i>Quercus rubra</i>	4	2	0,5	160,6
	<i>Tsuga heterophylla</i>	12	6	0,9	124,4
	<i>Quercus</i>	1	1	0,04	99,0
	<i>Fagus sylvatica</i>	160	84	8,9	106,4
	<i>Betulus</i>	1	1	0,04	93,6
	<i>Picea abies</i>	147	77	6,6	80,9
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	66	35	14,0	207,4
	<i>Pinus sylvestris</i>	9	5	1,1	170,8
	<i>Abies alba</i>	77	40	9,1	148,7
	Total	477	251	41,1	121,4

La tour à flux est proche du centre de ces deux parcelles. L'hétérogénéité de la forêt aux alentours est à l'origine d'une certaine variabilité dans les mesures d'eddy covariance. Selon la direction dans laquelle souffle le vent, les mesures sont influencées par différents types de végétation. C'est pourquoi il a été décidé de délimiter différents secteurs autour de la tour. D'après Aubinet *et al.* (2018), le secteur sud-ouest est principalement occupé par le hêtre avec quelques conifères dispersés et le secteur nord-est est couvert de conifères et dominé par le douglas. Pour la grande parcelle, trois secteurs ont été définis : "le grand secteur hêtre" (180 ° - 330 °) dont la délimitation correspond au secteur spécifiquement choisi dans (Aubinet *et al.*, 2018), "le grand secteur douglas" (330 ° - 90 °) et "le grand secteur mixte" (90 ° - 180 °). Ce dernier est occupé aussi bien par des feuillus que des résineux. Pour la petite parcelle, en raison de sa forme plutôt rectangulaire, deux secteurs plus restreints sont définis : "le petit secteur hêtre" (254 ° - 294 °) et "le petit secteur douglas" (56 ° - 90 °). Les angles sont donnés dans le sens horaire avec le 0 ° au nord.

2.3 Préparation des fichiers d'initialisation du modèle

Pour initialiser HETEROFOR, il est nécessaire de lui fournir des fichiers reprenant les informations du site nécessaires à son fonctionnement. Comme il s'agit d'un modèle spatialement explicite et individu-centré, la localisation et les dimensions de chaque arbre sont requises. La prise en compte du cycle de l'eau nécessite de décrire les propriétés physiques et chimiques des horizons du sol et les conditions météorologiques. Des processus tels que la photosynthèse étant calculés à une résolution horaire, les variables météorologiques doivent être renseignées sur ce même pas de temps. Trois fichiers de données sont donc fournis à HETEROFOR pour l'initialisation : un fichier "météo", un fichier "sol" et un fichier "inventaire". En plus de cela, un fichier "espèces" doit être utilisé. Il contient de nombreux paramètres relatifs au fonctionnement des arbres selon leur essence. Ce fichier est moins spécifique aux données du site et relève de la paramétrisation évoquée à la Section 2.4.

2.3.1 Variables météorologiques

De nombreuses mesures météorologiques sont effectuées sur le site de Vielsalm. Les données traitées et synthétisées pour plusieurs variables météorologiques sont accessibles en ligne sur le site de l'*European Fluxes Database Cluster* (appelé EFDC dans la suite de ce mémoire). En complément de cela, des fichiers détaillés reprenant les données mesurées individuellement par chacun des capteurs ou instruments ont pu être obtenus. Ils sont dans la suite désignés par des codes¹ repris de De Ligne et Manise (2016). Toutes ces données sont renseignées par demi-heure. Cependant, de nombreuses données sont manquantes. Or, pour initialiser HETEROFOR, il est nécessaire d'avoir des fichiers de données complets. Les données manquantes n'ont pas été complétées par interpolation car les trous peuvent être de longue durée. Afin de boucher les trous, des données issues de stations météo situées à proximité ont été utilisées. Celles-ci ont été corrigées pour le site de Vielsalm, au moyen de régressions linéaires simples ou orthogonales². Les principales stations utilisées sont localisées à Emmels et à Bergeval (Source : CRA-W/Réseau Pameseb) et font partie du réseau Pameseb constitué d'une trentaine de stations réparties dans la Wallonie. Elles sont situées respectivement à environ 6 et 11 km du peuplement de Vielsalm. Dans un premier temps, les données n'ont pu être acquises que jusqu'à l'année 2018 incluse. Dans un second temps, le fichier détaillé avec les mesures individuelles des

1. Ces codes sont de la forme VAR_x1_x2_x3 avec VAR des lettres se référant à la variable mesurée, x1 un chiffre se référant à une position dans l'espace en deux dimensions, x2 un chiffre se référant à la position verticale (hauteur ou profondeur) du capteur et x3 un chiffre indiquant des mesures répliquées au même endroit.

2. La régression orthogonale est une variante de régression linéaire qui prend en compte des erreurs de mesures à la fois sur la variable expliquée (axe des ordonnées) et sur la variable explicative (axe des abscisses), au contraire d'une régression simple qui ne considère des erreurs que pour la variable expliquée. Elle est particulièrement adaptée pour comparer des variables censées être équivalentes car leurs rôles (expliquée ou explicative) a peu d'influence sur les résultats.

différents capteurs a été obtenu pour l'année 2019, qui a donc été traitée postérieurement de manière différente.

Les paragraphes suivants détaillent la procédure utilisée pour chacune des variables.

2.3.1.1 Rayonnement

Les valeurs de rayonnement utilisées sont des valeurs de rayonnement solaire global incident. Celui-ci se compose du rayonnement solaire direct, c'est-à-dire le rayonnement résultant après avoir été partiellement absorbé par l'atmosphère et diffusé par les molécules d'air, et du rayonnement diffus vers le sol. Il est exprimé en W/m^2 et est mesuré à Vielsalm au sommet de la tour. On a utilisé les valeurs de rayonnement incident de courte longueur d'onde (SW_IN) issues d'EFDC. Elles ont été partiellement complétées avec les données des capteurs de rayonnement solaire global individuels (capteur principal : SW_IN_1_1_1 et capteur "backup" : SW_IN_1_1_2). Les données manquantes ont été complétées en premier lieu avec les données de SW_IN_1_1_1 si disponibles, et ensuite avec les données de SW_IN_1_1_2. Il a été remarqué que certaines valeurs étaient légèrement négatives durant la nuit. Ces valeurs n'ont pas été jugées aberrantes car elles ne s'écartent que légèrement d'un rayonnement nul auquel on peut s'attendre durant la nuit. Néanmoins, des valeurs de rayonnement incident négatives peuvent causer des erreurs avec HETEROFOR. Les valeurs négatives ont donc été substituées par 0. Le reste des données manquantes a été complété en priorité grâce aux mesures de rayonnement solaire global d'Emmels (corrélation de 0,916 avec celles de Vielsalm) lorsqu'elles étaient disponibles et à l'aide de celles de Bergeval (corrélation de 0,894 avec celles de Vielsalm) quand ce n'était pas le cas. Pour ce faire, des régressions linéaires ont été effectuées sur le rayonnement solaire global incident à Vielsalm en fonction de celui d'Emmels d'une part et de Bergeval d'autre part (Figure 3). L'intercept a été forcé à 0, ce qui permet d'avoir un rayonnement nul pour Vielsalm lorsque le rayonnement solaire global mesuré à l'autre station est nul. Cela permet aussi d'éviter l'obtention de valeurs négatives étant donné que les mesures de rayonnement solaire global à Emmels et Bergeval sont toutes positives et que la pente de la droite de régression est également positive. Les équations de régression obtenues sont les suivantes :

$$R_{Vie} = 0,929 \cdot R_{Emm}, \quad (1)$$

$$R_{Vie} = 0,918 \cdot R_{Ber}, \quad (2)$$

avec

R_{Vie} le rayonnement solaire global incident (W/m^2) estimé pour le site de Vielsalm,

R_{Emm} le rayonnement solaire global incident (W/m^2) mesuré à Emmels,

R_{Ber} le rayonnement solaire global incident (W/m^2) mesuré à Bergeval.

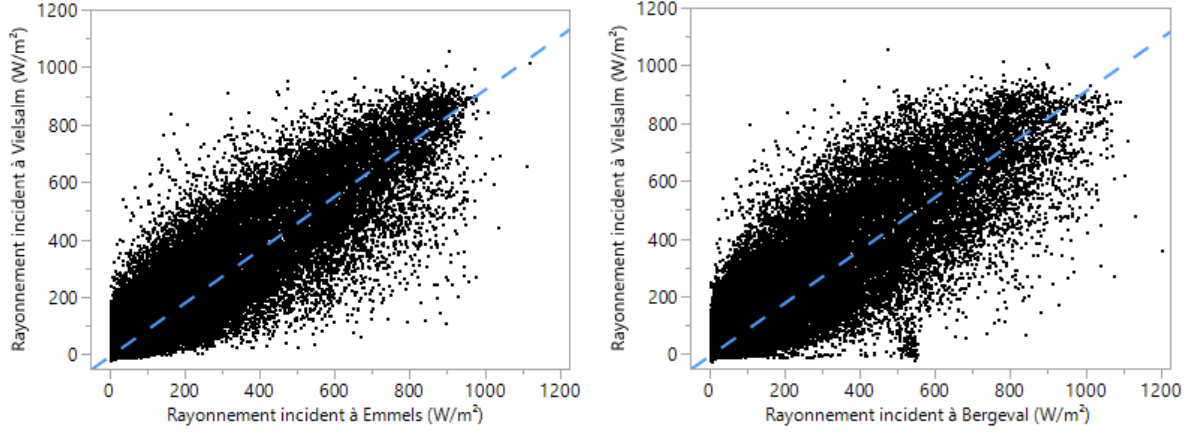


FIGURE 3 – Régressions linéaires sur le rayonnement solaire global incident à Vielsalm en fonction du rayonnement solaire global incident à Emmels (à gauche) et à Bergeval (à droite), au niveau horaire, de 2009 et 2018. Les intercepts sont forcés à 0. Pour Emmels, la pente vaut 0,929 (0,926 ; 0,931). Pour Bergeval, elle vaut 0,918 (0,915 ; 0,921).

Pour l'année 2019, on a utilisé les données de SW_IN_1_1_1. Elles ont été complétées avec les données de SW_IN_1_1_2. Comme précédemment, les valeurs négatives ont été remplacées par 0.

2.3.1.2 Température de l'air

Les valeurs de température de l'air utilisées sont celles d'EFDC. Les capteurs individuels n'apportent pas de mesures supplémentaires. Pour compléter les données, on a utilisé les mesures de température d'Emmels. Elles sont mieux corrélées aux températures mesurées à Vielsalm ($r = 0,988$) que celles de Bergeval ($r = 0,953$). On a déterminé la relation liant la température de l'air à Vielsalm et la température de l'air à Emmels au moyen d'une régression orthogonale en considérant leurs variances égales. Celle-ci est représentée à la Figure 4. On obtient :

$$TA_{Vie} = 0,834 + 0,979 \cdot TA_{Emm}, \quad (3)$$

avec

TA_{Vie} la température de l'air (°C) estimée pour le site de Vielsalm,

TA_{Emm} la température de l'air (°C) mesurée à Emmels.

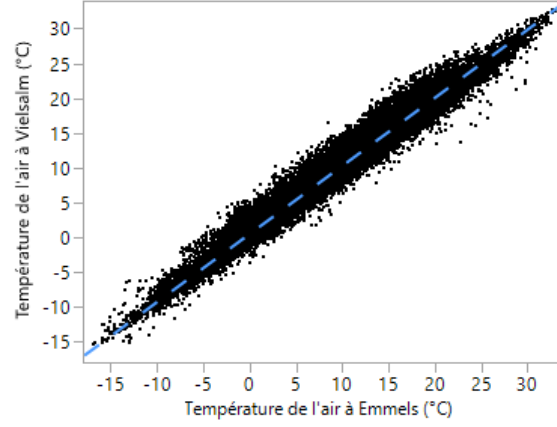


FIGURE 4 – Régression orthogonale sur la température de l'air à Vielsalm en fonction de la température de l'air à Emmels, au niveau horaire, de 2009 et 2018. Les variances sont considérées égales. L'intercept vaut 0,834. La pente de la droite vaut 0,979 (0,978 ; 0,980).

Pour 2019, les mesures utilisées sont celles du capteur principal au sommet de la tour (TA_1_1_1). Elles ne nécessitent pas d'être complétées.

2.3.1.3 Température de la surface du sol

Les valeurs de température de la surface du sol sont tirées des données EFDC. Afin de combler les données manquantes, une régression linéaire a été établie sur la température du sol en fonction de la température de l'air à Vielsalm (Figure 5), ce qui donne :

$$TS_{Vie} = 3,017 + 0,600 \cdot TA_{Vie}, \quad (4)$$

avec

TS_{Vie} la température de la surface du sol (°C) estimée pour le site de Vielsalm,

TA_{Vie} la température de l'air (°C) mesurée ou estimée (Eq. 3) sur le site de Vielsalm.

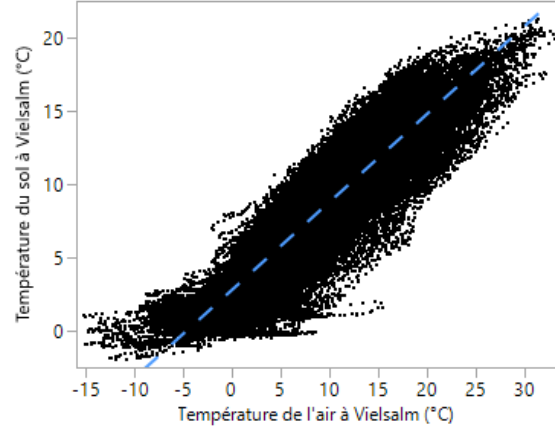


FIGURE 5 – Régression linéaire sur la température de la surface du sol en fonction de la température de l'air, au niveau semi-horaire, entre 2009 et 2018, à Vielsalm. L'intercept vaut 3,017 (2,995 ; 3,039) et la pente vaut 0,600 (0,598 ; 0,602). Le R^2 est de 0,83.

Pour 2019, on a pris la moyenne des mesures des quatre capteurs situés le plus près de la surface du sol (TA_1_1_1, TA_2_1_1, TA_3_1_1 et TA_4_1_1 situés à 1 cm de profondeur). Parmi ceux-ci, deux sont localisés sous hêtre et deux sous douglas.

2.3.1.4 Précipitations

Pour les précipitations, les valeurs provenant d'EFDC ont été retenues. Certaines données manquantes ont pu être complétées par le pluviomètre "backup" P_1_1_2 situé en haut de la tour par simple substitution. Les données manquantes restantes ont été complétées en utilisant à la fois les données de pluviométrie d'Emmels et celles de Bergeval, avec une pondération prenant en compte la distance séparant ces lieux du site de Vielsalm :

$$P_{Vie} = \frac{d_{Ber-Vie}}{d_{Emm-Vie} + d_{Ber-Vie}} \cdot P_{Emm} + \frac{d_{Emm-Vie}}{d_{Emm-Vie} + d_{Ber-Vie}} \cdot P_{Ber}, \quad (5)$$

avec

P_{Vie} les précipitations (mm) estimées pour le site de Vielsalm,

P_{Emm} les précipitations (mm) mesurées à Emmels,

P_{Ber} les précipitations (mm) mesurées à Bergeval,

$d_{Emm-Vie}$ la distance entre Emmels et Vielsalm, prise à 6,34 km,

$d_{Ber-Vie}$ la distance entre Bergeval et Vielsalm, prise à 10,61 km.

Pour 2019, on prend les précipitations mesurées par le pluviomètre principal (P_1_1_1), complétées par celles du pluviomètre "backup" (P_1_1_2).

2.3.1.5 Humidité relative

Les données d'humidité relative mesurées au sommet de la tour (51 m) par le capteur principal (RH_1_1_1) ont été utilisées en priorité. Les données manquantes ont d'abord été complétées avec les mesures du second capteur au sommet de la tour (RH_1_1_2), sans correction particulière. Les mesures d'humidité relative étant effectuées à différentes hauteurs sur la tour, les mesures prises à 30,4 m de hauteur (RH_1_2_1), si existantes, et 18,45 m (RH_1_3_1) sinon, ont été utilisées pour compléter les données à l'aide de régressions établies en fonction des mesures de RH_1_1_1. Au vu de l'hétéroscédasticité, la variance des résidus augmentant fortement avec l'humidité relative, les régressions ont été réalisées sur des variables log-transformées (Figure 6). L'humidité relative a donc été estimée par les relations suivantes :

$$RH_{Vie} = \exp(0,064 + 0,986 \cdot \ln(RH_1_2_1)), \quad (6)$$

$$RH_{Vie} = \exp(-0,090 + 1,013 \cdot \ln(RH_1_3_1)), \quad (7)$$

avec

RH_{Vie} l'humidité relative (%) estimée pour Vielsalm (en haut de la tour : 50,8 m),

$RH_1_2_1$ l'humidité relative (%) mesurée à Vielsalm à 30,4 m de hauteur,

$RH_1_3_1$ l'humidité relative (%) mesurée à Vielsalm à 18,45 m de hauteur.

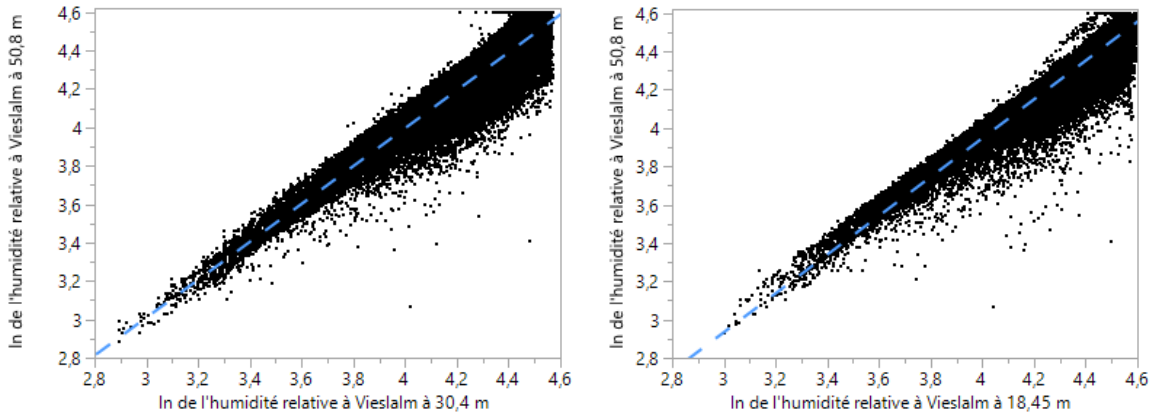


FIGURE 6 – Régressions linéaires du logarithme népérien de l'humidité relative à 50,8 m de hauteur en fonction du logarithme népérien de l'humidité relative à 30,4 m (à gauche) et à 18,45 m (à droite) de hauteur à Vielsalm, au niveau semi-horaire, de 2009 et 2018. Pour la hauteur de 30,4 m, l'intercept vaut 0,064 (0,058 ; 0,069) et la pente vaut 0,986 (0,985 ; 0,988). La corrélation est de 0,968. Pour la hauteur de 18,45 m, l'intercept vaut -0,090 (-0,010 ; -0,081) et la pente vaut 1,013 (1,010 ; 1,015). La corrélation est de 0,964.

Après le passage en données horaires, le reste des données manquantes a été complété à l'aide des mesures prises à Emmels si elles étaient disponibles et à Bergeval si ce n'était pas le cas. Des régressions orthogonales ont été établies, en considérant les variances

égales. Comme précédemment, elles ont été réalisées avec les variables log-transformées afin de réduire l'hétéroscédasticité (Figure 7). Les données d'humidité relative ont donc été complétées avec les formules suivantes :

$$RH_{Vie} = \exp(-0,557 + 1,117 \cdot \ln(RH_{Emm})), \quad (8)$$

$$RH_{Vie} = \exp(-0,703 + 1,150 \cdot \ln(RH_{Ber})), \quad (9)$$

avec

RH_{Vie} l'humidité relative (%) estimée pour Vielsalm,

RH_{Emm} l'humidité relative (%) mesurée à Emmels,

RH_{Ber} l'humidité relative (%) mesurée à Bergeval.

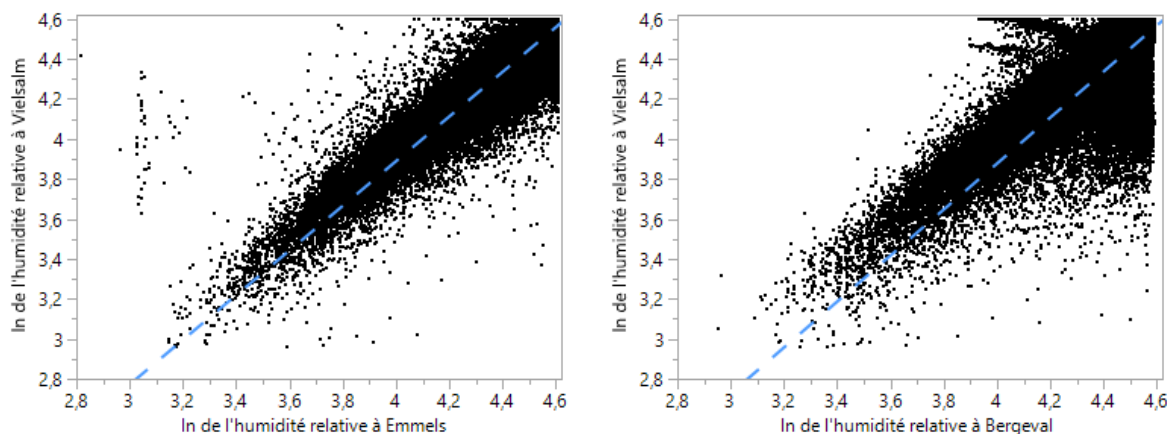


FIGURE 7 – Régressions orthogonales du logarithme népérien de l'humidité relative à Vielsalm en fonction du logarithme népérien de l'humidité relative à Emmels (à gauche) et à Bergeval (à droite), au niveau horaire, de 2009 et 2018 à Vielsalm. Les variances sont considérées égales. Pour Emmels, l'intercept vaut -0,557 et la pente vaut 1,117 (1,114 ; 1,120). La corrélation est de 0,931. Pour Bergeval, l'intercept vaut -0,703 et la pente vaut 1,150 (1,145 ; 1,156). La corrélation est de 0,819.

Pour 2019, on a pris les valeurs de $RH_1_1_1$, complétées par celles de $RH_1_1_2$.

2.3.1.6 Vitesse du vent

La vitesse du vent considérée provient des données EFDC. Après agrégation à l'échelle horaire, des régressions linéaires de la vitesse du vent à Vielsalm en fonction de la vitesse du vent à Emmels d'une part et à Bergeval d'autre part ont été effectuées en forçant l'intercept à 0 (Figure 8). Les mesures de vitesse du vent d'Emmels ont été privilégiées (si disponibles) par rapport à celles de Bergeval bien qu'elles soient légèrement moins bien corrélées à celles de Vielsalm ($r = 0,587$ pour Emmels ; $r = 0,592$ pour Bergeval). Le facteur correctif (c'est-à-dire la pente de la droite de régression) à utiliser avec les données de Bergeval est supérieur à 2, ce qui est fort élevé. Cela peut s'expliquer par la

différence de hauteur de mesure de la vitesse du vent entre Vielsalm (51 m) et Bergeval (2 m) et par les éventuels obstacles à proximité du point de mesure. La vitesse du vent mesurée à Emmels est bien plus proche de celle de Vielsalm que ne l'est celle de Bergeval malgré des mesures également relevées à 2 mètres de hauteur.

$$WS_{Vie} = 1,083 \cdot WS_{Emm}, \quad (10)$$

$$WS_{Vie} = 2,152 \cdot WS_{Ber}, \quad (11)$$

avec

WS_{Vie} la vitesse du vent (m/s) estimée pour Vielsalm,

WS_{Emm} la vitesse du vent (m/s) mesurée à Emmels,

WS_{Ber} la vitesse du vent (m/s) mesurée à Bergeval.

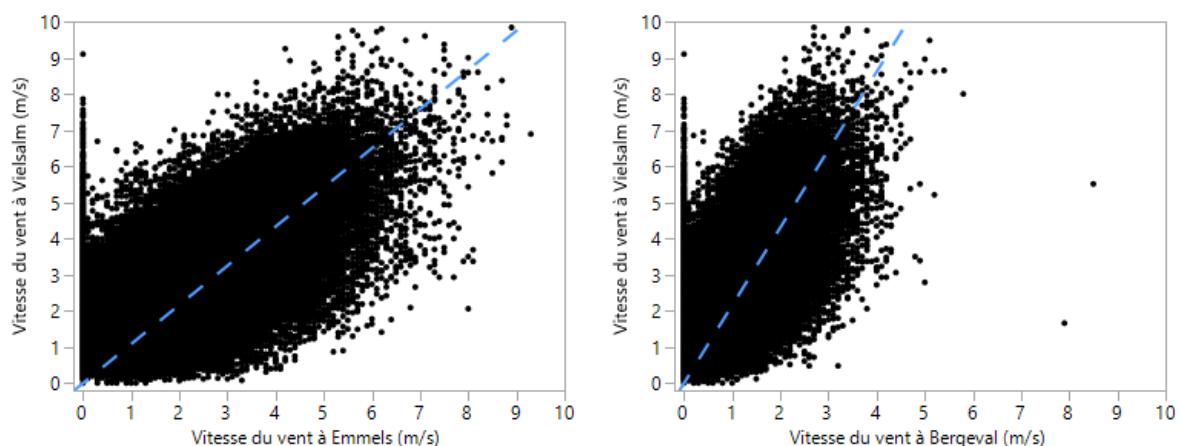


FIGURE 8 – Régression orthogonale sur la vitesse du vent à Vielsalm en fonction de la vitesse du vent à Emmels (à gauche) et à Bergeval (à droite), au niveau horaire, de 2009 à 2018. Les intercepts sont forcés à 0. Pour Emmels, la pente vaut 1,083 (1,079 ; 1,087). Pour Bergeval, elle vaut 2,152 (2,143 ; 2,161).

Pour 2019, on prend les vitesses mesurées par l'anémomètre sonique ($WS_1_1_1$). Les données manquantes sont complétées à l'aide des données d'Elsenborn, en fonction desquelles une régression orthogonale a été effectuée sur la vitesse du vent mesurée à Vielsalm (Figure 9). Les données d'Elsenborn sont issues d'un fichier "météo" réalisé par l'équipe travaillant sur le modèle HETEROFOR. On obtient :

$$WS_{Vie} = 0,364 + 0,875 \cdot WS_{Els} \quad (12)$$

avec

WS_{Vie} la vitesse du vent (m/s) estimée pour Vielsalm,

WS_{Els} la vitesse du vent (m/s) à Elsenborn.

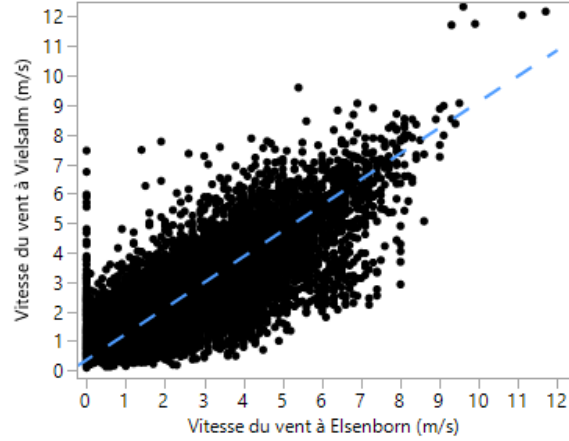


FIGURE 9 – Régression orthogonale sur la vitesse du vent à Vielsalm en fonction de la vitesse du vent à Elsenborn, au niveau horaire, pour l'année 2019. L'intercept vaut 0,364. La pente de la droite vaut 0,875 (0,858 ; 0,892).

2.3.1.7 Direction du vent

La direction du vent n'est actuellement pas utilisée dans HETEROFOR mais doit néanmoins être renseignée dans le fichier météo. Les données d'EFDC ont été utilisées jusqu'à 2018. Pour 2019, on a pris les directions mesurées par l'anémomètre sonique (WD_1_1_1). Les données manquantes ont été fixées à 225°, angle correspondant à la direction sud-ouest, qui est la direction approximative dans laquelle le vent souffle le plus souvent.

2.3.2 Horizons du sol

Pour le fichier "sol", la première étape est de déterminer quels sont les différents horizons du sol, ainsi que leurs limites. Les informations sont issues de la thèse de Rémy Soubie (Soubie, 2014). La distinction des horizons et la proportion d'éléments grossiers sont basés sur un relevé de terrain de 1985 par Delecour. Sept horizons de sol ont été identifiés : OF, OAH, AP, AB, BW, BC et C. Cependant, Rémy Soubie a effectué des analyses conjointement pour les horizons OF et OAH. Pour notre fichier "sol", ces deux horizons ont donc été considérés comme un horizon O unique. Les limites des horizons sont celles utilisées par Rémy Soubie. Le sol est décrit jusqu'à 105 cm de profondeur et est délimité en six horizons. Dans HETEROFOR, la limite inférieure des horizons organiques est à la hauteur 0 (sa limite supérieure est donc à une hauteur positive) et les limites des horizons inférieurs sont négatives. Les limites des horizons ont donc été ajustées selon cette règle et exprimées en mètres.

La proportion d'éléments grossiers, que l'on exprime en m³ de pierres par m³ de sol est issue des relevés de terrain de Delecour (données fournies dans l'annexe 2 de Soubie (2014)).

Les résultats détaillés des analyses de Rémy Soubie ont été organisés sous forme d'un fichier Excel (Récapitulatif racines Densité et pF.xls).

La densité apparente a été déterminée sous hêtre et sous douglas. Pour chaque horizon, on a pris la moyenne de ces deux sous-peuplements.

Les informations sur la texture sont issues de données reçues de Tanguy Manise (BE-vieGEN10_01_10.xls) contenant diverses informations. L'information n'est malheureusement pas donnée pour chaque horizon. Elle est présentée pour trois couches de 10 cm réparties dans le profil. Cependant, les variations entre ces couches sont très faibles et on a donc choisi de garder des fractions de sable, argile et limons très semblables pour les différents horizons, en veillant bien à ce que la somme de ces dernières atteigne 1.

Le taux de carbone organique exprimé en mg de C par gramme de sol sec est issu de données également fournies par Tanguy Manise (Info Vielsalm sol DB Gbx.doc). Les horizons mentionnés ne sont pas exactement les mêmes que ceux définis ci-dessus. La valeur renseignée pour un certain horizon Ah a été utilisée pour notre horizon AP. Pour l'horizon BC, absent de ce document, on a choisi la valeur moyenne entre l'horizon B et les horizons C.

Les teneurs en eau à la capacité au champs, au point de flétrissement et à saturation sont issues des analyses de Rémy Soubie, respectivement pour un pF de 2,48, de 4,2 et de 1. La valeur assignée pour le peuplement est la valeur moyenne entre les résultats obtenus pour la placette hêtre et pour la placette douglas. Suite aux premiers tests du modèle, ces valeurs ont ensuite été modifiées sur base des observations et des prédictions de teneur en eau.

Pour la proportion de racines fines dans chaque horizon, on s'est basé sur la densité racinaire fournie par Rémy Soubie. Elle est établie comme :

$$propRF_i = \frac{DRH_i + DRD_i}{\sum_{n=1}^6 (DRH_n + DRD_n)}, \quad (13)$$

avec

$propRF_i$ la proportion de racines fines dans l'horizon i par rapport au reste du profil pour le peuplement,

DRH_i la densité racinaire (rac/cm²) sous hêtre pour l'horizon i ,

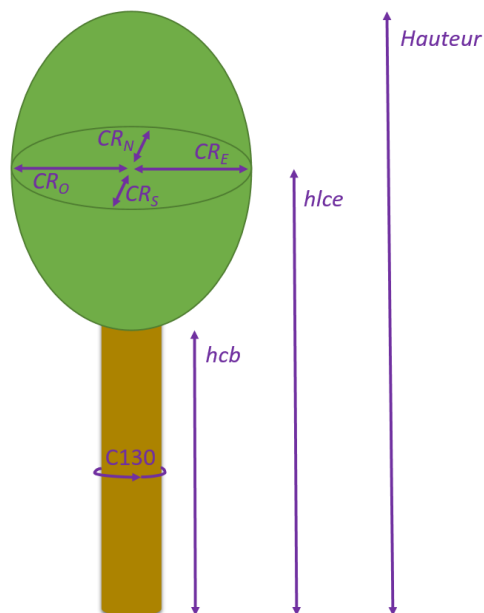
DRD_i la densité racinaire (rac/cm²) sous douglas pour l'horizon i .

2.3.3 Inventaires dendrométriques

Trois fichiers "inventaire" ont été construits, pour les années 2009, 2015 et 2019 (voir le Tableau 1). Ils servent principalement à renseigner les positions et les dimensions de chaque arbre. HETEROFOR décrit de manière précise la structure du peuplement et requiert pour cela différentes dimensions des arbres (voir Figure 10). Une difficulté

rencontrée a été que toutes ces dimensions n'ont pas été mesurées sur le site. De manière générale, le travail a donc consisté à boucher les trous en établissant des relations sur base d'arbres pour lesquels des données étaient disponibles.

FIGURE 10 – Illustration des différentes dimensions des arbres devant être fournies à HETEROFOR : circonférence à hauteur de poitrine (C130), hauteur totale (*Hauteur*), hauteur de base de couronne (*hcb*), hauteur de plus large extension de la couronne (*hlce*), rayon de couronne dans la direction nord (CR_N), rayon de couronne dans la direction sud (CR_S), rayon de couronne dans la direction est (CR_E), rayon de couronne dans la direction ouest (CR_O).



2.3.3.1 Positionnement des arbres et délimitation des placettes

Les arbres sont répertoriés en coordonnées Lambert belge. Cependant, certains arbres pour lesquels on dispose de mesures de circonférence à hauteur de poitrine n'ont pas de coordonnées attribuées. Il s'agit d'arbres n'étant aujourd'hui plus présents car abattus par les bucherons ou morts. Afin de pouvoir les repositionner dans les inventaires passés, une position leur a été attribuée sur base de leur numérotation. Pour un arbre dont la position est manquante, on a recherché en premier lieu une souche sur le terrain, à proximité des arbres portant un numéro adjacent, et dont la taille pourrait correspondre à l'arbre à replacer (en se basant sur la mesure de circonférence à hauteur de poitrine). Si une telle souche a pu être trouvée, son emplacement a été déterminé approximativement par rapport à un arbre proche au moyen d'une boussole et d'une mesure de distance le plus souvent effectuée au vertex. Par exemple, l'arbre 503 a été repositionné 3 mètres au sud du 502. Dans le cas contraire, l'arbre est positionné à main levée, avec un logiciel SIG, entre les deux arbres portant un numéro adjacent.

Il est nécessaire de spécifier les coordonnées x , y et z de chaque arbre à HETEROFOR. Les coordonnées z ont toutes été fixées à 0. Pour les coordonnées x et y , les arbres ont été replacés dans un repère cartésien dont l'origine est la position de la tour à flux. Pour ce faire, aux coordonnées en Lambert belge de chaque arbre ont été soustraites les coordonnées de la tour (x : 266062,878 m et y : 111711,163 m).

Les limites de la parcelle utilisée doivent également être spécifiées en indiquant les

sommets du polygone qui la délimite. Il n'est pas possible de spécifier une limite circulaire mais le nombre de côtés du polygone n'est pas défini. A l'aide du logiciel ArcGIS, on a tracé un polygone qui suit au plus près la zone d'inventaire en laissant le minimum d'espaces vides entre le périmètre et les arbres. Ses sommets sont utilisés comme limites de la parcelle.

2.3.3.2 Circonférence à hauteur de poitrine

Les circonférences à hauteur de poitrine (C130) sont des données indispensables pour construire les fichiers inventaires. En 2009, les C130 ont été mesurées sur la petite parcelle (zone rectangulaire comprenant les parcelles ICOS 1 et 2, ainsi que la tour). En 2015, on dispose de toutes les C130 sur la grande parcelle circulaire. Enfin, en 2019, seules les C130 des placettes ICOS 1 et 2 sont disponibles. Une campagne de mesures a donc été organisée dans le cadre de ce mémoire afin de pouvoir à nouveau exploiter la zone correspondant à la grande parcelle. Les C130 des arbres situés dans cette zone ont été mesurées, à l'exception des arbres déjà mesurés en 2019 (placettes ICOS 1 et 2). Etant donné que les mesures ont été réalisées début 2020, les C130 mesurées n'ont pas été utilisées telles quelles mais ajustées à 2019, selon l'Equation 14 dont les nombres en indices se rapportent à l'année de mesure.

$$C130_{2019} = C130_{2020} - \frac{C130_{2020} - C130_{2015}}{5} \quad (14)$$

2.3.3.3 Hauteur totale

Les mesures de hauteurs totales sont disponibles en 2015 pour les 5 placettes ICOS, ainsi que pour le reste de la petite parcelle. En 2019, les hauteurs totales sont disponibles sur les parcelles ICOS 1 et 2. Les hauteurs manquantes ont été déterminées sur base d'équations à ajuster. Deux formes d'équation ont été évaluées.

1) Ajustement d'une équation non-linéaire sur base du diamètre à hauteur de poitrine (dbh) :

$$Hauteur = c \cdot \left(1 - \exp \left(-\frac{dbh - a}{b} \right) \right) \quad (15)$$

2) Ajustement d'une équation linéaire classique sur base du $\ln(dbh)$ élevé à différentes puissances :

$$Hauteur = a + b \cdot \ln(dbh) + c \cdot \ln(dbh)^2 + d \cdot \ln(dbh)^3 \quad (16)$$

avec a , b , c et d les paramètres à ajuster.

Ces ajustements ont été réalisés pour chacune des 4 espèces majoritaires du peuplement (hêtre, douglas, épicéa, sapin) et par année (2015, 2019). Etant donné que l'on ne dispose pas de mesures de hauteur en 2009, les hauteurs ont été estimées sur base des équations déterminées pour l'année 2015 qui est plus proche dans le temps que l'année 2019 et dont les mesures sont plus nombreuses.

Pour la première méthode, les paramètres ont été ajustés avec l'outil d'ajustement non-linéaire de JMP en attribuant une valeur initiale aux différents paramètres. L'ajustement est effectué par itération et s'arrête lorsque le gradient converge.

La seconde méthode recourt à un polynôme pour lequel certains paramètres peuvent être non-significatifs. L'outil de régression pas à pas de JMP a été utilisé pour déterminer le modèle le plus parcimonieux sur base de la minimisation du critère BIC.

Les résultats des modèles ont été évalués en effectuant les régressions linéaires classiques et orthogonales des observations en fonction des prédictions des modèles (voir le Tableau 4).

Les deux méthodes ont donné des résultats similaires. Le choix s'est porté sur la première méthode. Elle présente un comportement homogène quelle que soit la valeur du *dbh*, alors que l'on peut présager une forme plus tortueuse pour la méthode polynomiale, spécialement en-dehors du domaine de *dbh* des observations.

Cependant, une incohérence a été remarquée pour le hêtre et l'épicéa. En effet, pour une certaine gamme de valeurs de diamètre à hauteur de poitrine, les ajustements établis pouvaient mener à une hauteur prédite plus grande en 2015 qu'en 2019 pour un même arbre. Cela s'explique en partie car les mesures ayant servi à établir ces relations n'ont pas été effectuées sur les mêmes arbres en 2015 et en 2019. Les mesures sont, en outre, moins nombreuses en 2019. Les courbes de hauteur peuvent donc prendre des formes différentes selon l'année et se croiser. Pour remédier à ce problème, un nouvel ajustement a été réalisé en combinant les données de 2015 et de 2019 (voir le Tableau 4). La même relation a donc été utilisée indépendamment de l'année.

Pour les espèces non-majoritaires, les relations ont également été utilisées sans tenir compte de l'année. Pour le pin sylvestre, une relation a été établie sur base des données de l'Inventaire Permanent des Ressources Forestières de Wallonie (voir le Tableau 4) en considérant uniquement les pins sylvestres faisant partie de la région forestière Ardenne. Pour les chênes indigènes et le chêne rouge, ainsi que le bouleau, on a utilisé les paramètres déterminés par Gauthier Ligot (Ligot, 2014). Pour le tsuga et le pin sylvestre, on a utilisé les paramètres déterminés pour l'épicéa avec les données de 2015 et 2019.

Un résumé des paramètres utilisés pour chacune des espèces est présenté dans le Tableau 3.

2.3.3.4 Hauteur de base de couronne et hauteur de plus large extension de la couronne

Les hauteurs de base de couronne (*hcb*, exprimées en mètres) n'ont été mesurées qu'en 2015 pour certains arbres, dont la hauteur totale a également été mesurée. Ces valeurs ont été utilisées pour déterminer une fraction moyenne de la hauteur correspondant à la hauteur de la base de la couronne (*hcb%*, en m/m) pour différentes espèces (hêtre, douglas, épicéa, sapin, tsuga, pin). Les valeurs de *hcb* utilisées pour les chênes, chênes rouges et

bouleaux sont des valeurs par défaut reprises dans le fichier "espèces" d'HETEROFOR (Tableau 2). Les hauteurs de base de couronne manquantes sont ensuite calculées comme suit :

$$hcb = hcb\% \cdot Hauteur. \quad (17)$$

De manière similaire à ce qui est fait pour la hauteur de base de couronne, la hauteur de plus large extension de la couronne ($hlce$, exprimée en mètres) est déterminée sur base d'une fraction moyenne de la hauteur correspondant à la hauteur de plus large extension de la couronne ($hlce\%$, en m/m) :

$$hlce = hlce\% \cdot Hauteur. \quad (18)$$

Comme aucune mesure de plus large extension de la couronne n'est disponible, il a été décidé de considérer qu'elle était égale à la hauteur de base de couronne pour les résineux. Pour les feuillus, on a repris des valeurs de $hlce\%$ par défaut issues du fichier "espèces" d'HETEROFOR (Tableau 2).

TABLEAU 2 – Résumé des valeurs de $hcb\%$ et $hlce\%$ (m/m) utilisées par essence pour déterminer les valeurs manquantes de hauteur de base de couronne et de hauteur de plus large extension de la couronne grâce aux Equations 17 et 18.

Essence	$hcb\%$	$hlce\%$
Hêtre	0,457	0,77
Douglas	0,576	0,576
Epicéa	0,358	0,358
Sapin pectiné	0,52	0,52
Chêne	0,7	0,81
Chêne rouge	0,7	0,81
Tsuga	0,485	0,485
Bouleau	0,7	0,81
Pin sylvestre	0,778	0,778

2.3.3.5 Rayons de houppier

Les rayons de houppier de chaque arbre dans les quatre directions cardinales sont à indiquer dans les fichiers d'inventaires. On ne dispose pas directement de telles mesures pour le site de Vielsalm. Cependant, il est possible de les déduire d'une campagne de spatialisation au cours de laquelle la forme de la couronne est représentée par un polygone avec un nombre de côtés variables. Un script R fourni par Louis de Wergifosse permet de retrouver les rayons dans les quatre directions cardinales à partir de ces formes de couronne. Cette campagne de spatialisation étant encore en cours, on ne dispose pas de toutes les mesures nécessaires. 60 hêtres ont été mesurés, ce qui apparaît suffisant pour

déterminer des relations avec le diamètre du tronc. Pour les trois autres espèces majoritaires (douglas, épicéa, sapin), on ne dispose que de quelques arbres (respectivement 11, 6, 13). Des mesures complémentaires (rayons dans les quatre directions cardinales) ont donc été effectuées pour ces espèces, de manière à avoir une trentaine d'arbres mesurés par espèce. Des relations ont ensuite été estimées sur base des données issues de la spatialisation et de ces mesures. Elles visent à estimer un rayon de couronne (CR) qui est utilisé dans les quatre directions pour les arbres pour lesquels il n'y a pas de mesures. Pour déterminer ces relations, on a utilisé la moyenne quadratique des rayons dans les quatre directions cardinales comme CR observé.

Comme pour les hauteurs totales, deux méthodes ont été évaluées :

1) Ajustement d'une équation non-linéaire sur base du dbh :

$$CR = a \cdot dbh^b \quad (19)$$

2) Détermination du rapport entre le diamètre de couronne et le diamètre du tronc (Dd), tous deux en mètres, par ajustement d'une équation linéaire classique sur base du $C130$:

$$Dd = 100 \cdot \left(a + b \cdot C130 + c \cdot \frac{1}{C130} + d \cdot \frac{1}{C130^2} \right) \quad (20)$$

Le rayon de couronne est ensuite calculé comme suit :

$$CR = \frac{1}{2} \cdot dbh \cdot Dd \quad (21)$$

a , b , c et d sont les paramètres à ajuster. Les résultats des régressions linéaires classiques et orthogonales sur les rayons quadratiques moyens de couronnes observés en fonction des rayons prédits sont présentés dans le Tableau 4. La deuxième méthode est finalement choisie, les R^2 obtenus étant systématiquement plus élevés qu'avec la première.

Les autres espèces sont traitées avec la même relation que le hêtre pour les feuillus et que l'épicéa pour les résineux.

Les relations ont été déterminées sur des mesures de 2019 et 2020 (considérées valables pour 2019). Elles ont été utilisées pour les 3 inventaires (2009, 2015, 2019).

Pour les arbres qui n'ont jamais été mesurés, le rayon de couronne a été considéré identique dans les quatre directions cardinales, et a été calculé selon les Equations 20 et 21 avec les valeurs de paramètres reprises dans le Tableau 3.

Pour les arbres mesurés en 2019 (ou 2020), l'accroissement du rayon quadratique moyen a été estimé sur base des relations. La mesure, effectuée en 2019 ou 2020 a bien sûr été conservée pour 2019. Pour 2015, l'accroissement du rayon quadratique moyen entre 2015 et 2009 lui a été soustrait. Le même principe a été appliqué pour 2009. On a donc :

TABLEAU 3 – Résumé des paramètres choisis pour estimer les hauteurs et les Dd pour les différentes essences et années d’inventaires.

Espèce	Année de l’inventaire	$Hauteur = c \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{dbh-a}{b}\right)\right)$			$Dd = 100 \cdot \left(a + b \cdot C_{130} + c \cdot \frac{1}{C_{130}} + d \cdot \frac{1}{C_{130}^2}\right)$			
		a	b	c	a	b	c	d
Hêtre	2009, 2015, 2019	2,574	21,813	34,116	0,149	0	20,688	0
Chêne et chêne rouge	2009, 2015, 2019	-1,629	32,733	31,524				
Bouleau	2009, 2015, 2019	-0,762	19,122	28,617				
Douglas	2009, 2015	3,095	34,279	48,502	0,149	0	0	291,871
	2019	3,350	31,683	50,281				
Sapin pectiné	2009, 2015	2,577	26,730	38,955	0,082	0	17,418	-206,724
	2019	5,453	23,599	40,438				
Epicéa, tsuga	2009, 2015, 2019	3,742	29,934	45,904	0,097	0	8,372	0
Pin sylvestre	2009, 2015, 2019	3,823	22,991	30,531				

$$CR_{pred,D,2015} = CR_{obs,D} - (CR_{pred,2019} - CR_{pred,2015}), \quad (22)$$

$$CR_{pred,D,2009} = CR_{obs,D} - (CR_{pred,2019} - CR_{pred,2009}), \quad (23)$$

avec l’indice *pred* se rapportant à des valeurs prédites, *obs* à des mesures effectuées en 2019 ou 2020, D à une direction cardinale (N, S, E ou O) et le nombre à l’année concernée.

TABLEAU 4 – Résumé et évaluation des ajustements réalisés pour estimer les hauteurs totales et les rayons de couronne selon différentes méthodes. L'espèce et l'année indiquent les données utilisées pour ajuster le modèle. Elles sont toutes issues du site de Vielsalm, à l'exception des données pour le pin sylvestre provenant de l'Inventaire Permanent des Ressources Forestières de Wallonie. Les paramètres a, b, c, d sont accompagnés de leur erreur standard entre parenthèses. N indique le nombre de données utilisées pour réaliser l'ajustement. Les résultats des régressions linéaires classiques et orthogonales comparant les observations et les prédictions de hauteurs totales et de rayons de couronne sont indiqués par le R^2 , la p-valeur du test F pour la significativité du modèle et les valeurs de l'intercept et de la pente accompagnés entre parenthèses de leurs intervalles de confiance à 95%. Pour ces tests de régression, on souhaite avoir le 0 compris dans l'intervalle de confiance de l'intercept et le 1 dans l'intervalle de confiance de la pente.

Espèce	Année(s)	Paramètres (erreur standard)					Régression linéaire simple		Régression orthogonale		
		a	b	c	d	N	R ²	p-valeur	intercept	pente	
$H_{\text{auteur}} = c \cdot (1 - \exp(-\frac{a \cdot h}{b}))$											
Hêtre	2015	3,216 (1,026)	18,660 (3,340)	32,337 (1,743)		98	0,838	<0,0001	-1,7e-10 (-2,137; 2,137)	1 (0,911; 1,000)	
Hêtre	2019	0,978 (2,131)	31,406 (9,819)	30,425 (5,120)		36	0,885	<0,0001	8,602e-11 (-3,216; 3,216)	1 (0,875; 1,125)	
Hêtre	2015 et 2019	2,574 (0,955)	21,813 (3,397)	34,116 (1,772)		134	0,849	<0,0001	-2,57e-10 (-1,775; 1,775)	1 (0,927; 1,073)	
Douglas	2015	3,095 (1,346)	34,279 (6,740)	48,502 (2,688)		51	0,945	<0,0001	-1,07e-10 (-2,715; 2,715)	1 (0,930; 1,070)	
Douglas	2019	3,350 (1,942)	31,683 (9,352)	50,281 (3,474)		16	0,976	<0,0001	-8,30e-11 (-3,860; 3,860)	1 (0,909; 1,091)	
Épicéa	2015	4,177 (0,552)	24,956 (3,438)	43,923 (2,078)		44	0,959	<0,0001	-8,05e-11 (-1,414; 1,414)	1 (0,935; 1,065)	
Épicéa	2019	-0,858 (1,040)	4766596,889 (8,650e+10)	2927643,049 (5,313e+10)		28	0,992	<0,0001	7,7218e-9 (-0,423; 0,423)	1 (0,963; 1,037)	
Sapin pectiné	2015	3,742 (0,451)	29,934 (3,792)	45,904 (2,257)		72	0,937	<0,0001	-1,24e-12 (-0,931; 0,931)	1 (0,946; 1,050)	
Sapin pectiné	2019	2,577 (0,876)	26,730 (3,637)	38,955 (1,469)		51	0,958	<0,0001	7,97e-11 (-1,767; 1,767)	1 (0,940; 1,060)	
Sapin pectiné	2015	5,453 (1,007)	23,599 (4,467)	40,438 (1,983)		14	0,979	<0,0001	5,13e-11 (-2,577; 2,577)	1 (0,909; 1,091)	
Tous les résineux	2015 et 2019	3,095 (0,463)	33,314 (2,547)	46,368 (1,207)		248	0,944	<0,0001	1,497 (0,604; 2,389)	0,944 (0,915; 0,973)	
Pin sylvestre (IPREWF)	2020	3,823 (1,283)	22,991 (2,440)	30,531 (0,900)		811	0,536	<0,0001	2,117e-10 (-1,572; 1,572)	1 (0,934; 1,066)	
$H_{\text{auteur}} = a + b \cdot \ln(dbh) + c \cdot \ln(dbh)^2 + d \cdot \ln(dbh)^3$											
Hêtre	2015	-18,144 (1,900)	12,402 (0,568)	0	0	98	0,833	<0,0001	1,6035e-7 (-2,176; 2,176)	1 (0,909; 1,091)	
Hêtre	2019	-0,981 (1,660)	0	2,110 (0,132)		36	0,883	<0,0001	1,5935e-8 (-3,254; 3,254)	1 (0,873; 1,127)	
Douglas	2015	101,249 (35,914)	-112,901 (36,736)	40,673 (11,905)	-4,092 (1,238)	51	0,947	<0,0001	2,4146e-6 (-2,651; 2,651)	1 (0,932; 1,068)	
Douglas	2019	-29,561 (3,281)	17,207 (0,790)	0		16	0,971	<0,0001	3,7266e-9 (-4,195; 4,195)	1 (0,902; 1,098)	
Épicéa	2015	96,878 (26,366)	-116,460 (28,807)	44,894 (9,938)	-4,849 (1,096)	44	0,964	<0,0001	4,3786e-6 (-1,307; 1,307)	1 (0,940; 1,060)	
Épicéa	2019	-28,846 (16,405)	41,652 (19,081)	-18,139 (7,089)	2,913 (0,833)	28	0,994	<0,0001	3,2333e-7 (-0,374; 0,374)	1 (0,968; 1,032)	
Sapin pectiné	2015	61,470 (24,945)	-71,741 (25,700)	27,897 (8,369)	-2,926 (0,876)	51	0,960	<0,0001	-7,209e-7 (-1,728; 1,728)	1 (0,941; 1,059)	
Sapin pectiné	2019	89,354 (58,788)	-104,179 (56,372)	39,071 (17,313)	-4,093 (1,721)	14	0,981	<0,0001	4,4235e-6 (-2,472; 2,472)	1 (0,912; 1,088)	
$CR = a \times dbh^b$											
Hêtre	2019	0,779 (0,270)	0,567 (0,092)			60	0,415	<0,0001	0,304 (-1,611; 2,219)	0,953 (0,656; 1,251)	
Douglas	2019	0,294 (0,217)	0,694 (0,168)			34	0,499	<0,0001	-0,727 (-3,148; 1,695)	0,966 (0,617; 1,315)	
Épicéa	2019	0,381 (0,099)	0,593 (0,067)			34	0,733	<0,0001	0,173 (-0,510; 0,856)	0,951 (0,744; 1,158)	
Sapin pectiné	2019	0,419 (0,132)	0,611 (0,076)			32	0,765	<0,0001	-0,448 (-1,593; 0,697)	0,910 (0,722; 1,098)	
$CR = \frac{1}{2} \times dbh \cdot Dd \text{ avec } Dd = 100 \cdot (a + b \cdot \frac{CR}{C_{130}} + c \cdot \frac{CR}{C_{130}^2} + d \cdot \frac{CR}{C_{130}^3})$											
Hêtre	2019	0,149 (0,018)	0	20,688 (1,989)		60	0,439	<0,0001	-1,399 (-3,723; 0,86)	1,223 (0,800; 1,587)	
Douglas	2019	0,149 (0,005)	0	8,372 (0,611)	291,871 (23,815)	34	0,526	<0,0001	0,428 (-1,481; 2,337)	0,922 (0,606; 1,237)	
Épicéa	2019	0,097 (0,011)	0	17,418 (2,205)	-206,724 (47,651)	34	0,766	<0,0001	-0,108 (-0,788; 0,571)	1,032 (0,826; 1,237)	
Sapin pectiné	2019	0,082 (0,012)	0			32	0,778	<0,0001	-0,536 (-1,655; 0,584)	1,113 (0,892; 1,335)	
Sapin pectiné	2019										

2.3.3.6 Composition chimique

Dans les fichiers "inventaire", on renseigne également la composition chimique de différents compartiments des arbres selon leur espèce, en indiquant les concentrations (mg/g) de C, N, P, S, Ca, Mg, K, Na, Al, Mn, Fe, Cl et Si. On s'est contenté de caractériser la composition des feuilles supérieures et ce en se basant sur les données moyennes d'analyses foliaires effectuées en 2019 à Vielsalm pour des hêtres, douglas, sapins pectinés et épicéas (données reçues de Tanguy Manise : Analyses foliaires Hêtres OTV.xlsx et Analyses foliaires Résineux OTV.xlsx). Les concentrations en S, Na, Al, Cl, Si n'étant pas déterminées, elles ont été fixées à 0. Pour les chênes, bouleaux et autres feuillus, on a pris les mêmes valeurs que pour le hêtre. Pour les pins sylvestres et autres conifères on a pris les mêmes valeurs que pour l'épicéa.

2.3.3.7 Eclaircies

En plus des fichiers "inventaire" classiques, un fichier "éclaircies" a été créé. Il n'est pas directement utile à l'initialisation du modèle mais sera utilisé lors des évolutions. Ce dernier renseigne simplement les numéros des arbres qui ont été abattus ou qui sont morts durant la période d'étude ainsi que leur dernière année de présence. Celle-ci n'est malheureusement pas souvent connue avec précision. Soit, la date à laquelle l'arbre a été découvert mort est mentionnée et utilisée comme telle, soit elle ne l'est pas et on se base sur les inventaires successifs des différentes années pour la déterminer. Bien souvent, une période de plusieurs années est possible et le milieu de cette période a été choisi comme dernière année de présence. Précisons que si une date renseignée est antérieure au 10 août d'une certaine année, la dernière année de présence est attribuée à l'année précédente car on considère que l'arbre n'a pas passé la période de végétation annuelle.

2.4 Paramétrisation du modèle

Le nombre d'espèces préalablement paramétrisées dans HETEROFOR était limité. En particulier, les espèces résineuses étaient toutes regroupées sous un groupe conifère, sans distinction spécifique. La paramétrisation de plusieurs espèces résineuses a été effectuée conjointement à la réalisation de ce mémoire mais n'étant pas encore aboutie, il a fallu déterminer certains des paramètres. Tous ces paramètres sont renseignés dans le fichier "espèces" d'HETEROFOR. L'attention a été portée sur les quatre espèces suivantes : le douglas, le sapin pectiné, l'épicéa et le pin sylvestre. Certains paramètres sont directement basés sur la littérature, comme par exemple la surface foliaire spécifique. D'autres ont été estimés sur base de données d'inventaire ou de biomasse pour ajuster des relations empiriques telles que la relation du Dd (voir Eq. 20). Un paramètre régulant l'ouverture des stomates pour les différentes espèces a été adapté en essayant de reproduire au mieux les observations à la fois de teneur en eau du sol, de transpiration individuelle des arbres

et de PPB annuelle, un certain compromis étant nécessaire. Ce sont des calibrations "externes" qui sont indépendantes du modèle. Parmi les calibrations "internes" nécessitant des résultats du modèle et qui permettent un ajustement plus précis des prédictions sur les observations, le ratio $\frac{PPN}{PPB}$ est un paramètre essentiel sur lequel on peut jouer. Une autre paramétrisation importante est la calibration d'une relation déterminant l'accroissement en hauteur indépendamment de l'accroissement radial.

2.4.1 Ratio $\frac{PPN}{PPB}$

Dans HETEROFOR, chaque espèce doit être caractérisée par un paramètre ratio $\frac{PPN}{PPB}$ qui permet de déterminer la PPN comme étant une fraction de la PPB calculée. Le paramètre du ratio $\frac{PPN}{PPB}$ a d'abord été adapté par essai-erreur conjointement à l'adaptation du paramètre gérant la régulation stomatique. Il est ensuite déterminé plus finement par calcul. Pour ce faire, on lance d'une part une simulation HETEROFOR à partir de l'inventaire de 2015 jusqu'à 2019. D'autre part, une reconstruction a été réalisée entre 2015 et 2019. La reconstruction d'HETEROFOR est un mode qui calcule les accroissements moyens de chaque arbre en se basant sur un fichier d'inventaire initial (dans ce cas-ci, l'inventaire de 2015) et un fichier d'inventaire final (l'inventaire de 2019), ainsi que sur le fichier "éclaircies". Un ratio $\frac{PPN}{PPB}$ est calculé par HETEROFOR pour chaque arbre à partir d'une équation considérant la forme et les dimensions de l'arbre, ainsi que son accès à la lumière et la température de l'air. Cette relation peut être ajustée avec des ratios $\frac{PPN}{PPB}$ calculés en divisant la PPN reconstruite par la PPB prédite. La biomasse foliaire d'abord estimée par le modèle est ensuite adaptée à la capacité effective de l'arbre à produire cette biomasse foliaire qui dépend de sa PPN. La biomasse foliaire et par la suite la biomasse des racines fines des arbres peuvent donc être réduites. Comme les biomasses des feuilles et des racines fines calculées par la procédure de reconstruction ne sont pas corrigées, il faut remplacer la biomasse et la retranslocation des feuilles et des racines fines par la biomasse et la retranslocation des feuilles et des racines fines prédites. On a donc effectué pour chaque arbre et chaque année le calcul suivant :

$$\begin{aligned} \frac{PPN}{PPB} = \frac{1}{PPB_{pred}} \cdot (& PPN_{rec} + retranslocationFeuilles_{rec} + retranslocationFinesRacines_{rec} \\ & - productionFeuilles_{rec} - productionFinesRacines_{rec} - retranslocationFeuilles_{pred} \\ & - retranslocationFinesRacines_{pred} + productionFeuilles_{pred} + productionFinesRacines_{pred}), \end{aligned} \quad (24)$$

les indices *pred* se rapportant aux prédictions de la simulation classique et les indices *rec* se rapportant à la reconstruction.

La moyenne des ratios obtenus a ensuite été établie par espèce pour les hêtres, douglas, épicéas, sapins pectinés et pins sylvestres, en excluant les valeurs supérieures à 1 ou inférieures à 0. Ces moyennes ont finalement été utilisées pour les paramètres du ratio $\frac{PPN}{PPB}$ des différentes espèces.

2.4.2 Accroissement en hauteur

Après avoir calculé la PPN comme une fraction de la PPB, HETEROFOR l'alloue en priorité aux organes fonctionnels (feuilles et fines racines). Après une série d'étapes dans l'allocation du carbone, ce qui en reste est réparti entre les parties aériennes et les parties sous-terraines des arbres. Ce qui est alloué aux parties aériennes sert à l'accroissement radial et à l'accroissement en hauteur mais les deux sont à ce stade confondus. Afin de déterminer spécifiquement d'une part l'accroissement en hauteur et d'autre part l'accroissement radial, l'accroissement en hauteur est fixé sur base d'une relation empirique ce qui permet de finalement en déduire l'accroissement radial.

La relation empirique permettant de déterminer l'accroissement en hauteur des arbres (Eq. 25) prend en compte le potentiel de croissance en hauteur (Δh_{pot}), l'indice de compétition pour la lumière (LCI) et la taille de l'arbre (diamètre à hauteur de poitrine (dbh) ou hauteur totale (h)). Le LCI est le rapport entre le rayonnement absorbé calculé avec et sans arbres voisins. Il va de 0 quand l'arbre ne reçoit pas de lumière, à 1 quand il n'y a pas de compétition pour la lumière.

$$\Delta h = a + b \cdot dbh + c \cdot h + d \cdot LCI + e \cdot \Delta h_{pot} + f \cdot \Delta h_{pot}^2 + g \cdot \Delta h_{pot}^3 \quad (25)$$

Le potentiel de croissance en hauteur est défini comme $\frac{\Delta(dbh^2 \cdot h)}{dbh^2}$ et correspond à ce que serait l'accroissement en hauteur si tout le carbone restant était alloué à la croissance en hauteur (Jonard *et al.*, 2020).

Les paramètres a, b, c, d, e, f, g de l'Eq. 25 ont été déterminés en ajustant l'équation par espèce en se basant sur les inventaires 2015 et 2019 réalisés pour le site de Vielsalm. Les valeurs de dbh sont les moyennes entre le dbh de 2015 et le dbh de 2019. Les valeurs de h sont les moyennes entre la h de 2015 et la h de 2019. Le potentiel de croissance en hauteur devant être établi sur base annuelle, on l'a obtenu en tenant compte des 4 années comprises entre les deux inventaires : $\Delta h_{pot} = \frac{1}{4} \cdot \frac{(dbh_{2019}^2 \cdot h_{2019} - dbh_{2015}^2 \cdot h_{2015})}{dbh^2}$. Finalement, le LCI a été obtenu en faisant tourner une première fois le modèle avec des paramètres provisoires, puisque l'Eq. 25 n'a pas encore été ajustée. Pour chaque arbre, le modèle calcule un LCI chaque année et on a pris la moyenne du LCI obtenu pour 2015, 2016, 2017, 2018 et 2019.

L'Eq. 25 a ensuite été ajustée à l'aide de l'outil de régression pas à pas de JMP, en minimisant le critère BIC, pour le douglas, le sapin pectiné, l'épicéa et le pin sylvestre. Les résultats sont présentés dans le Tableau 5 et à la Figure 11. Le facteur principal expliquant la croissance en hauteur semble être le potentiel de croissance en hauteur, qui a un effet positif pour chacune des espèces. En plus de cela, il a aussi un effet quadratique et cubique pour l'épicéa. Le LCI a un effet négatif pour l'épicéa et le sapin pectiné, ce qui est cohérent car cela signifie que pour un même potentiel de croissance en hauteur, les arbres subissant une forte compétition pour la lumière ont un accroissement en hauteur

plus important que ceux qui sont plus exposés à la lumière. L'effet est par contre positif pour le pin sylvestre mais cela est contrebalancé par le fait que les pins sylvestres du site ont tous un faible LCI. De plus, le paramètre est peu significatif (p-valeur : 0,1911). Il est malgré tout conservé par l'algorithme de minimisation du BIC de JMP, ce qui n'est pas le cas pour le douglas. Dans la Figure 11, les courbes montrent une croissance en hauteur plus importante pour les arbres subissant une forte compétition pour la lumière dans les cas du douglas et de l'épicéa. Si cela n'est pas le cas pour le sapin pectiné, malgré l'effet négatif du LCI mis en avant plus tôt, c'est à cause de la valeur moyenne de hauteur considérée dans ces graphiques, qui diffère pour les arbres avec faible ou forte compétition pour la lumière. L'effet de la hauteur est pris en compte pour les douglas, sapins pectinés et pins sylvestres. En revanche, la taille, que ce soit la hauteur ou le diamètre à hauteur de poitrine, n'intervient pas pour l'épicéa.

TABLEAU 5 – Paramètres (estimation et p-valeur du test t pour la significativité du paramètre), R^2 et RMSE du modèle de croissance en hauteur (Eq. 25) pour différentes essences.

	Douglas		Epicéa		Sapin pectiné		Pin sylvestre	
	Estimation	p-valeur	Estimation	p-valeur	Estimation	p-valeur	Estimation	p-valeur
Intercept	-0,0500	0,6169	-0,1243	< 0,0001	-0,4729	< 0,0001	1,1633	0,1139
h (en mètres)	-0,0104	0,0001			0,0135	0,0042	-0,04163	0,1389
LCI			-0,2997	0,0097	-0,5598	0,0354	0,5378	0,1911
Δh_{pot} (en mètres/an)	0,8022	< 0,0001	0,7922	< 0,0001	0,5735	< 0,0001	0,8067	< 0,0001
Δh_{pot}^2			-0,2144	0,0001				
Δh_{pot}^3			0,0346	0,0249				
RMSE		0,2604		0,1976		0,2732		0,1007
R^2		0,8491		0,8053		0,7956		0,9939

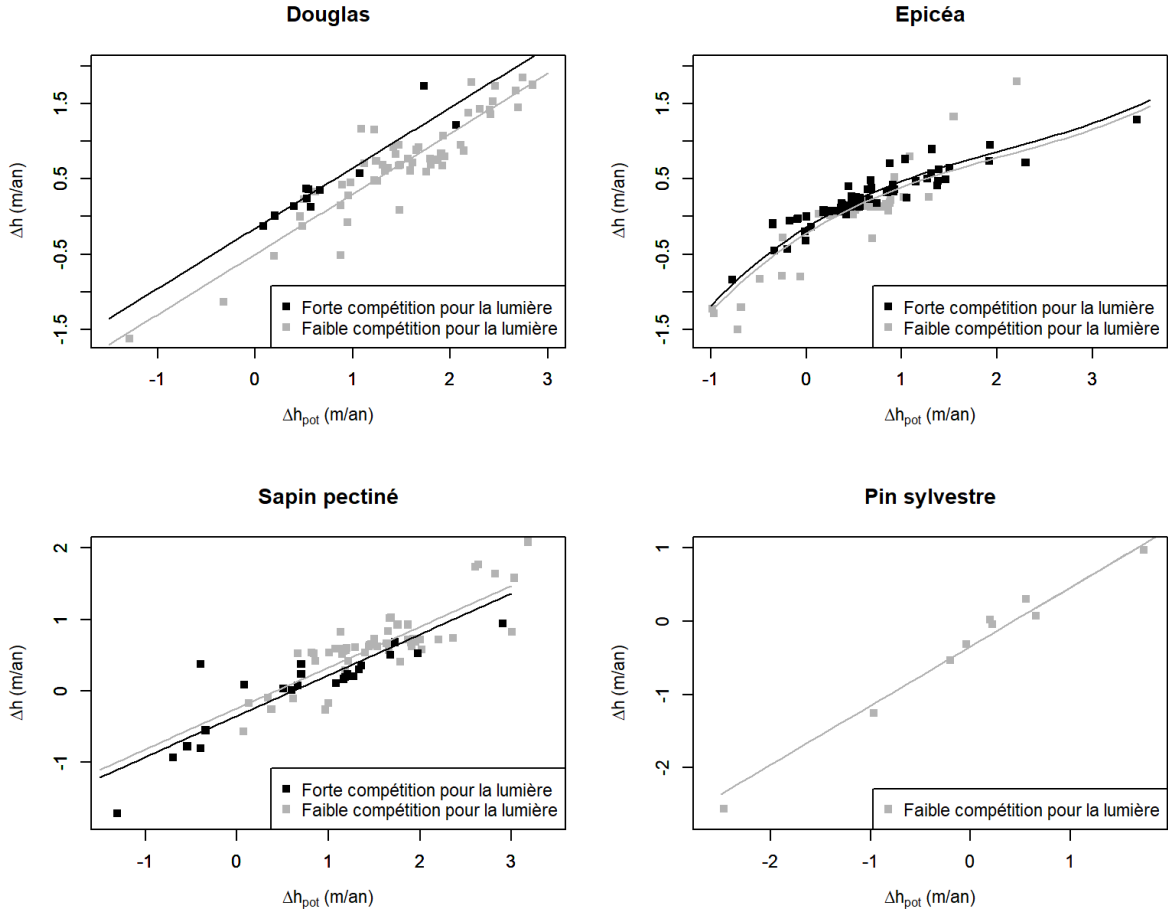


FIGURE 11 – Effet du potentiel de croissance en hauteur (Δh_{pot}) sur l'accroissement en hauteur (Δh) pour différentes essences et pour deux niveaux de compétition pour la lumière (forte compétition pour la lumière : $LCI \leq 0,15$; faible compétition pour la lumière : $LCI > 0,15$). Les lignes représentent les prédictions du modèle obtenues en utilisant l'Equation 25 avec les valeurs de paramètres de la Table 5 et avec des valeurs moyennes pour la hauteur et le LCI.

2.5 Traitement des données pour l'évaluation du modèle

Une fois que l'on a initialisé et paramétrisé le modèle, on est capable de lancer des simulations et d'obtenir les prédictions qui y sont associées. Mais il est nécessaire de pouvoir juger de la qualité de ces prédictions et d'identifier quels sont les processus correctement reproduits et quels sont ceux qui peuvent poser problème. Cela se fait en confrontant les prédictions du modèle aux observations réalisées sur le site et en voyant si le modèle est capable de reproduire ce que l'on observe. Pour ce faire, il faut établir une correspondance entre les mesures prises sur le terrain et les prédictions du modèle. Les données observées et prédites doivent donc être traitées de sorte qu'elles puissent être convenablement comparées les unes avec les autres. Dans notre cas, les résultats du modèle ont été évalués selon les aspects suivants :

- Phénologie : dates de débourrement et de chute des feuilles

- Cycle de l'eau : teneur en eau du sol et réserve en eau utile relative, pluviolessivats, transpiration individuelle, évapotranspiration
- Cycle du carbone : production primaire brute
- Croissance des arbres : croissance radiale

2.5.1 Phénologie

Les observations de phénologie sont issues des travaux de Quentin Hurdebise (Hurdebise *et al.*, 2019). Les indicateurs phénologiques sont dérivés de mesures de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR). Les données sont collectées toutes les 30 secondes et enregistrées en tant que moyennes semi-horaires. Un capteur installé au sommet de la tour mesure le PAR au-dessus de la canopée (PAR_a). D'autres capteurs, installés sous hêtre, mesurent le PAR sous la canopée (PAR_b). La transmission relative de la lumière (RLT) a été calculée comme $\frac{PAR_b}{PAR_a}$ pour chaque capteur sous hêtre et pour chaque demi-heure sélectionnée. Les données correspondant à de faibles radiations ($PAR_b < 5 \text{ W/m}^2$ ou $PAR_a < 100 \text{ W/m}^2$), c'est-à-dire inférieures à 10% de la valeur typiquement observée durant une journée ensoleillée, ont été enlevées. La RLT journalière a été estimée pour chaque capteur sous hêtre comme la médiane des rapports $\frac{PAR_b}{PAR_a}$ semi-horaires dans une fenêtre de 20 jours centrée sur le jour d'intérêt. Afin d'éviter une variabilité inter-annuelle artificielle pouvant être causée par l'altération des capteurs ou des changements de configuration, ces valeurs ont ensuite été normalisées (RLT_{corr}) en soustrayant le rapport $\frac{PAR_b}{PAR_a}$ minimal de l'année correspondante et en divisant le résultat par l'étendue des rapports $\frac{PAR_b}{PAR_a}$ de cette année. Les jours où 80% de la valeur maximale de RLT_{corr} sont atteints sont définis comme le début de débourrement et la fin de la chute des feuilles. Les jours où 20% de la valeur maximale de RLT_{corr} sont atteints sont définis comme la fin du débourrement et le début de la chute des feuilles (Hurdebise *et al.*, 2019). En complément de l'article cité, présentant des résultats moyens sur la période étudiée (de 1997 à 2014), les résultats annuels de Quentin Hurdebise ont pu être obtenus sous forme d'un fichier Excel (Pheno_Indicators.xlsx) reprenant les dates de début et de fin du débourrement et de la chute des feuilles exprimées en jour de l'année. Notons cependant l'absence de résultats pour l'année 2010.

Une simulation HETEROFOR à partir de l'inventaire de 2009 a été effectuée afin de comparer les dates prédites pour le début et la fin du débourrement et de la chute des feuilles aux observations. Cette comparaison a été réalisée après avoir converti les dates prédites (jj/mm/aaaa) en jour de l'année (1 à 365 ou 366) pour les années 2009, ainsi que 2011 à 2014.

2.5.2 Teneur en eau du sol et réserve en eau utile relative

Il est possible de fournir à HETEROFOR des fichiers de teneur en eau du sol, à un pas de temps journalier ou horaire afin de comparer directement l'évolution temporelle des prédictions et des observations. En plus de la date (et l'heure pour les fichiers horaires), chaque ligne du fichier doit contenir une valeur de teneur en eau (en m^3 d'eau par m^3 de sol) et l'horizon auquel elle correspond. On peut donc disposer de plusieurs mesures pour le même pas de temps si elles concernent un horizon différent. Comme il s'agit de données de validation, il n'est pas nécessaire d'avoir des données complètes pour chaque horizon ou chaque pas de temps.

A Vielsalm, la teneur en eau est mesurée par des sondes situées à différentes profondeurs : 5, 18, 42, 76 et 110 cm. En concordance avec les limites des horizons qui ont été définies dans le fichier "sol", les sondes situées à 18, 42 et 76 cm de profondeur ont été assignées à l'horizon dans lequel elles se situent, à savoir respectivement les horizons AB, BW et BC (voir la Section 2.3.2 pour un rappel sur les différents horizons du sol). Les sondes à 5 cm de profondeur sont situées juste à l'interface entre l'horizon O et l'horizon AP et sont assignées à l'horizon AP. Les sondes situées à 110 cm de profondeur sont assignées à notre horizon le plus profond c'est-à-dire l'horizon C, bien que le sol n'ait été caractérisé que jusqu'à 105 cm de profondeur.

Deux profils complets contenant une sonde à chacune des 5 profondeurs mentionnées sont installés : l'un sous hêtre et l'autre sous douglas. De plus, on dispose d'une sonde supplémentaire à 5 cm de profondeur sous hêtre et d'une autre sous douglas. Au total, on a donc quatre sondes de teneur en eau pour l'horizon AP, et deux sondes pour les horizons AB, BW, BC et C. Pour chacune, les données sont fournies à l'échelle semi-horaire. On en a donc fait des moyennes horaires et journalières pour construire les fichiers utilisés par HETEROFOR.

Plusieurs fichiers de teneurs en eau ont été construits pour chacun des profils (ou sonde si elle est seule dans le profil) séparément. Cependant, comme le modèle considère les propriétés et les teneurs en eau du sol homogènes pour l'ensemble de la parcelle, le plus intéressant est sans doute d'utiliser un fichier avec des teneurs en eau moyennes observées dans les différents profils. Les prédictions ont donc aussi été comparées à des observations moyennes pour les deux profils complets (sous hêtre et sous douglas).

Précisons qu'avant octobre 2014, on ne dispose que d'une sonde située à 5 cm de profondeur sous hêtre. La validation de la teneur en eau a donc été effectuée sur les simulations à partir de la grande parcelle de 2015.

En plus de la teneur en eau du sol par horizon, HETEROFOR calcule une réserve en eau utile relative définie comme le rapport entre la réserve en eau utile à un moment donné (la quantité d'eau stockée dans le sol qui peut être utilisée par les plantes à ce moment-là) et la réserve en eau utile de référence à la capacité au champs (de Wergifosse

et al., 2020a). Sur base des fichiers de teneurs en eau par horizons, HETEROFOR calcule la réserve en eau utile relative observée et la compare aux prédictions.

2.5.3 Pluiolessivats

Dans le cadre de la thèse de Rémy Soubie (Soubie, 2014), les pluiolessivats ont été mesurés à l'aide d'un réseau de 18 pluviomètres répartis dans les deux sous-peuplements de hêtres et de douglas. Généralement, les relevés ont été effectués environ toutes les deux semaines. Ils ont pu être exploités du 18 mars 2010 au 20 octobre 2011, avec une absence de données du 18 novembre 2010 au 24 février 2011. Les résultats sont fournis directement en mm pour chaque pluviomètre, entre deux dates de collecte.

Un autre dispositif, mis en place plus récemment, fournit des mesures de pluiolessivats. Il consiste en 28 pluviomètres d'un diamètre de réception de 220 mm, répartis sous hêtre et sous douglas. Les relevés obtenus s'étendent du 8 mai 2019 au 10 mars 2020. Etant donné la plus faible fréquence de relevés et le fait que le fichier "météo" construit pour le modèle ne s'étende que jusque fin 2019, seules deux périodes sont exploitables (du 8 mai 2019 au 20 juin 2019 et du 20 juin 2019 au 27 août 2019). Les résultats sont fournis pour chaque pluviomètre en mL, entre deux dates de collecte.

La simulation HETEROFOR a été effectuée à partir de l'inventaire de 2009 afin de pouvoir tenir compte des observations de 2010 et 2011 (qui sont largement majoritaires). De plus, la zone d'inventaire plus restreinte, en grande partie composée des placettes ICOS 1 et 2, est plus appropriée au vu de la localisation des pluviomètres sous hêtres et sous douglas. Les prédictions du modèle sont exprimées en mm et sont valables pour l'ensemble du peuplement. Les résultats ont été exportés à l'échelle journalière. Afin d'être comparés aux observations, ils ont ensuite été regroupés par période, c'est-à-dire que les prédictions journalières de pluiolessivats (en mm) ont été sommées à partir du lendemain de la date d'un relevé jusqu'à la date du relevé suivant. Pour les observations, on a utilisé uniquement la moyenne des données valides de pluiolessivats récoltés par les différents pluviomètres afin qu'elles soient également valables pour l'ensemble du peuplement. Les observations de 2010 et 2011, fournies en mm, sont alors comparables aux prédictions. Les observations de 2019 étant fournies en mL, une étape supplémentaire était nécessaire. La valeur en mL a été convertie en L et divisée par la surface réceptrice d'un pluviomètre, exprimée en m^2 ($\sim 0,038 m^2$). On a donc obtenu une valeur en L/m^2 , équivalents aux mm, comparable aux prédictions du modèle exprimées en mm. Une régression orthogonale a été effectuée pour comparer prédictions et observations des différentes périodes de collecte.

2.5.4 Transpiration à l'échelle de l'arbre

La transpiration individuelle des arbres a été déterminée à partir de capteurs de densité de flux de sève dont les données ont été acquises sous forme de moyennes bi-

horaires. Les mesures ont été effectuées du 21 mai 2010 au 2 octobre 2010 et du 6 mai 2011 au 9 octobre 2011 dans le cadre de la thèse de Rémy Soubie (Soubie, 2014). Pour obtenir la transpiration, exprimée en L/heure, la densité de flux de sève (en $\frac{g}{m^2 \cdot s}$) a été multipliée par une surface d'aubier (en m^2), multipliée par 3600 pour passer de secondes en heures et divisée par 1000 pour passer de g en L d'eau. La surface d'aubier est utilisée car il s'agit de la partie conductrice de la sève minérale. Cependant, la densité de flux sève n'est pas homogène sur toute la section de l'aubier, croissant généralement de l'intérieur vers l'extérieur. Afin de tenir compte de ce profil radial de densité de flux de sève, une méthode proposée et utilisée dans Soubie (2014) est de conserver la valeur de densité de flux de sève mesurée par le capteur et de la considérer constante le long d'une surface d'aubier corrigée (SA_c). La densité de flux de sève a donc été multipliée non pas par la surface d'aubier réelle mais par la surface d'aubier corrigée, correspondant à l'intégration du profil radial de flux de sève sur la surface d'aubier. Les surfaces d'aubier corrigées ont été déterminées par arbre à partir du dbh, selon une formule dépendant de son espèce.

Pour les hêtres, on a utilisé une relation décrite dans (Jonard *et al.*, 2011) :

$$SA_c = \frac{2,11 \cdot \pi}{12} \cdot dbh^2. \quad (26)$$

Pour le douglas, une relation a été établie expérimentalement sur le site de Vielsalm (Soubie, 2014) :

$$SA_c = 0,22 \cdot \pi \cdot \left(\frac{dbh}{2}\right)^2. \quad (27)$$

Pour le sapin pectiné, en l'absence d'information sur la surface d'aubier corrigée, la formule utilisée est la même que pour le douglas (Eq. 27).

Les densités de flux de sève ont été mesurées dans 9 hêtres (arbres n° 70, 86, 142, 146, 156, 168, 169, 170, 172), 6 douglas (arbres n° 25, 27, 36, 49, 57, 63) et 3 sapins pectinés (arbres n° 9, 123, 184). Mais parmi ceux-ci, les arbres n° 156, 168, 169, 170, 172 et 184 sont situés en-dehors de la zone d'inventaire de 2009 utilisée avec le modèle. On s'est donc limité à 3 hêtres (oubli du n° 86), 6 douglas et 2 sapins pectinés. Les prédictions du modèle ayant une résolution horaire, les observations ont d'abord été agrégées au niveau horaire. Observations et prédictions ont ensuite été comparées au moyen de régressions orthogonales par espèce au niveau mensuel et journalier.

2.5.5 Evapotranspiration

L'évapotranspiration réelle peut être obtenue à partir du flux de chaleur latente mesuré au sommet de la tour. Les données sont fournies au pas de temps semi-horaire en W/m^2 jusqu'en 2018 et ont été converties en évapotranspiration par la formule suivante :

$$ET = \frac{LE}{\Delta H_{vap}} \cdot 86400 \quad (28)$$

avec

ET l'évapotranspiration (en mm/jour),

LE le flux de chaleur latente (en W/m^2),

ΔH_{vap} la chaleur latente de vaporisation de l'eau à 25 ° C ($2,45 \cdot 10^6$ J/kg).

Ces données ont été agrégées à l'échelle horaire avant d'être comparées aux prédictions du modèle. Les prédictions ont été calculées à partir des résultats de flux hydriques prédits à l'échelle horaire pour l'ensemble du peuplement. L'évapotranspiration prédite est la somme des prédictions de l'interception, de la transpiration des arbres, de la transpiration du sous-étage et de l'évaporation du sol.

Des régressions orthogonales ont été effectuées pour comparer observations et prédictions à différents niveaux d'agrégation temporelle : mensuel, journalier et horaire. Les simulations ont été lancées aussi bien à partir de la petite parcelle que de la grande. Les périodes de validation s'étendent respectivement de 2010 à 2018 et de 2016 à 2018.

L'évolution temporelle a été analysée à l'aide de graphiques représentant l'évapotranspiration prédite et observée au cours du temps. On a regardé l'évolution journalière et mensuelle de l'évapotranspiration au cours des différentes années, ainsi que son évolution horaire au cours d'une journée moyenne pour chaque mois.

2.5.6 Production primaire brute

La méthode d'eddy covariance ne permet pas de mesurer directement la PPB. C'est la NEE qui est mesurée. Une méthodologie a donc été appliquée pour partitionner la NEE en PPB et respiration de l'écosystème. L'idée générale est de déduire la respiration de l'écosystème à partir de données de nuit. Le rayonnement étant nul ou très faible la nuit, la photosynthèse est considérée comme nulle et la respiration de l'écosystème est égale à la NEE. Une relation entre la température et la respiration de l'écosystème est établie et extrapolée aux données en journée. En connaissant la valeur de NEE et de respiration de l'écosystème, on peut déterminer la PPB.

Les données de flux reçues ont préalablement été traitées à l'aide du package REdDy-Proc développé dans le langage R (Wutzler *et al.*, 2018). Différentes étapes doivent être suivies avant d'avoir un jeu de données satisfaisant. En effet, les mesures de NEE ne sont fiables que lorsque l'atmosphère est suffisamment turbulente. En particulier la nuit, les conditions sont généralement plus stables, ce qui peut mener à une sous-estimation des flux. La turbulence de l'atmosphère est quantifiée par la vitesse de friction (u^*). Sous une certaine valeur seuil de u^* , la mesure est considérée manquante. Les données manquantes sont ensuite complétées en utilisant la valeur moyenne observée dans des conditions météorologiques similaires (rayonnement, température de l'air et déficit de pression) et dans une certaine fenêtre de temps. Selon la disponibilité et la validité des variables météorologiques concernées, la taille de la fenêtre de temps peut varier et le remplacement peut

se baser sur l'heure de la journée.

L'estimation de cette valeur seuil est assez sensible et est responsable d'une part de l'incertitude sur les valeurs de PPB. Un bootstrap (rééchantillonnage avec remplacements) a été réalisé pour générer 200 pseudoréplicats du jeu de données pour lesquels la u^* seuil a été estimée. On a donc une distribution composée de 200 valeurs de u^* seuils. Les valeurs de PPB obtenues avec les u^* seuils correspondant aux 5^e, 50^e et 95^e percentiles de la distribution ont été fournies en plus des valeurs de PPB obtenues avec la u^* seuil déterminée sur le jeu de données initial. On a donc quatre séries de valeurs pour la PPB que nous appelons respectivement PPB05, PPB50, PPB95 et PPB*. Les valeurs de PPB* ont été utilisées comme nos observations, tandis que les valeurs de PPB05, PPB50 et PPB95 ont été utilisées pour estimer une incertitude sur les résultats agrégés, liée au choix de la u^* seuil. Lorsqu'on agrège les résultats, on réalise une moyenne pour un certain pas de temps. Les moyennes ont été calculées pour les quatre séries de valeurs de PPB. La différence entre le maximum et le minimum des quatre valeurs obtenues, divisée par leur médiane constitue une erreur relative que l'on a associée à la valeur de PPB* agrégée. Cette méthodologie est proposée dans Wutzler *et al.* (2018).

La PPB est fournie au pas de temps semi-horaire en $\frac{\mu\text{mol de CO}_2}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$. Elle a été convertie en $\frac{\text{g de C}}{\text{m}^2 \cdot \text{an}}$ en tenant compte de la masse molaire du carbone (12 g/mol).

Les comparaisons entre observations et prédictions ont été effectuées pour la petite parcelle (de 2010 à 2018) et pour la grande parcelle (de 2016 à 2018), ainsi que pour chacun des secteurs qui y sont associés et qui ont été définis préalablement (petit secteur hêtre, petit secteur douglas, grand secteur hêtre, grand secteur douglas, grand secteur mixte). Pour ce faire, les observations de PPB à l'échelle horaire ont été réparties par secteur selon la direction du vent au même moment. Comme les données de direction du vent sont également fournies au pas de temps semi-horaire, il faut également les agréger au pas de temps horaire. Cela ne peut malheureusement pas se faire par une simple moyenne sur les valeurs de deux demi-heures. En effet, pour deux mesures d'angle de 5° et de 355° par exemple, cela donnerait un angle résultant de 180° alors qu'il devrait être de 0°. De plus, cela ne prend pas en compte la composante de vitesse du vent. Une approche vectorielle a donc été employée, avec la longueur des vecteurs correspondant à la vitesse du vent (WS , en m/s) et l'angle étant donné par la direction du vent (WD , en degrés). La formule suivante a été utilisée :

$$WD_h = \begin{cases} \arctan\left(\frac{WS_1 \cdot \sin(WD_1) + WS_2 \cdot \sin(WD_2)}{WS_1 \cdot \cos(WD_1) + WS_2 \cdot \cos(WD_2)}\right) & \text{si } WS_1 \cdot \cos(WD_1) + WS_2 \cdot \cos(WD_2) > 0 \\ 180^\circ + \arctan\left(\frac{WS_1 \cdot \sin(WD_1) + WS_2 \cdot \sin(WD_2)}{WS_1 \cdot \cos(WD_1) + WS_2 \cdot \cos(WD_2)}\right) & \text{si } WS_1 \cdot \cos(WD_1) + WS_2 \cdot \cos(WD_2) < 0. \end{cases}$$

L'indice h indique une valeur horaire et les indices 1 et 2 se rapportent respectivement à la première et à la seconde demi-heure de l'heure en question. On a ensuite ajouté 360° aux angles dont la valeur est négative.

En ce qui concerne les prédictions, le modèle HETEROFOR calcule la PPB pour chaque arbre individuellement en kg de carbone (convertis ensuite en g de carbone), à un pas de temps horaire.

Pour chaque parcelle ou secteur, les PPB individuelles horaires des arbres qui en font partie ont été sommées et rapportées à la surface considérée. Pour obtenir les valeurs de PPB individuelles horaires, il est possible de renseigner dans le fichier "espèces" d'HETEROFOR les numéros d'arbres d'intérêt associés à un numéro de secteur. HETEROFOR calcule en plus la superficie qu'occupent les arbres d'un même secteur. La répartition des arbres dans les différents secteurs a été réalisée à l'aide d'un logiciel SIG.

Les prédictions ont été comparées à la PPB observée au moyen de régressions orthogonales effectuées pour différents niveaux d'agrégation temporelle : mensuel, journalier et horaire. Comme pour l'évapotranspiration, l'évolution temporelle a été analysée en regardant l'évolution mensuelle et journalière de la PPB, ainsi que son évolution horaire au cours d'une journée moyenne pour chaque mois. Les erreurs relatives pour les différents pas de temps ont été calculées et affichées sur les graphiques correspondants.

2.5.7 Croissance radiale

Pour la croissance radiale, on s'est intéressé à l'accroissement annuel en surface terrière individuelle des arbres.

L'accroissement annuel en surface terrière individuelle observé a été calculé par HETEROFOR en comparant le fichier d'inventaire initial utilisé pour lancer la simulation (2009 ou 2015) au fichier d'inventaire de 2019.

Les observations et les prédictions ont été comparées au moyen de régressions orthogonales pour les espèces majoritaires. On a également représenté graphiquement l'accroissement annuel en surface terrière individuelle en fonction de la circonférence initiale de l'arbre. Lorsque le nombre de données est suffisant, on peut représenter sur ces graphiques des relations taille-croissance, la circonférence initiale de l'arbre représentant la taille, et l'accroissement annuel en surface terrière représentant la croissance. Ces relations ont été établies au moyen d'une régression segmentée, caractérisée par une circonférence seuil au-delà de laquelle il existe une relation linéaire entre la taille et la croissance, ainsi que par la pente de cette relation. Avant ce seuil, les arbres sont dominés et ont un accroissement en surface terrière très faible. Pour vérifier si le modèle est capable de reproduire ces relations taille-croissance, des régressions segmentées ont été établies pour les observations et les prédictions des espèces majoritaires. Ces régressions ont été établies pour les simulations lancées à partir de la grande parcelle de 2015, les arbres y étant plus nombreux que pour la petite parcelle de 2009.

2.6 Simulations climatiques

Pour évaluer l'impact que pourrait avoir le changement climatique sur le fonctionnement de l'écosystème, des simulations ont été effectuées selon différents scénarios climatiques. Quatre scénarios ont été comparés : un scénario dit historique, basé sur des conditions passées, et trois scénarios relatifs à une période future (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5). Ces derniers sont des scénarios issus du cinquième rapport d'évaluation du GIEC. RCP est l'abréviation de *Representative Concentration Pathway* et les nombres indiquent le forçage radiatif (en W/m^2) attendu à l'horizon 2100. Ils ont été adaptés à l'échelle locale par l'IRM. Des corrections de biais ont ensuite été apportées aux différentes variables climatiques en se basant sur la comparaison des projections pour le scénario historique avec les données observées sur le site pendant la même période. Comme les mesures collectées pour ce mémoire ne commencent qu'en 2009, il n'a pas été possible de les comparer avec les projections du scénario historique qui ne va que jusqu'en 2006. Des données ERA5 ont donc servi d'observations pour la période historique. Le jeu de données ERA5 fournit des estimations horaires de nombreuses variables climatiques, issues de modélisations et de mesures, à l'échelle de la planète, avec une résolution d'une trentaine de kilomètres.

Des simulations HETEROFOR ont pu être effectuées avec des fichiers "météo" correspondant aux scénarios climatiques corrigés qui ont été fournis par Louis de Wergifosse. Pour chaque scénario, deux simulations de 15 ans ont été effectuées, à partir de 1976 et de 1991 pour le scénario historique et à partir de 2070 et de 2085 pour les scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5. Le Tableau 6 présente les précipitations et températures annuelles moyennes des différents scénarios. L'inventaire de 2015 a été utilisé pour chacune des simulations, la date du fichier inventaire étant modifiée à la date de début de la simulation. Bien que la mortalité ait été activée, aucune éclaircie n'a été effectuée. La séparation en deux périodes de 15 ans a pour effet de réinitialiser le peuplement à mi-parcours afin de limiter sa densification.

De plus, toutes ces simulations ont été effectuées dans deux configurations différentes : avec une concentration en CO_2 atmosphérique fixe et avec une concentration en CO_2 atmosphérique variable. Lorsque la concentration en CO_2 est fixe, la valeur par défaut de 380 ppm est maintenue pour les 30 années de simulation. Cela peut être vu comme si la réponse à l'augmentation de concentration en CO_2 était totalement contrainte par d'autres facteurs limitants. Cela permet aussi de mieux percevoir les autres effets climatiques. Lorsque la concentration en CO_2 est variable, elle varie chaque année en accord avec les scénarios RCP correspondants. A cette fin, un fichier reprenant les concentrations annuelles en CO_2 doit être fourni. La réponse à l'augmentation de CO_2 peut alors être mise en évidence par rapport à la modalité de concentration en CO_2 fixe.

Les différents cas de figure ont été comparés au niveau de l'évapotranspiration, de l'accroissement en surface terrière, de la production primaire brute, du déficit de trans-

piration et de la longueur de la période de végétation.

Pour l'évapotranspiration, les résultats de flux hydriques annuels à l'échelle du peuplement ont été exportés et pour chaque année, on a réalisé la somme de l'interception, la transpiration des arbres, la transpiration du sous-étage et l'évaporation.

Les résultats de dendrométrie ont également été exportés. Ils renseignent des valeurs annuelles pour chaque arbre. Pour les arbres de certaines essences (hêtre, douglas, épicéa, sapin pectiné et pin sylvestre), les accroissements annuels en surface terrière ont été moyennés sur les 30 années, puis représentés en fonction de la circonférence initiale de l'arbre. Les relations taille-croissance des essences majoritaires (hêtre, douglas, épicéa, sapin pectiné) ont été reconstruites. On s'est également intéressé à l'accroissement en surface terrière à l'échelle du peuplement, pour toute la parcelle, ainsi que pour chacune des essences majoritaires. Pour ce faire, les accroissements annuels individuels ont été sommés (tous ensemble pour la parcelle, mais également par essence) et ensuite divisés par la superficie de la parcelle, exprimée en hectares. La production primaire brute annuelle des arbres a également été sommée pour la parcelle et pour les différentes essences et rapportée à la superficie de la parcelle, exprimée en m^2 . La même opération a été effectuée pour le déficit de transpiration, correspondant à la différence entre la transpiration potentielle et la transpiration réelle de l'arbre.

Pour la longueur de la période de végétation, on s'est basé sur les dates phénologiques exportées. Seul le hêtre a été pris en compte car il s'agit de l'essence feuillue majoritaire. On considère ici que la période de végétation s'étend du début du débourrement à la fin du jaunissement. Après avoir converti les dates concernées (jj/mm/aaaa) en jour de l'année, on a donc soustrait le jour de début du débourrement au jour de fin de jaunissement pour obtenir la longueur de la période de végétation.

Les résultats annuels d'évapotranspiration, d'accroissement en surface terrière, de production primaire brute et de longueur de la période de végétation ont été moyennés sur 30 ans et représentés par différents histogrammes, permettant de comparer les scénarios entre eux pour chacune de ces variables. L'intervalle de confiance pour la moyenne est affiché sur ces graphes et pour chaque comparaison de scénarios, un test de Tukey a été réalisé afin de déterminer si les différences entre scénarios sont significatives. Le test de Tukey est une procédure spéciale pour tests multiples permettant de comparer tous les scénarios deux à deux en maîtrisant l'erreur globale.

TABLEAU 6 – Précipitations et température annuelles moyennes pour la période historique (1976-2005) et pour les différents scénarios RCP (2070-2099). Les valeurs moyennes pour la période de végétation (fixée du 15 avril au 15 novembre) sont indiquées entre parenthèses.

Scénario	Précipitations (mm)	Température de l'air (° C)
Historique (1976-2005)	718 (507)	8,02 (12,31)
RCP2.6 (2070-2099)	709 (483)	8,76 (13,03)
RCP4.5 (2070-2099)	833 (565)	9,59 (13,59)
RCP8.5 (2070-2099)	859 (550)	11,19 (15,16)

3 Résultats

Les résultats sont scindés en deux grandes parties : l'évaluation et les expériences de simulation. L'évaluation permet de voir si le modèle est capable de reproduire ce qu'on observe sur le site et ainsi de donner de la valeur aux prédictions du modèle. Les expériences de simulation permettent ensuite de mettre en évidence les répercussions du changement climatique sur la forêt de Vielsalm.

3.1 Evaluation

Pour l'évaluation, la démarche consiste à comparer les prédictions du modèle avec les mesures relevées sur le site. Elle a été effectuée pour différents critères relatifs à la phénologie, au cycle de l'eau, au cycle du carbone et à la croissance des arbres. Selon les mesures disponibles pour les différentes variables évaluées, elle a été réalisée sur base de simulations lancées à partir de 2009 avec la petite parcelle et/ou de 2015 avec la grande parcelle.

3.1.1 Phénologie

La phénologie est un aspect intéressant à évaluer car elle détermine l'évolution de l'état du feuillage au cours de l'année. Sur celui-ci reposent toute une série d'autres processus comme la photosynthèse, l'interception des pluies et la transpiration. Les résultats pour la phénologie consistent en des comparaisons entre les observations et les prédictions de dates phénologiques clés entre 2009 et 2014 (pas pour 2010) : le début et la fin du débourrement et de la chute des feuilles. Une première évaluation a été faite avec la paramétrisation par défaut d'HETEROFOR. Au vu des résultats, il a ensuite été choisi d'adopter une calibration spécifique au site de Vielsalm pour la fonction décrivant la phase de débourrement. Commençons par décrire les résultats obtenus avec les paramètres par défaut. En comparant les différentes dates phénologiques prédites et observées tout au long de l'année (Figure 12), on voit que les résultats sont cohérents, les points se situant proches de la droite d'identité. Néanmoins, en regardant plus en détail (voir aussi la Figure 48 en annexe), et à l'aide de comparaisons de moyennes (Tableau 7), on s'aperçoit que les dates de début du débourrement et de début de chute des feuilles sont prédites trop tôt. Sans être significativement différentes, les dates de fin de débourrement prédites et observées montrent la même tendance, tandis que les dates prédites pour la fin de chute des feuilles sont plutôt tardives.

Outre les dates de début et de fin en tant que telles, ce sont surtout les périodes phénologiques, ici le débourrement et la chute des feuilles qui sont intéressantes. En comparant la moyenne pour les différentes années du milieu des périodes phénologiques (Tableau 8), il ressort que le débourrement est prédit presque 10 jours trop tôt. L'écart est environ

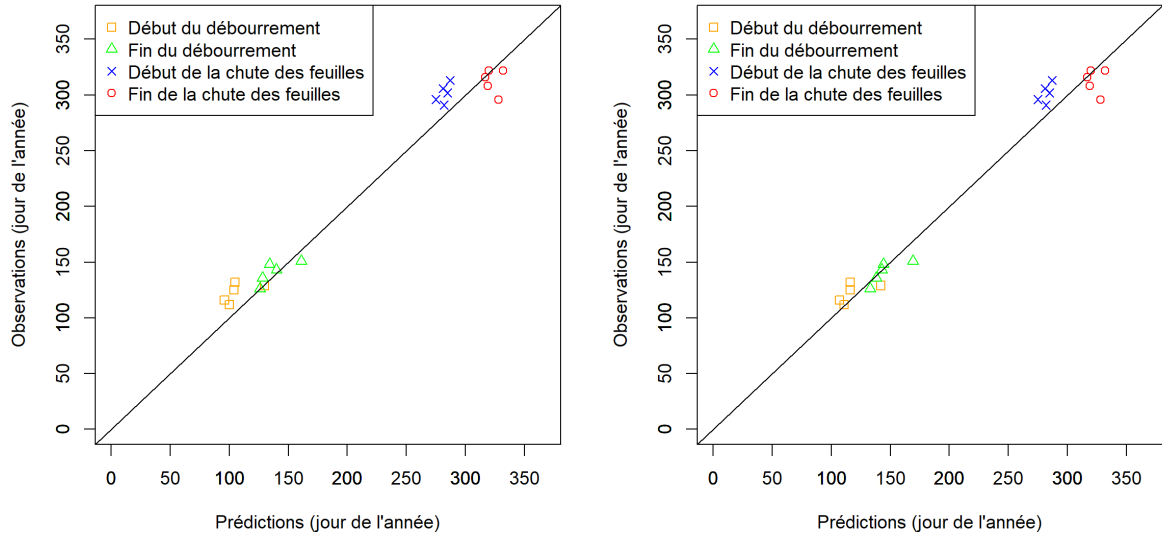


FIGURE 12 – Comparaison des dates phénologiques (début et fin du débournement et de la chute des feuilles) observées et prédites pour le hêtre médian de 2009 à 2014 (sauf 2010, pas d’observations). Les prédictions sont obtenues soit avec une paramétrisation par défaut (à gauche), soit avec une paramétrisation de la fonction décrivant le débournement adaptée au site de Vielsalm (à droite).

deux fois moindre pour la chute des feuilles. De toutes ces observations, on retient que le milieu de la période de débournement prédite est relativement bien centré sur celui des observations, bien que la durée de la période prédite soit plus longue. Concernant la période de débournement prédite, elle est avancée par rapport aux observations. Pour remédier à ce dernier point, les paramètres de la fonction décrivant la phase de débournement ont été calibrés sur base des observations de Vielsalm, permettant de recentrer la période de débournement prédite sur celle qui est observée. Les résultats sont visibles à la Figure 12 et à la Figure 49 en annexe. Les moyennes des dates de début et de fin de débournement prédites ne s’écartent pas significativement des moyennes observées (Tableau 7) et le milieu de la période de débournement prédite coïncide avec le milieu de la période de débournement observée (Tableau 8).

TABLEAU 7 – Comparaison des périodes de débourrement et de chute des feuilles prédites et observées (jour de l'année) et indicateurs de la qualité des prédictions. La période de débourrement est prédite avec deux paramétrisations différentes : par défaut et adaptée au site de Vielsalm.

Période phénologique	Début ou fin	Moyenne des prédictions	Moyenne des observations	p-valeur du test t	RMSE	r
Débourrement	Début	107,0	122,8	0,03078	18,520	0,589
paramétrisation par défaut	Fin	137,8	140,8	0,4975	8,591	0,771
Débourrement	Début	118,4	122,8	0,4248	10,844	0,591
paramétrisation pour Vielsalm	Fin	145,4	140,8	0,2916	8,866	0,796
Chute des feuilles	Début	282,0	301,6	0,003171	20,552	0,593
	Fin	323,2	312,8	0,1557	15,811	-0,101

TABLEAU 8 – Comparaison des milieux des périodes de débourrement et de chute des feuilles prédites et observées (jour de l'année). La période de débourrement est prédite avec deux paramétrisations différentes : par défaut et adaptée au site de Vielsalm.

Période phénologique	Milieu de la période phénologique prédite	Milieu de la période phénologique observée
Débourrement	122,4	131,8
paramétrisation par défaut		
Débourrement	131,9	131,8
paramétrisation pour Vielsalm		
Chute des feuilles	302,6	307,1

3.1.2 Teneur en eau du sol et réserve en eau utile relative

La teneur en eau du sol est une variable assez intégrative pour le cycle de l'eau car elle dépend des différents processus régulant les entrées et sorties d'eau dans le sol tels que les pluvioléssivats, les écoulements de tronc, le prélèvement racinaire et l'évaporation. Les prédictions et les observations peuvent être comparées pour différents horizons. Les teneurs en eau observées sur le site de Vielsalm affichent une variabilité spatiale notable, étant plus élevées sous hêtres que sous douglas. Pour rappel, dans notre modélisation, le sol et sa teneur en eau sont homogénéisés pour l'ensemble du peuplement et cette variabilité spatiale n'a pas été prise en compte. Le plus cohérent semble donc de confronter les valeurs prédites par le modèle à des valeurs moyennant la teneur en eau par horizon dans les différents profils observés. La Figure 13 compare les prédictions de teneur en eau par horizon à des observations moyennes par horizon pour les différentes sondes. La dynamique dans les différents horizons est globalement bonne. Les réapprovisionnements en eau du sol durant l'hiver et les décharges durant l'été s'effectuent correctement dans l'ensemble. Durant l'année 2018, particulièrement sèche, on remarque un plancher auquel la teneur en eau se maintient pendant plusieurs mois dans les horizons AB et BC. Il est probablement dû au paramètre de teneur en eau au point de flétrissement (fourni par horizon dans le fichier "sol"), qui maintient la teneur en eau au-dessus d'un certain seuil. Certains pics marqués se remarquent dans les prédictions de l'horizon AP, notamment durant la deuxième moitié de l'année 2017, alors que les variations semblent moins marquées pour les observations. Dans les horizons les plus profonds (BC et C), l'amplitude de variation des prédictions est plus grande que celle des observations. Les comparaisons entre les prédictions pour l'ensemble du peuplement et les observations de chaque sonde séparément sont aux Figures 50 à 53 en annexe.

La réserve en eau utile relative permet d'avoir une variable intégrative de la teneur en eau dans les différents horizons du sol. Dans la Figure 14, de manière analogue à ce qui est fait pour les teneurs en eau par horizon, les données utilisées comme observations sont des moyennes calculées à partir des teneurs en eau du profil complet sous hêtre et du profil complet sous douglas afin d'intégrer la variabilité spatiale. L'évolution temporelle de la réserve en eau utile relative modélisée est convaincante. Néanmoins, durant les périodes où la réserve en eau utile est la plus faible, les prédictions sont inférieures aux observations. Cela entraîne d'ailleurs un décalage marqué durant la phase de réapprovisionnement en eau de l'hiver 2016-2017.

Les comparaisons entre les prédictions pour l'ensemble du peuplement et les observations du profil complet sous hêtre d'une part et sous douglas d'autre part sont présentées respectivement aux Figures 54 et 55 en annexes.

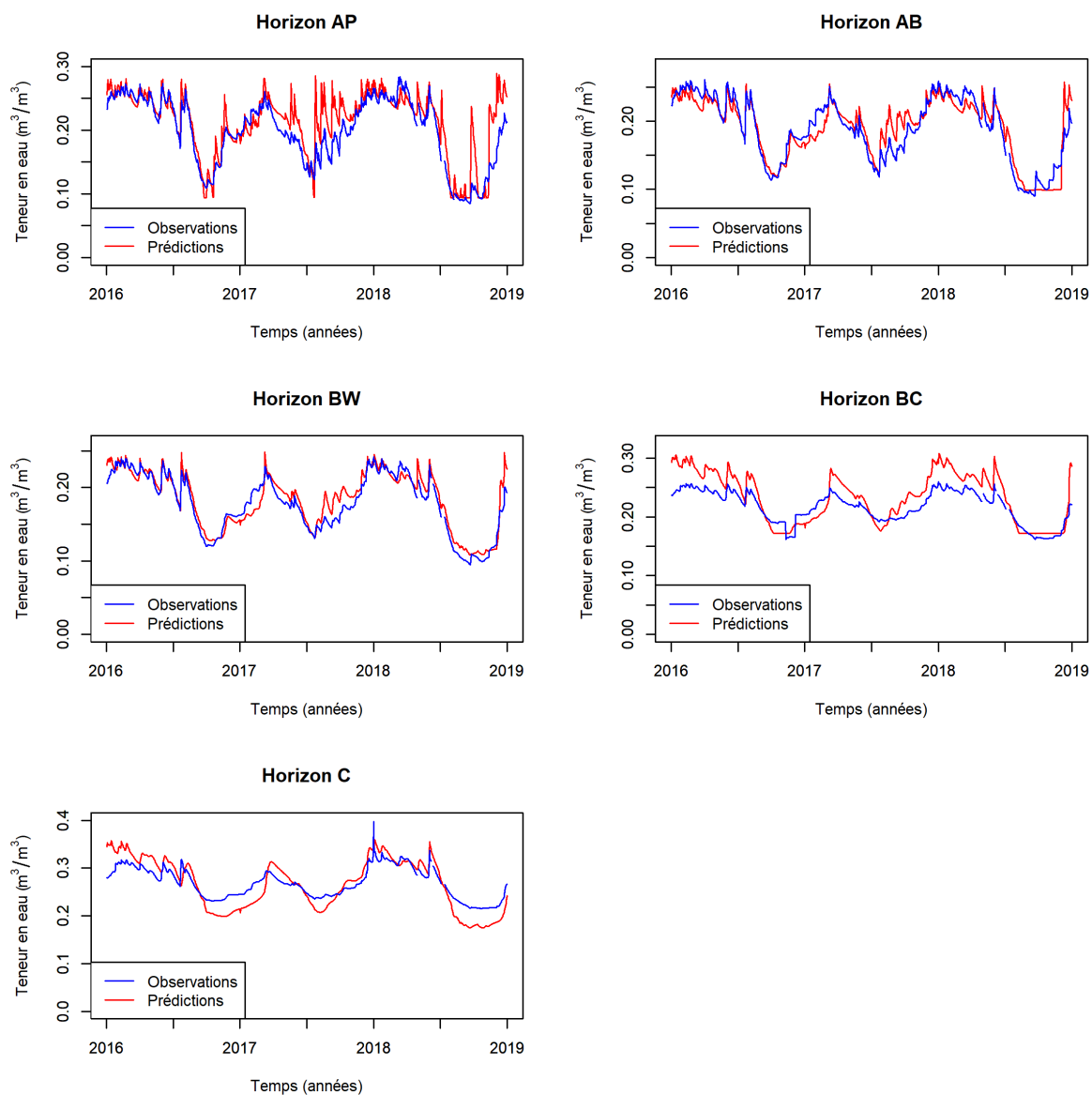


FIGURE 13 – Evolution temporelle de la teneur en eau prédite et observée pour les différents horizons du sol. La teneur en eau observée est calculée sur un pas de temps journalier, à partir des données de quatre sondes (deux sous hêtre et deux sous douglas) pour l'horizon AP, et de deux sondes (une sous hêtre et une sous douglas) pour chacun des horizons AB, BW, BC et C. Il n'y a aucune sonde dans l'horizon O qui dès lors n'a pas été pris en compte dans la comparaison.

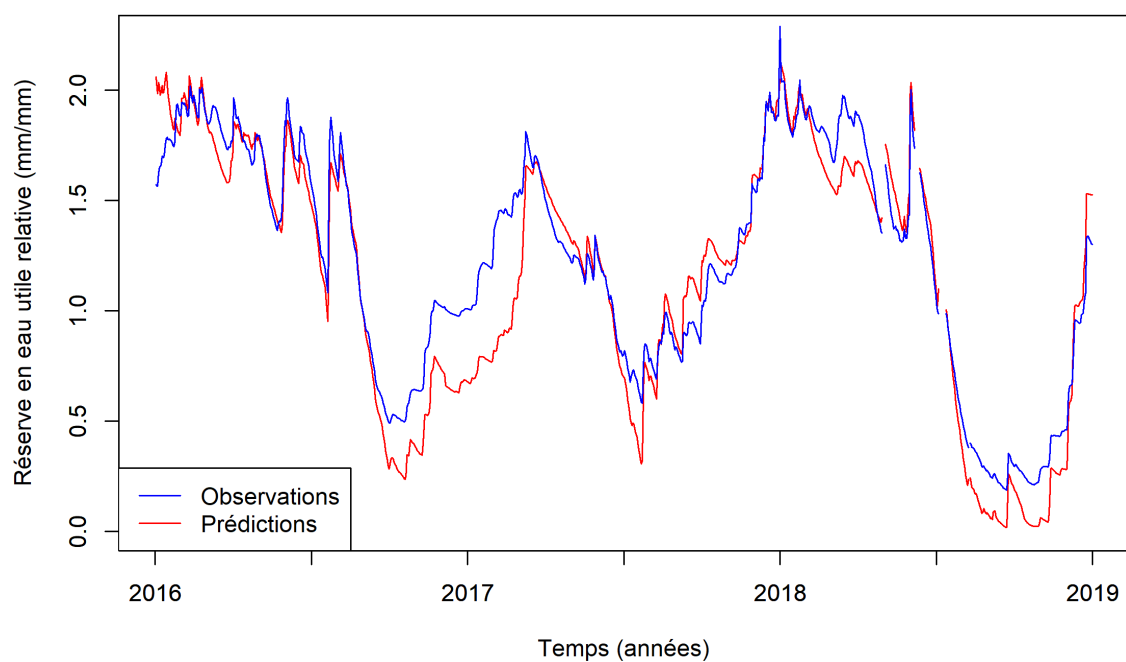


FIGURE 14 – Evolution temporelle de la réserve en eau utile relative ($\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$). La réserve en eau utile relative observée est calculée sur un pas de temps journalier à partir des données de teneurs en eau observées moyennées par horizon dans deux profils, l'un sous hêtre, l'autre sous douglas. (Dans chacun de ces deux profils, les horizons AP, AB, BW, BC et C sont équipés d'une sonde. Il n'y a aucune sonde dans l'horizon O qui dès lors n'a pas été pris en compte dans la comparaison.)

3.1.3 Pluviolessivats

Au niveau de la canopée, les précipitations sont partitionnées en plusieurs composantes : pluviolessivats, écoulements de tronc et évaporation. Parmi elles, les pluviolessivats ont pu être directement évalués grâce aux mesures du site. Les pluviolessivats prédits et observés ont été comparés à l'aide d'une régression orthogonale. Comme le montre la Figure 15, la droite 1 : 1 (en ligne continue) est pleinement comprise dans l'intervalle de confiance de la régression (ligne pointillée), ce qui dénote une bonne correspondance entre prédictions et observations. L'intercept vaut 1,992 (-3,206 ; 7,190) et la pente 1,009 (0,881 ; 1,138), les nombres entre parenthèses indiquant les limites de l'intervalle de confiance à 95%. La corrélation de Pearson vaut 0,944 et le RMSE est de 9,897 mm. La moyenne des observations est de 30,62 mm et celle des prédictions est de 28,36 mm d'eau par période de relevés. Ces deux valeurs, comparées au moyen d'un test t, ne sont pas jugées significativement différentes l'une de l'autre (p-valeur = 0,1953).

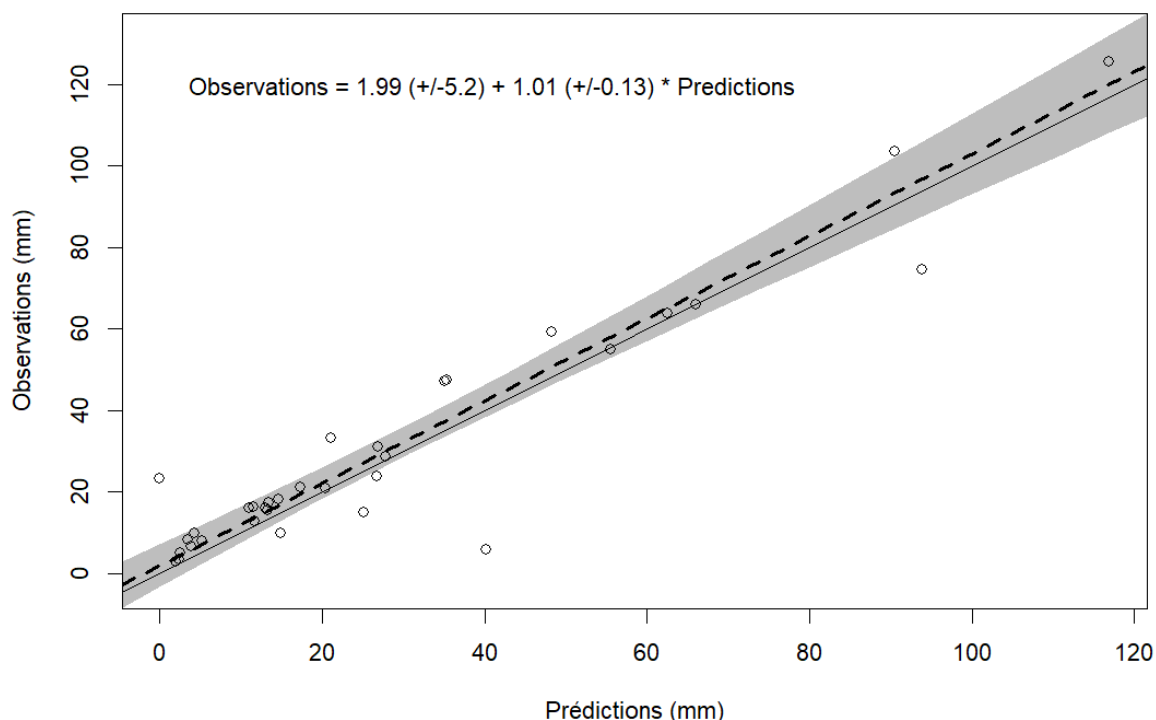


FIGURE 15 – Comparaison des pluviolessivats prédits et observés à l'aide d'une régression orthogonale. La droite de régression est représentée en trait tireté avec son intervalle de confiance en grisé et est à comparer avec la droite 1 : 1. Les pluviolessivats concernent l'ensemble du peuplement sur une période variant de 7 à 68 jours (généralement d'environ deux semaines) durant les années 2010 (entre mars et novembre), 2011 (entre mars et octobre) et 2019 (entre mai et août). L'intervalle de confiance est représenté pour $\alpha = 0,05$.

3.1.4 Transpiration individuelle

La transpiration est une composante de l'évapotranspiration. Les différentes composantes de l'évapotranspiration n'étant pas dissociées dans les mesures prises par eddy covariance, ces dernières n'ont pas pu être utilisées pour valider la transpiration des arbres. En revanche, la transpiration, calculée individuellement pour chaque arbre par HETEROFOR, a pu être validée pour certains arbres grâce à des mesures issues de capteurs de flux de sève. Après avoir calibré notamment le paramètre de régulation stomatique en tenant compte entre autres des observations de transpiration individuelle, cette dernière semble bien prédite par le modèle. Les comparaisons entre prédictions et observations à l'échelle mensuelle et journalière, réalisées au moyen de régressions orthogonales montrent que, pour les 3 espèces évaluées, les droites 1 : 1 sont comprises dans l'intervalle de confiance des droites de régression ou en sont proches (Figures 16 et 17). Les tests de régression (Tableau 9) montrent que 0 est compris dans l'intervalle de confiance de l'intercept et 1 est compris dans l'intervalle de confiance de la pente des régressions orthogonales effectuées au niveau d'agrégation mensuel. Au niveau journalier, l'intercept pour le hêtre et pour le sapin pectiné, ainsi que la pente pour le sapin pectiné et le douglas ne s'écartent que faiblement de la valeur idéale (0 pour les intercepts et 1 pour les pentes).

TABLEAU 9 – Ajustement des régressions orthogonales montrées aux Figures 16 et 17. Les valeurs des intercepts et des pentes sont données ainsi que leurs intervalles de confiance.

Espèce	Pas de temps	Intercept	Pente
Hêtre	mensuel	0,271 (-0,530 ; 1,072)	1,073 (0,889 ; 1,257)
Sapin	mensuel	0,113 (-0,273 ; 0,499)	0,900 (0,557 ; 1,223)
Douglas	mensuel	-0,532 (-1,324 ; 0,260)	1,138 (0,882 ; 1,394)
Hêtre, sapin, douglas	mensuel	-0,272 (-0,620 ; 0,076)	1,123 (1,015 ; 1,231)
Hêtre	journalier	0,584 (0,406 ; 0,762)	0,969 (0,937 ; 1,002)
Sapin	journalier	0,145 (0,069 ; 0,222)	0,869 (0,815 ; 0,923)
Douglas	journalier	0,034 (-0,111 ; 0,178)	0,924 (0,886 ; 0,962)
Hêtre, sapin, douglas	journalier	0,047 (-0,034 ; 0,128)	0,985 (0,965 ; 1,005)

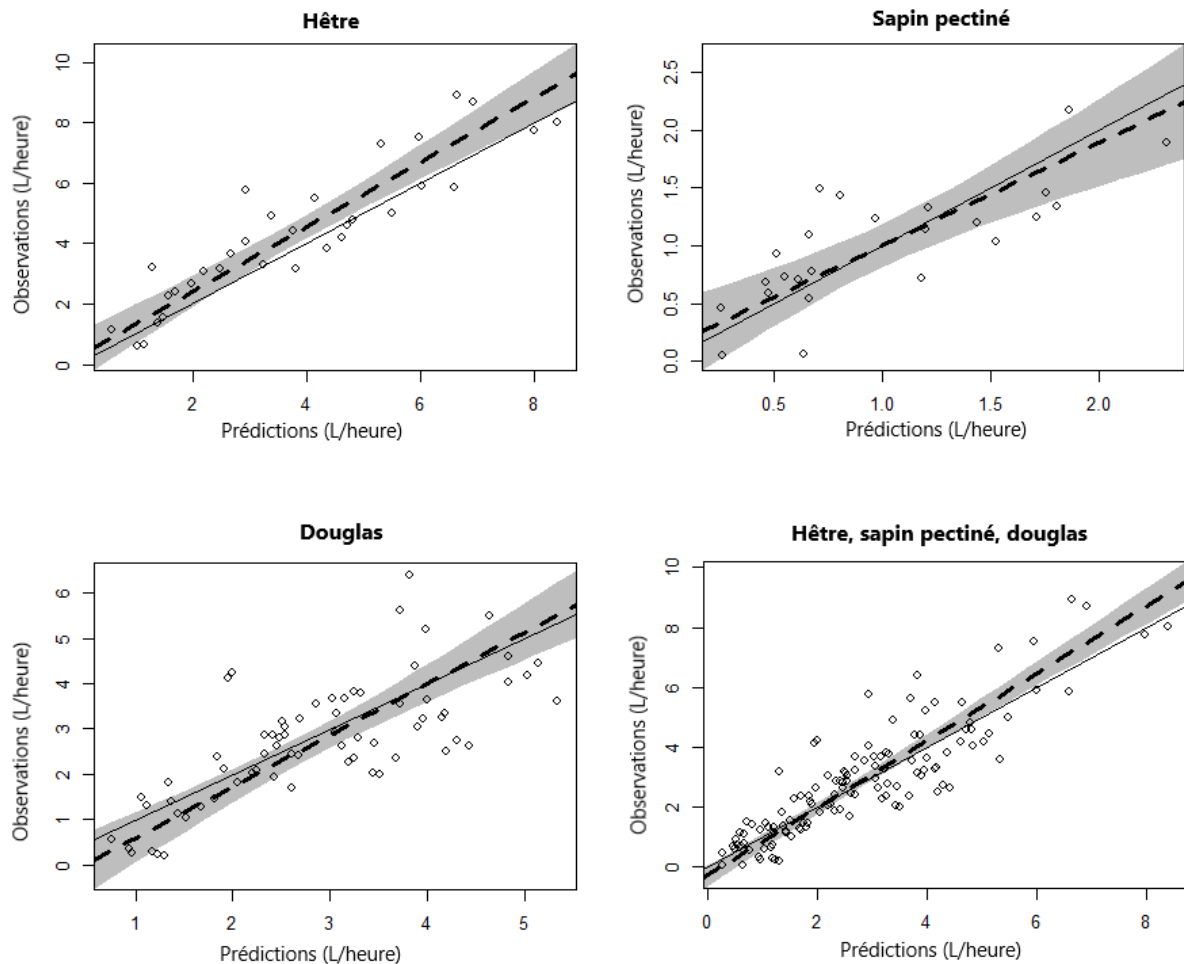


FIGURE 16 – Comparaisons des prédictions et des observations de transpiration individuelle des arbres agrégée à l'échelle mensuelle à l'aide d'une régression orthogonale pour des hêtres (arbres 70, 142, 146), des sapins (arbres 9, 123) et des douglas (arbres 25, 27, 36, 49, 57, 63). La droite de régression est représentée en trait tireté avec son intervalle de confiance en grisé et est à comparer avec la droite 1 : 1. Le dernier graphique rassemble les données des trois espèces.

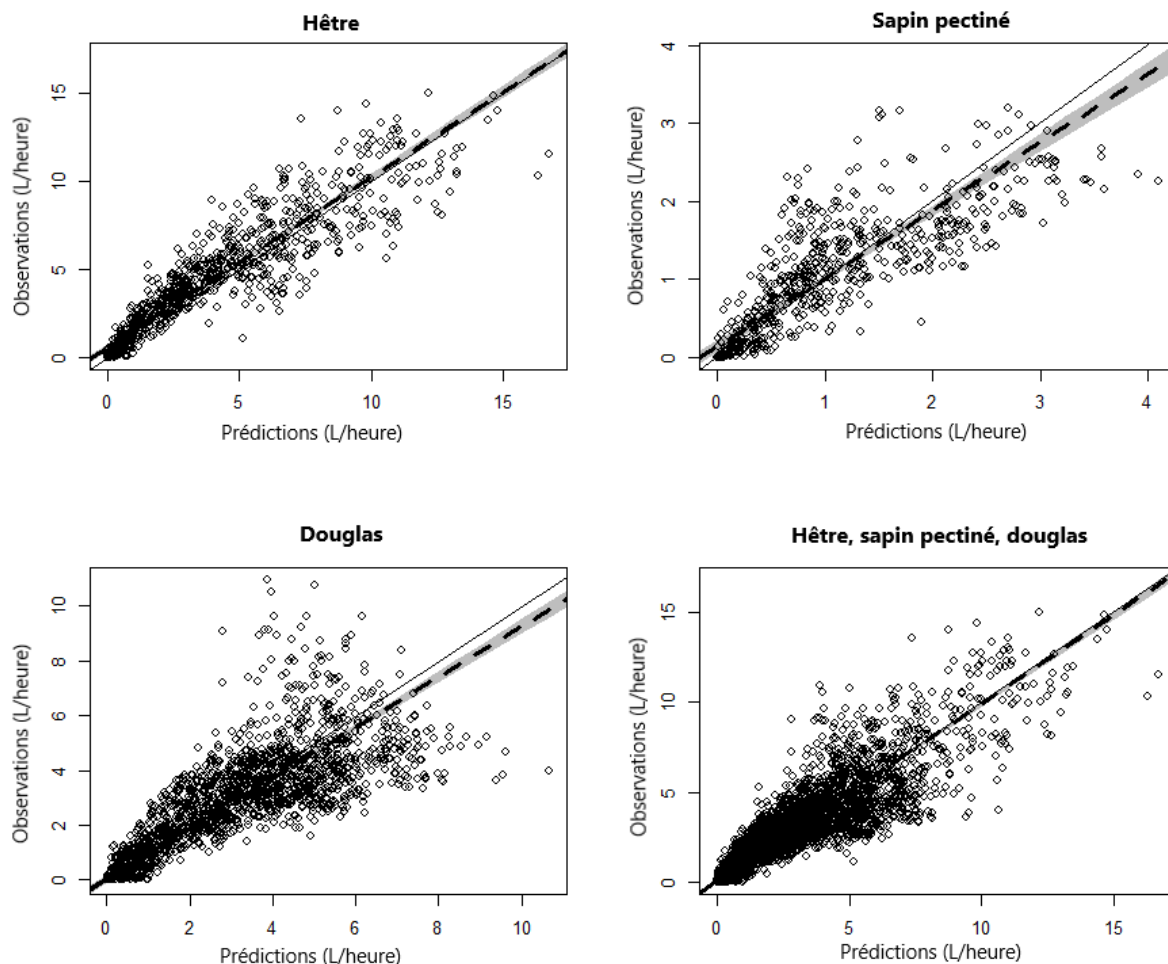


FIGURE 17 – Comparaisons des prédictions et des observations de transpiration individuelle des arbres agrégée à l'échelle journalière à l'aide d'une régression orthogonale pour des hêtres (arbre 70, 142, 146), des sapins (arbres 9, 123) et des douglas (arbres 25, 27, 36, 49, 57, 63). La droite de régression est représentée en trait tireté avec son intervalle de confiance en grisé et est à comparer avec la droite 1 : 1. Le dernier graphique rassemble les données des trois espèces.

3.1.5 Evapotranspiration

L'évapotranspiration est plus intégrative que la transpiration individuelle, puisqu'elle comprend la transpiration des arbres et du sous-étage, l'évaporation du sol et l'interception. De plus, elle est évaluée à l'échelle de la parcelle. Les résultats des régressions orthogonales comparant les observations et les prédictions d'évapotranspiration pour la petite et la grande parcelle sont résumés dans le Tableau 10. La Figure 18 présente les niveaux d'agrégation mensuels et journaliers. Les régressions sur les données au pas de temps horaire sont montrées en annexe à la Figure 56.

Pour les deux tailles de parcelles, la corrélation entre les prédictions et les observations est élevée au pas de temps mensuel (de l'ordre de 0,9) et nettement plus faible pour les pas de temps journalier et horaire (entre 0,5 et 0,6). Cela est d'ailleurs visible sur les graphiques où la dispersion des nuages de points est plus importante dans ces derniers cas.

Quels que soient la parcelle et le pas de temps, la dynamique temporelle est bien reproduite. La dynamique saisonnière est respectée, avec le pic d'évapotranspiration se produisant en été. A l'échelle intra-journalière, il est atteint en début d'après-midi, ce qui correspond aux observations. En revanche, la moyenne des prédictions ne peut être considérée comme égale à la moyenne des observations selon les résultats des tests t. Cela s'explique notamment par le nombre élevé de données qui implique des tests avec une forte puissance statistique et qui détectent donc facilement de faibles différences. Mais les valeurs d'évapotranspiration moyenne sont systématiquement plus élevées pour les prédictions que pour les observations. Visuellement, on remarque que les régressions sont meilleures pour la petite parcelle que pour la grande. Dans le cas de cette dernière, les prédictions semblent surestimées. Un biais est visible pour les données agrégées à l'échelle mensuelle, tandis que c'est plutôt la pente qui fait défaut à l'échelle journalière.

Cette surestimation se remarque aussi à la Figure 20, principalement durant la seconde moitié des années 2016 et 2017. Néanmoins, cette différence avec la petite parcelle s'explique peut-être plus par la période de validation que par le choix de la parcelle. En effet, durant ces deux années, les résultats pour la petite parcelle (Figure 19) affichent le même genre de tendances malgré qu'elles soient un peu moins prononcées.

L'analyse de la dynamique journalière (Figure 21) pour une année moyenne révèle également cette surestimation durant la majeure partie de l'année pour la grande parcelle. Une surestimation est également bien visible à la fin de l'année pour la petite parcelle.

En regardant l'évolution heure par heure de l'évapotranspiration moyenne au cours des différents mois de l'année (Figures 22 et 23), on s'aperçoit que durant la nuit les observations sont très proches de zéro et peuvent même être un peu inférieures. Les prédictions, bien que logiquement assez faibles, sont donc systématiquement plus élevées. En revanche, lors du pic d'évapotranspiration se produisant au début de l'après-midi, les

observations ont tendance à être plus élevées que les prédictions, particulièrement dans le cas de la petite parcelle. Cet effet se remarque plus clairement au mois d'avril, durant lequel débute le débourrement des hêtres.

Les évolutions temporelles de l'évapotranspiration journalière et horaire (par mois) pour les différentes parcelles pour chaque année individuellement sont reportés en annexe aux Figures 57 à 80.

TABLEAU 10 – Comparaison de l'évapotranspiration prédite et observée sur base d'un test t, d'un test de régression orthogonale (les intercepts et pentes sont accompagnés de leurs intervalles de confiance entre parenthèses), du RMSE et de la corrélation de Pearson. La période utilisée pour la petite parcelle s'étend de 2010 à 2018. Pour la grande parcelle, elle s'étend de 2016 à 2018.

Parcelle	Pas de temps et unités	Moyenne des prédictions	Moyenne des observations	p-valeur du test t	Intercept	Pente	RMSE	r
Petite parcelle	mensuel (mm/mois)	38,181	32,615	<0.001	-11,773 (-16,985 ; -6,561)	1,163 (1,046 ; 1,279)	13,593	0,888
	journalier (mm/jour)	1,31002	1,10079	<0.001	-0,244 (-0,338 ; -0,150)	1,026 (0,971 ; 1,082)	1,033	0,562
	horaire (mm/heure)	0,0523867	0,05069772	<0.001	-0,000237 (-0,001563 ; 0,001088)	0,972 (0,960 ; 0,985)	0,0876	0,561
Grande parcelle	mensuel (mm/mois)	46,135	30,354	<0.001	-13,831 (-22,175 ; -5,487)	0,958 (0,802 ; 1,113)	19,592	0,906
	journalier (mm/jour)	1,514156	0,9806898	<0.001	-0,275 (-0,436 ; -0,114)	0,830 (0,749 ; 0,910)	1,275	0,531
	horaire (mm/heure)	0,05833231	0,04662134	<0.001	0,000101 (-0,002279 ; 0,002480)	0,798 (0,778 ; 0,817)	0,0985	0,534

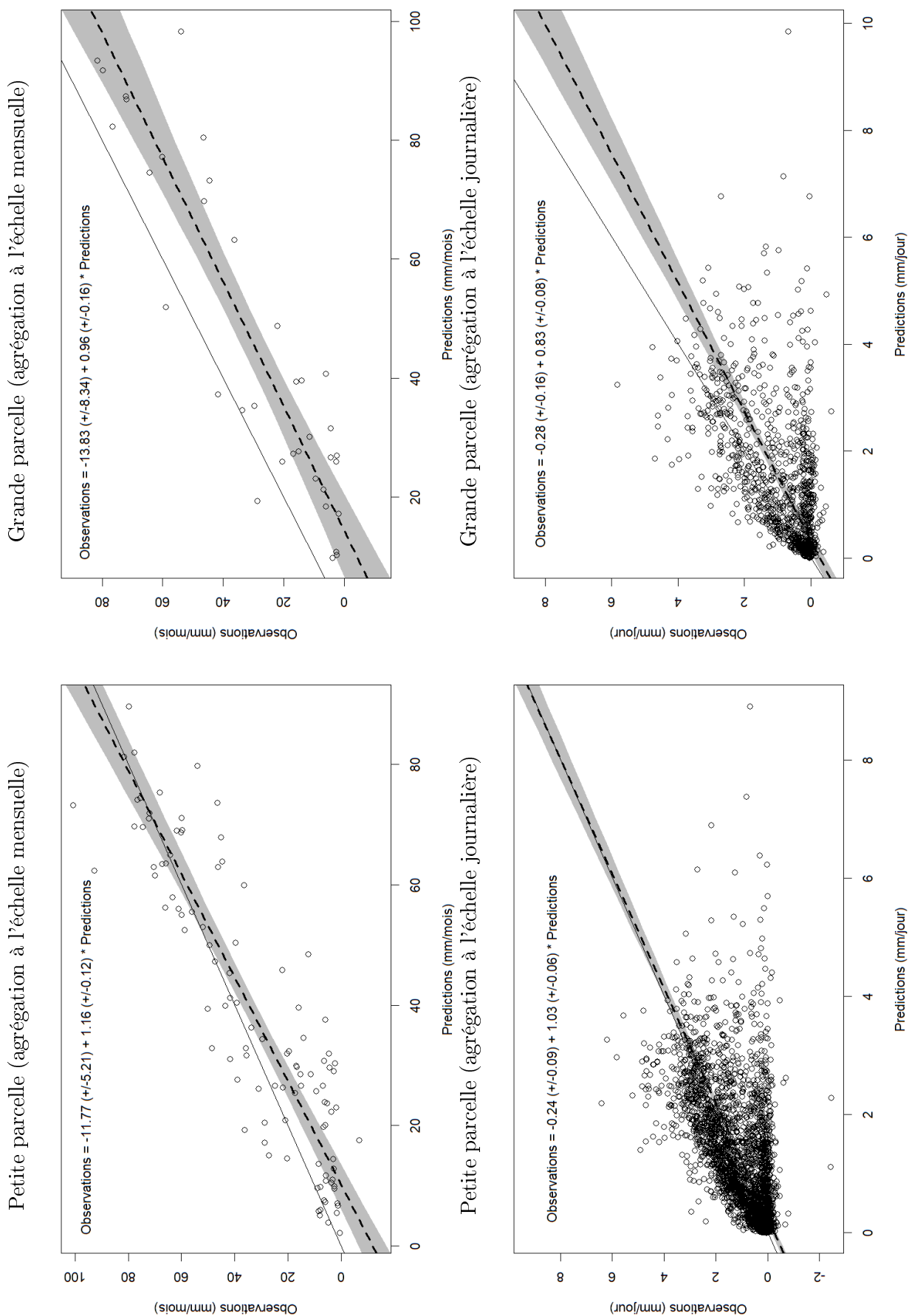


FIGURE 18 – Comparaisons des prédictions et des observations d'évapotranspiration agrégées aux échelles mensuelle et journalière à l'aide d'une régression orthogonale pour la petite parcelle (de 2010 à 2018) et pour la grande parcelle (de 2016 à 2018). La droite de régression est représentée en trait tiré avec son intervalle de confiance en gris et est à comparer avec la droite 1 : 1.

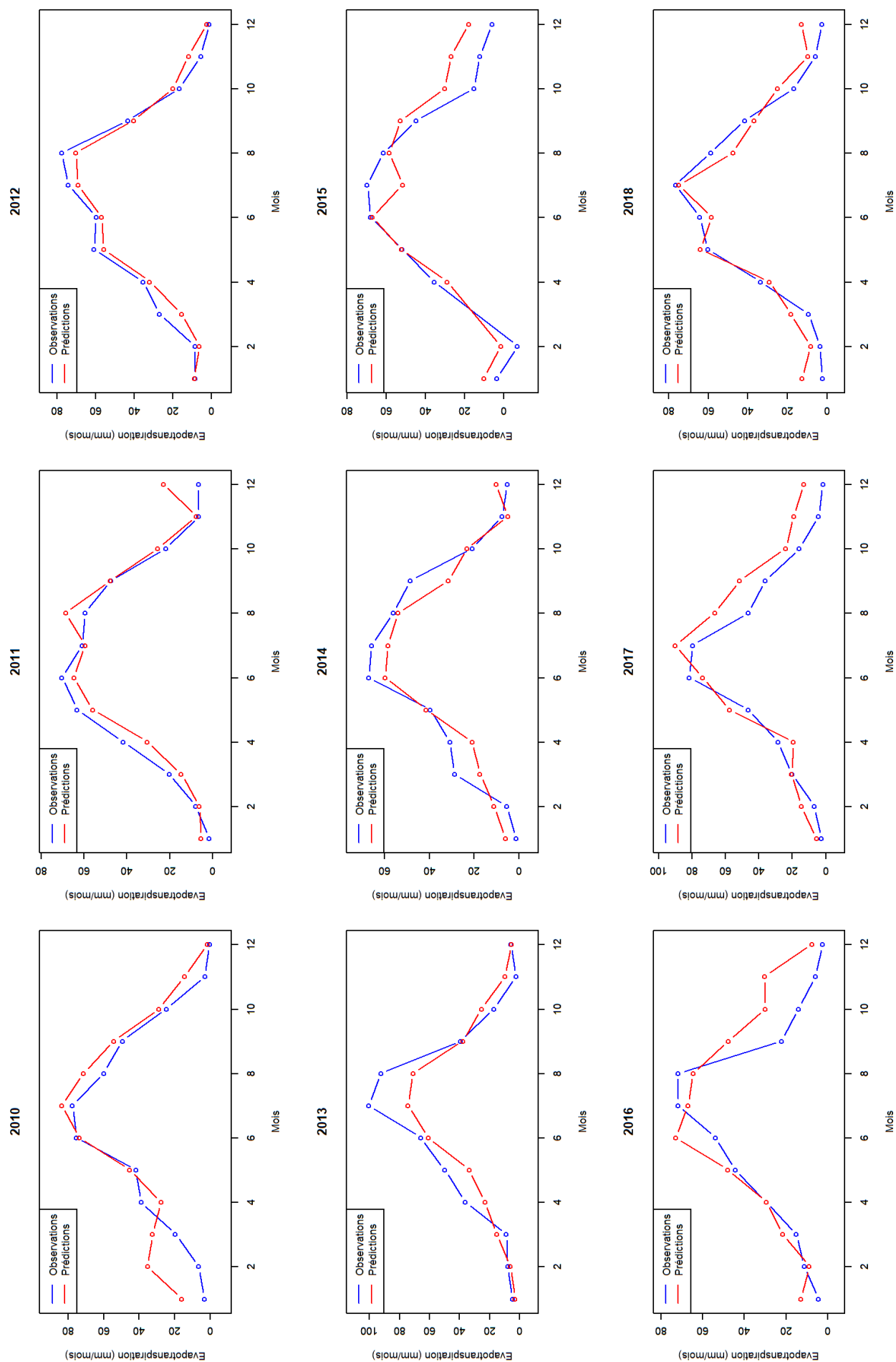


FIGURE 19 – Evolution mois par mois de l'évapotranspiration moyenne de la petite parcelle pour différentes années.

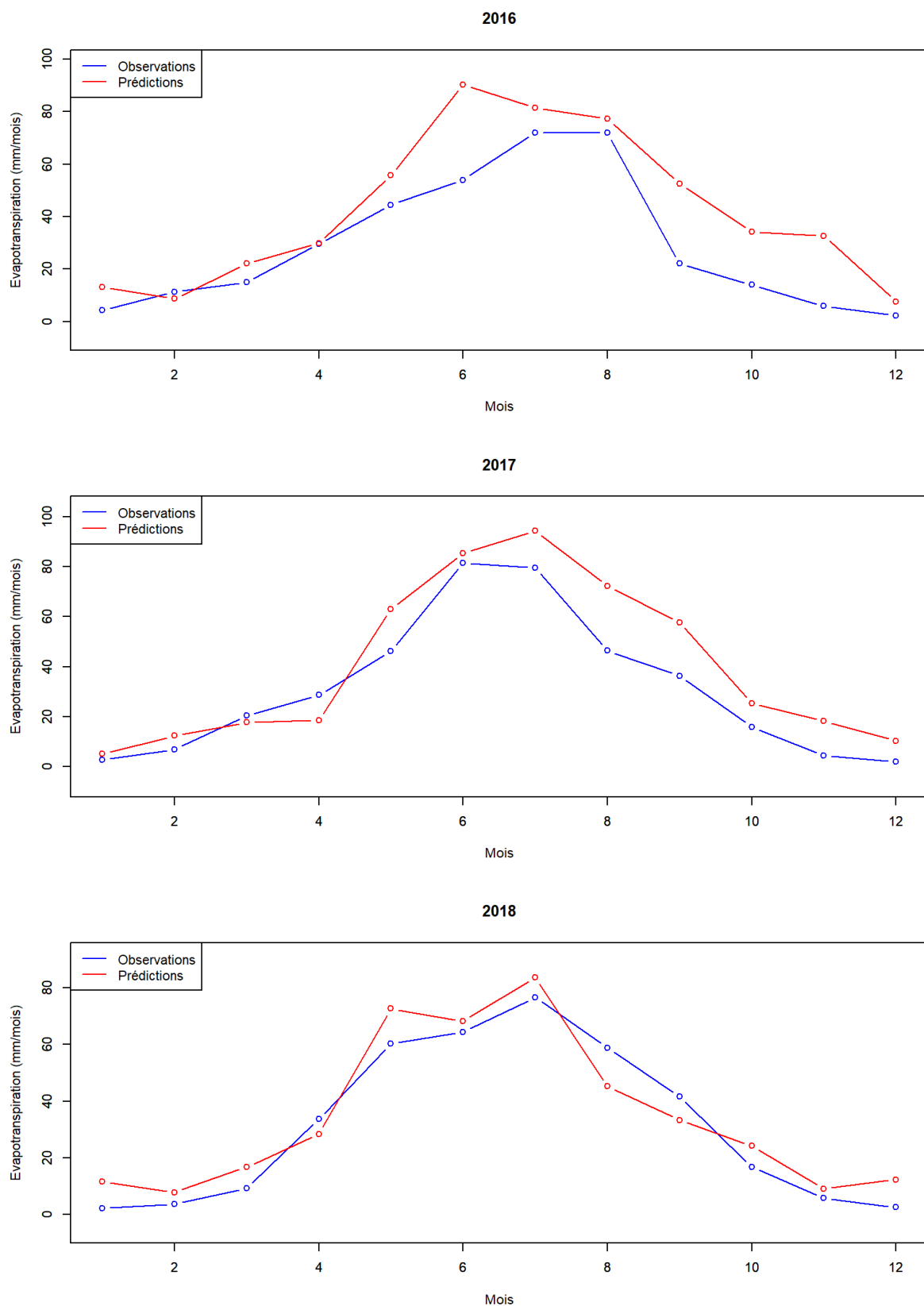


FIGURE 20 – Evolution mois par mois de l'évapotranspiration moyenne de la grande parcelle pour différentes années.

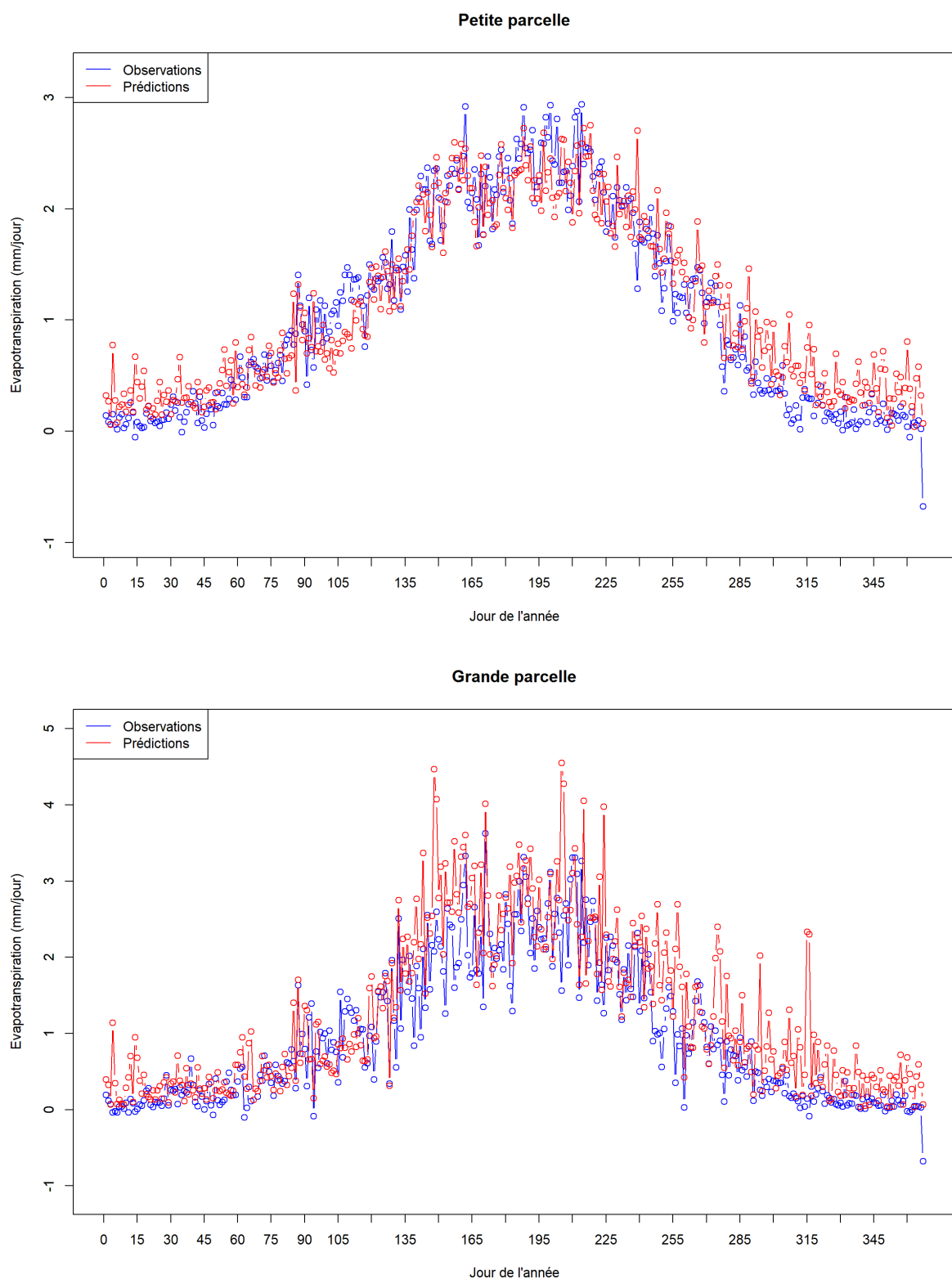


FIGURE 21 – Evolution jour par jour de l'évapotranspiration sur une année moyenne pour la petite parcelle (de 2010 à 2018) et pour de la grande parcelle (de 2010 à 2018).

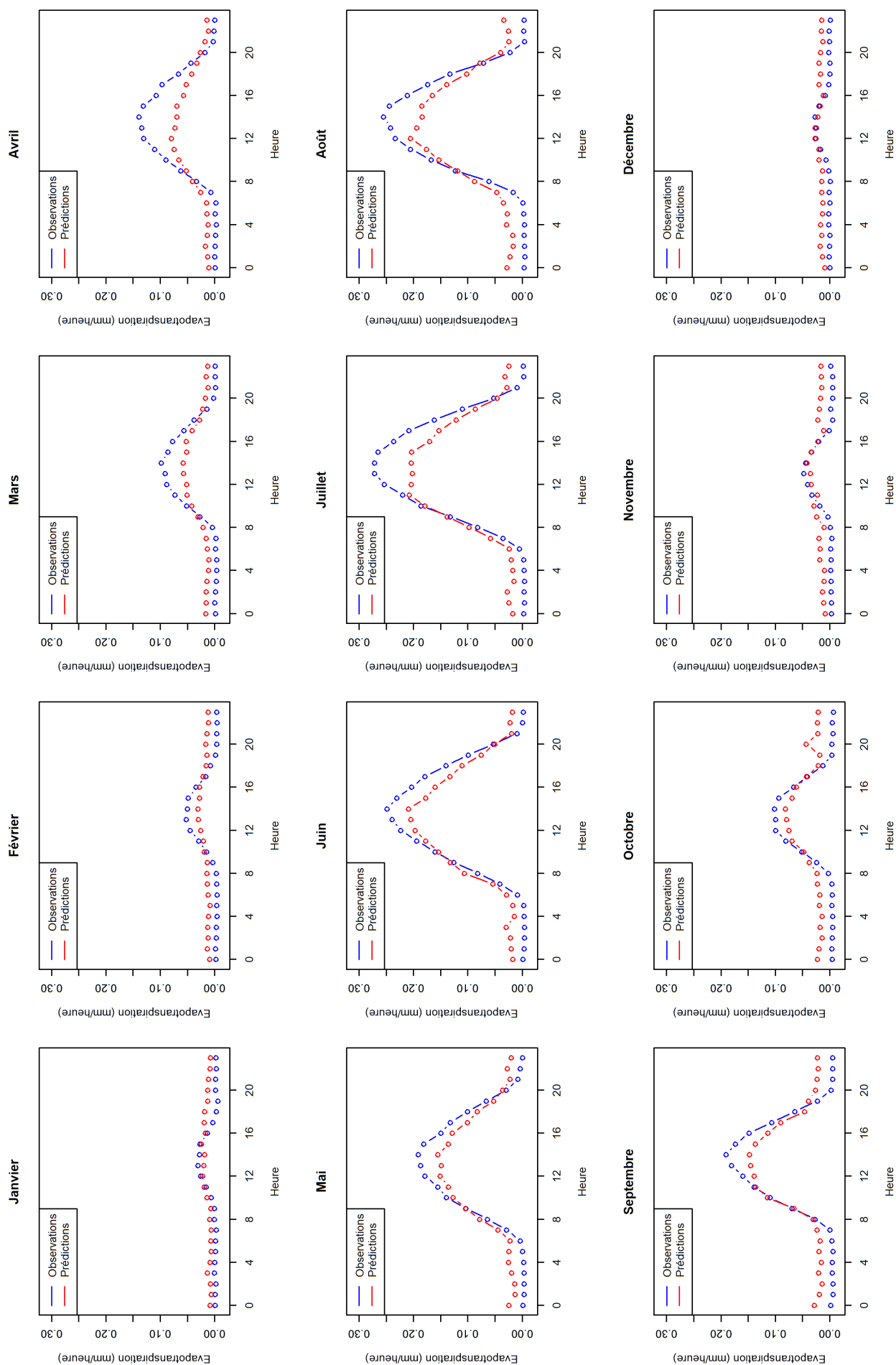


FIGURE 22 – Evolution heure par heure de l'évapotranspiration de la petite parcelle pour les différents mois d'une année moyenne (de 2010 à 2018).

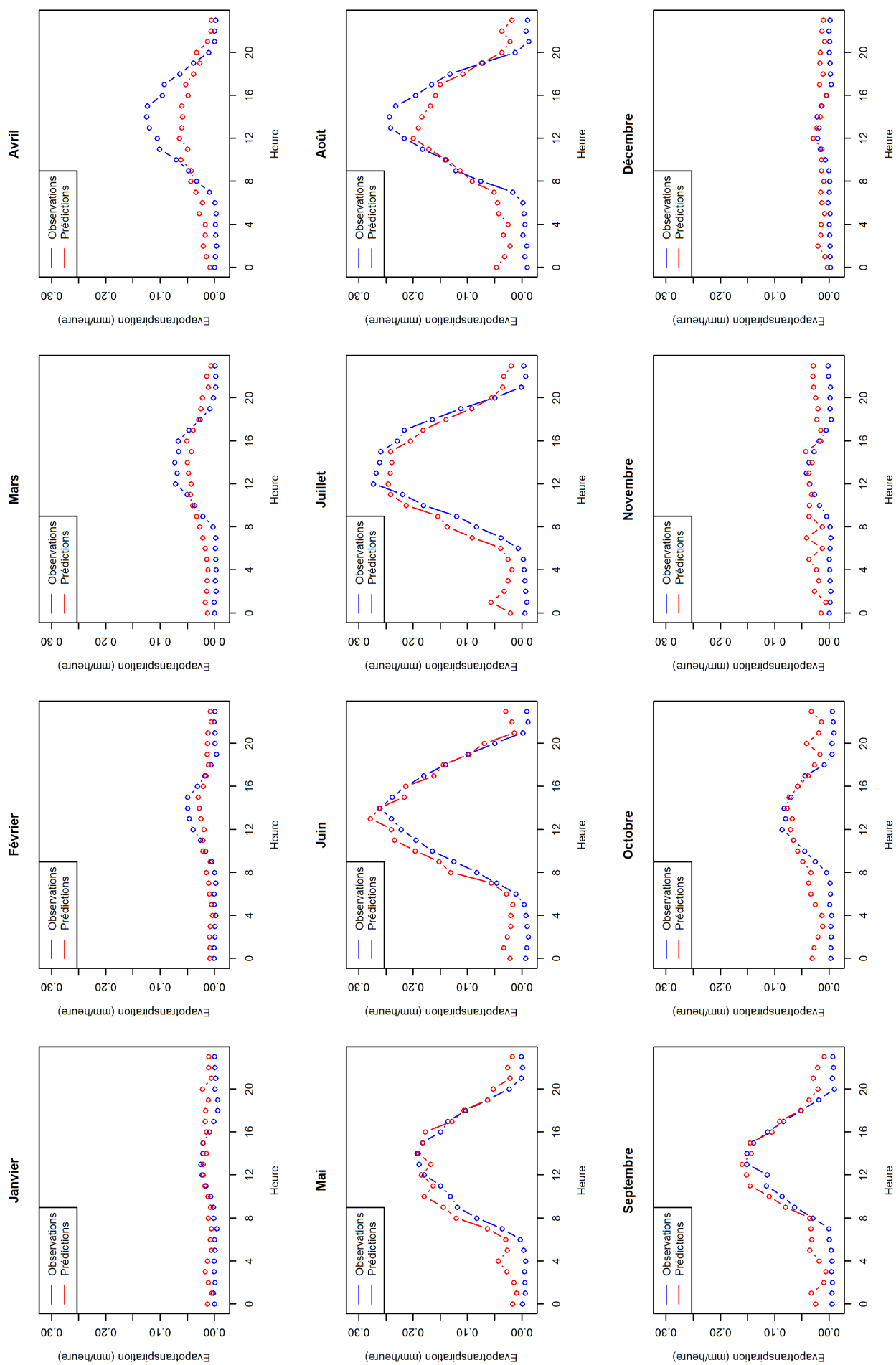


FIGURE 23 – Evolution heure par heure de l'évapotranspiration de la grande parcelle pour les différents mois d'une année moyenne (de 2010 à 2018).

3.1.6 Production primaire brute

La production primaire brute est une variable informative sur le produit de la photosynthèse. La PPB prédite a été comparée à celle observée pour les différentes parcelles et les différents secteurs et aux différents pas de temps au moyen de régressions orthogonales (Tableau 11). Les Figures 24 et 25 affichent respectivement les régressions obtenues pour la petite et la grande parcelle, ainsi que pour leurs secteurs associés au pas de temps journalier (voir Figures 81 à 84 en annexe pour les pas de temps mensuel et horaire). Malgré le grand nombre de données, le test t de comparaison de moyennes ne met pas de différence significative en évidence entre les prédictions et les observations de PPB lorsqu'on considère les parcelles dans leur entièreté au pas de temps mensuel. Dans les autres cas de figures, la moyenne des prédictions ne peut pas être considérée égale à la moyenne des observations mais ce n'est pas alarmant. Les tests de régression sur la pente et l'intercept sont tantôt significatifs, tantôt non-significatifs. Visuellement, la correspondance entre prédictions et observations est bonne. Les résultats du petit secteur douglas paraissent cependant moins bons que pour les autres secteurs. Pour chacun des secteurs et chacune des parcelles, les corrélations sont élevées. Elles prennent des valeurs comprises entre 0,797 et 0,975, quel que soit le pas de temps. La dispersion des nuages de points autour des droites de régression est d'ailleurs assez faible.

L'évolution au cours d'une année moyenne (pas de temps mensuel), présentée à la Figure 26, est bonne pour la petite et la grande parcelle dans leur entièreté. Elle l'est également lorsqu'on ne considère que les secteurs hêtre. On remarque néanmoins un écart plus important au mois d'avril, durant lequel les prédictions sont inférieures aux observations. Cet écart est également visible à la Figure 27 présentant l'évolution journalière de la PPB au cours d'une année moyenne pour les secteurs hêtre. Il est aussi mis en évidence aux Figures 31 et 34 sur lesquelles on peut voir que les pics journaliers de PPB au mois d'avril (et déjà mars dans une moindre mesure) sont sensiblement plus bas pour les prédictions que pour les observations, alors qu'ils sont correctement reproduits pour les autres mois de l'année.

Concernant le petit secteur douglas, la dynamique n'est pas mauvaise mais la PPB est surestimée tout au long de l'année (Figures 26, 28 et 32). Pour le grand secteur douglas (Figures 26, 28 et 35), les résultats sont très bons de juin à octobre. En novembre, un écart commence à se former, puis se maintient plusieurs mois.

Le grand secteur mixte présente des résultats semblables à ceux des parcelles dans leur entièreté. Pour le grand secteur mixte, on remarque cependant un petit écart durant le mois d'avril analogue à celui mis en évidence pour les secteurs hêtre durant le mois d'avril, bien que moins prononcé (Figures 26, 29 et 36).

Durant les premiers mois de l'année, la PPB prédite pour les parcelles entières est légèrement plus élevée que celle que l'on observe alors que pendant le pic d'été, les obser-

ventions dépassent les prédictions (Figures 26 , 30, 33 et 37). Malgré ces petites différences, les prédictions de PPB paraissent très convaincantes dans leur globalité.

Les évolutions temporelles de la PPB moyenne mensuelle, journalière et horaire (par mois) pour les différents secteurs et parcelles pour chaque année individuellement sont reportés en annexe aux Figures 85 à 169.

TABLEAU 11 – Comparaison de la PPB prédite et observée ($\text{gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) sur base d'un test t, d'un test de régression (les intercepts et pentes sont accompagnés de leurs intervalles de confiance entre parenthèses), du RMSE et de la corrélation de Pearson. La période utilisée pour les petits secteurs et la petite parcelle s'étend de 2010 à 2018. Pour la grande parcelle et les grands secteurs, elle s'étend de 2016 à 2018. Pour un même secteur ou une même parcelle, les valeurs moyennes obtenues pour les différents pas de temps sont différentes les unes des autres car les jeux de données ne sont pas continus sur la période considérée (présence de trous dans les données horaires, qui se répercutent aussi sur les moyennes journalières et mensuelles).

Secteur/ parcelle	Pas de temps	Moyenne des prédictions	Moyenne des observations	p-valeur du test t	Intercept	Pente	RMSE	r
Petit secteur	mensuel	1969,433	2196,798	<0,001	221,306 (85,718 ; 356,895)	1,003 (0,952 ; 1,054)	505,220	0,969
	journalier	2055,472	2215,894	<0,001	52,761 (-27,113 ; 132,635)	1,052 (1,028 ; 1,077)	1174,848	0,898
	horaire	2150,312	2404,006	<0,001	37,059 (-0,369 ; 74,489)	1,101 (1,091 ; 1,111)	1484,502	0,901
Petit secteur	mensuel	1910,445	1293,120	<0,001	-606,773 (-911,334 ; -302,212)	0,994 (0,854 ; 1,135)	875,540	0,811
	journalier	1676,057	1144,348	<0,001	-196,438 (-287,471 ; -105,406)	0,800 (0,766 ; 0,834)	1382,831	0,797
	horaire	2123,677	1360,905	<0,001	-179,544 (-222,332 ; -136,755)	0,725 (0,715 ; 0,736)	2103,883	0,836
Petite parcelle	mensuel	1962,336	2011,189	0,225	-296,519 (-439,800 ; -153,238)	1,176 (1,114 ; 1,238)	401,108	0,967
	journalier	1914,916	1968,313	<0,001	-267,544 (-310,781 ; -224,307)	1,168 (1,149 ; 1,186)	662,346	0,911
	horaire	2012,482	2082,587	<0,001	-78,711 (-91,697 ; -65,725)	1,074 (1,070 ; 1,078)	1291,441	0,906
Grand secteur	mensuel	1719,143	1833,628	0,03895	118,501 (-58,460 ; 295,462)	0,998 (0,918 ; 1,077)	335,844	0,975
	journalier	1730,508	1844,82	<0,001	34,563 (-31,874 ; 101,000)	1,046 (1,020 ; 1,072)	696,684	0,936
	horaire	1885,640	2005,166	<0,001	15,631 (-11,936 ; 43,198)	1,055 (1,047 ; 1,063)	1194,802	0,918
Grand secteur	mensuel	2142,212	1775,128	<0,001	-576,841 (-1075,724 ; -77,957)	1,098 (0,891 ; 1,305)	683,81	0,879
	journalier	1857,61	1521,449	<0,001	-342,115 (-476,316 ; -207,913)	1,003 (0,951 ; 1,056)	1040,741	0,845
	horaire	2357,724	1955,989	<0,001	-334,936 (-394,482 ; -275,390)	0,972 (0,957 ; 0,987)	1742,747	0,853
Grand secteur	mensuel	1721,410	1921,177	0,006521	12,732 (-231,394 ; 256,858)	1,109 (0,995 ; 1,223)	454,731	0,959
	journalier	1355,527	1546,187	<0,001	-34,787 (-133,940 ; 64,366)	1,166 (1,121 ; 1,212)	855,235	0,907
	horaire	1650,346	1840,239	<0,001	-21,216 (-64,064 ; 21,632)	1,128 (1,113 ; 1,143)	1103,71	0,918
Grande parcelle	mensuel	1778,575	1847,03	0,260	-186,072 (-403,274 ; 31,129)	1,143 (1,041 ; 1,245)	360,061	0,969
	journalier	1746,249	1815,044	<0,001	-174,754 (-237,504 ; -112,005)	1,139 (1,111 ; 1,168)	584,162	0,921
	horaire	1880,334	1960,604	<0,001	-152,898 (-175,039 ; -130,757)	1,124 (1,117 ; 1,131)	1253,221	0,907

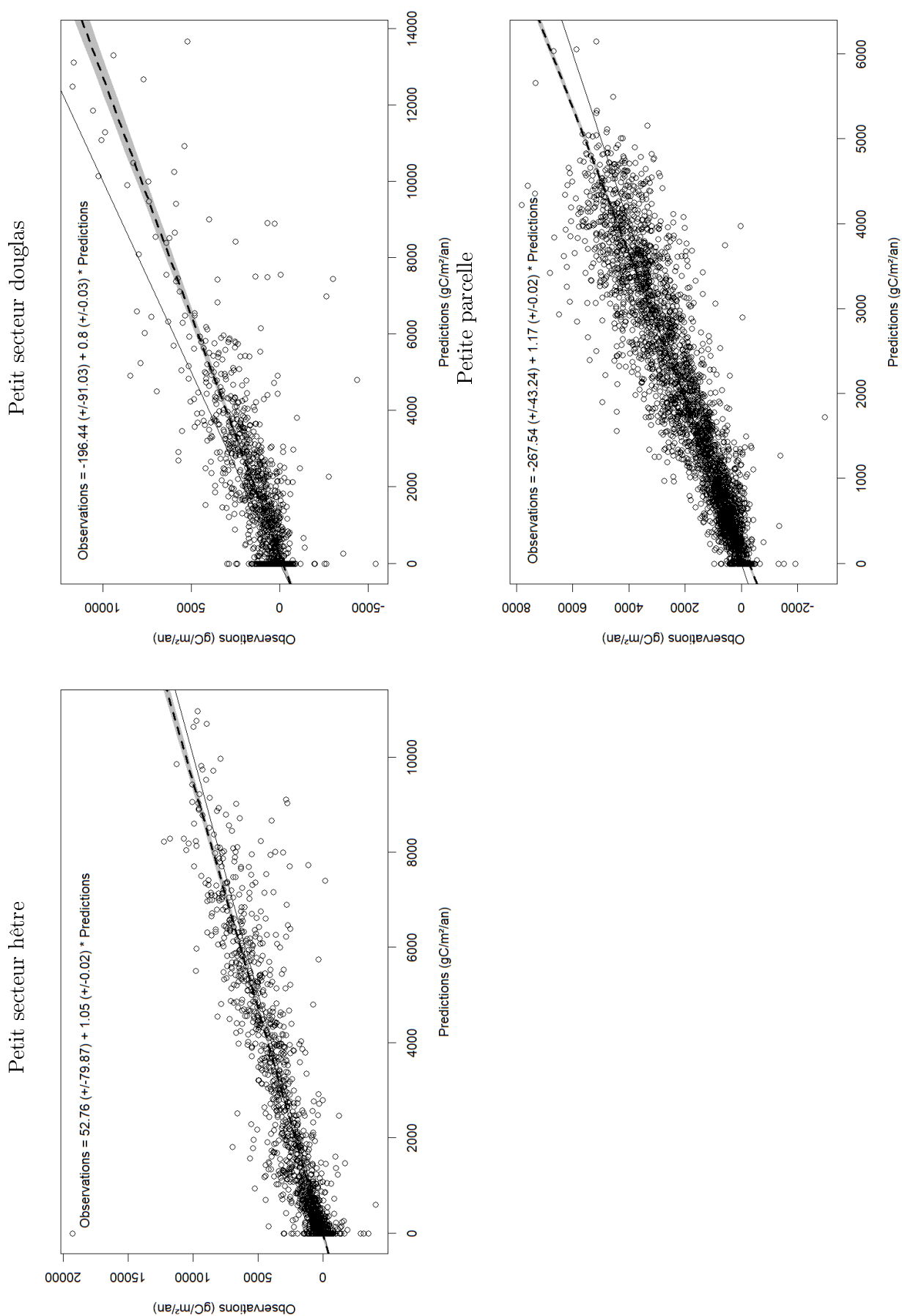


FIGURE 24 – Comparisons des prédictions et des observations de PPB agrégées à l'échelle journalière entre 2010 et 2018 à l'aide d'une régression orthogonale pour le petit secteur hêtre, le petit secteur douglas et la petite parcelle. La droite de régression est représentée en trait tireté avec son intervalle de confiance en grisé et est à comparer avec la droite 1 : 1.

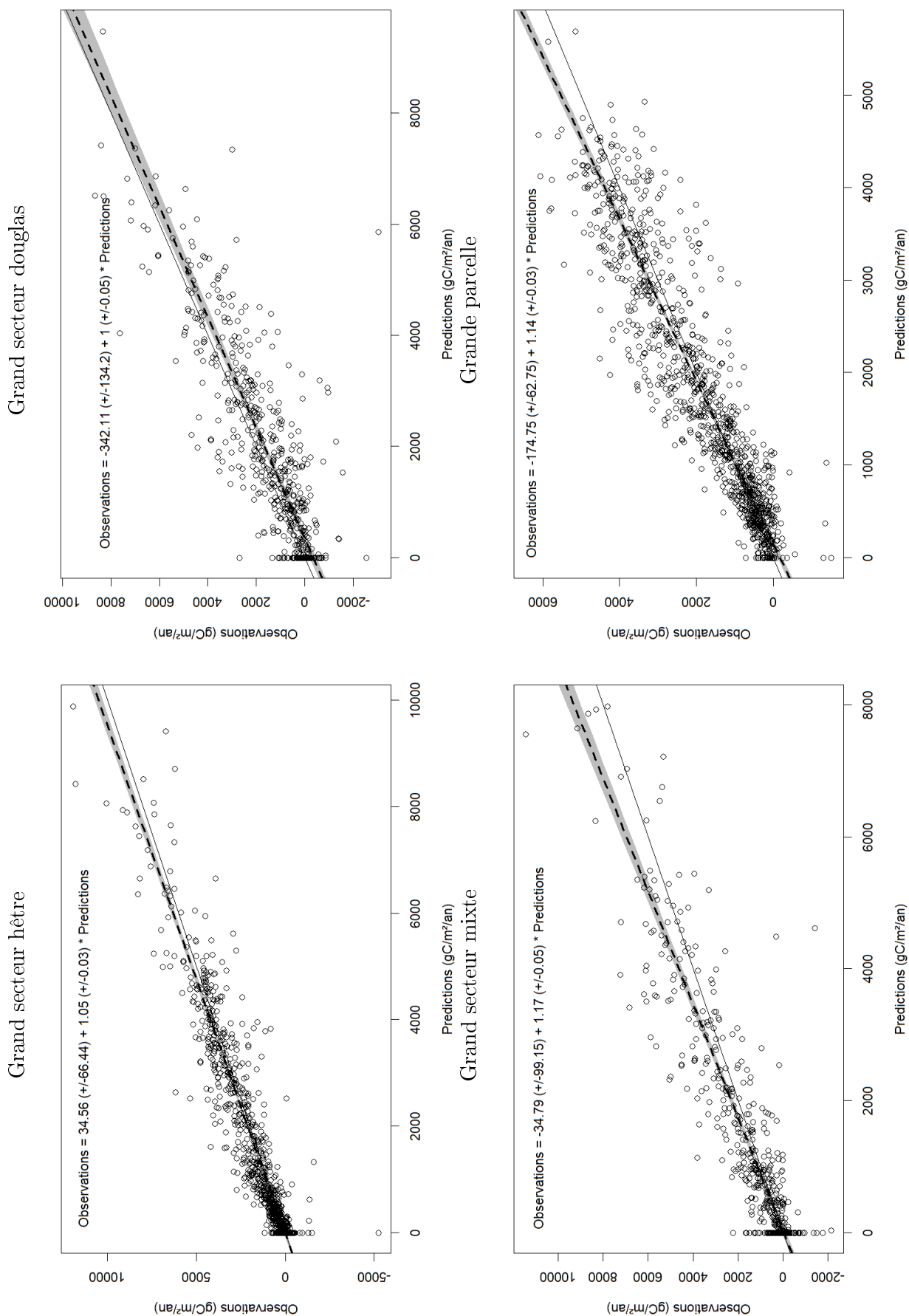


FIGURE 25 – Comparisons des prédictions et des observations de PPB agrégées à l'échelle journalière entre 2016 et 2018 à l'aide d'une régression orthogonale pour le grand secteur hêtre, le grand secteur Douglas, le grand secteur mixte et la grande parcelle. La droite de régression est représentée en trait tiré avec son intervalle de confiance en gris et est à comparer avec la droite 1 : 1.

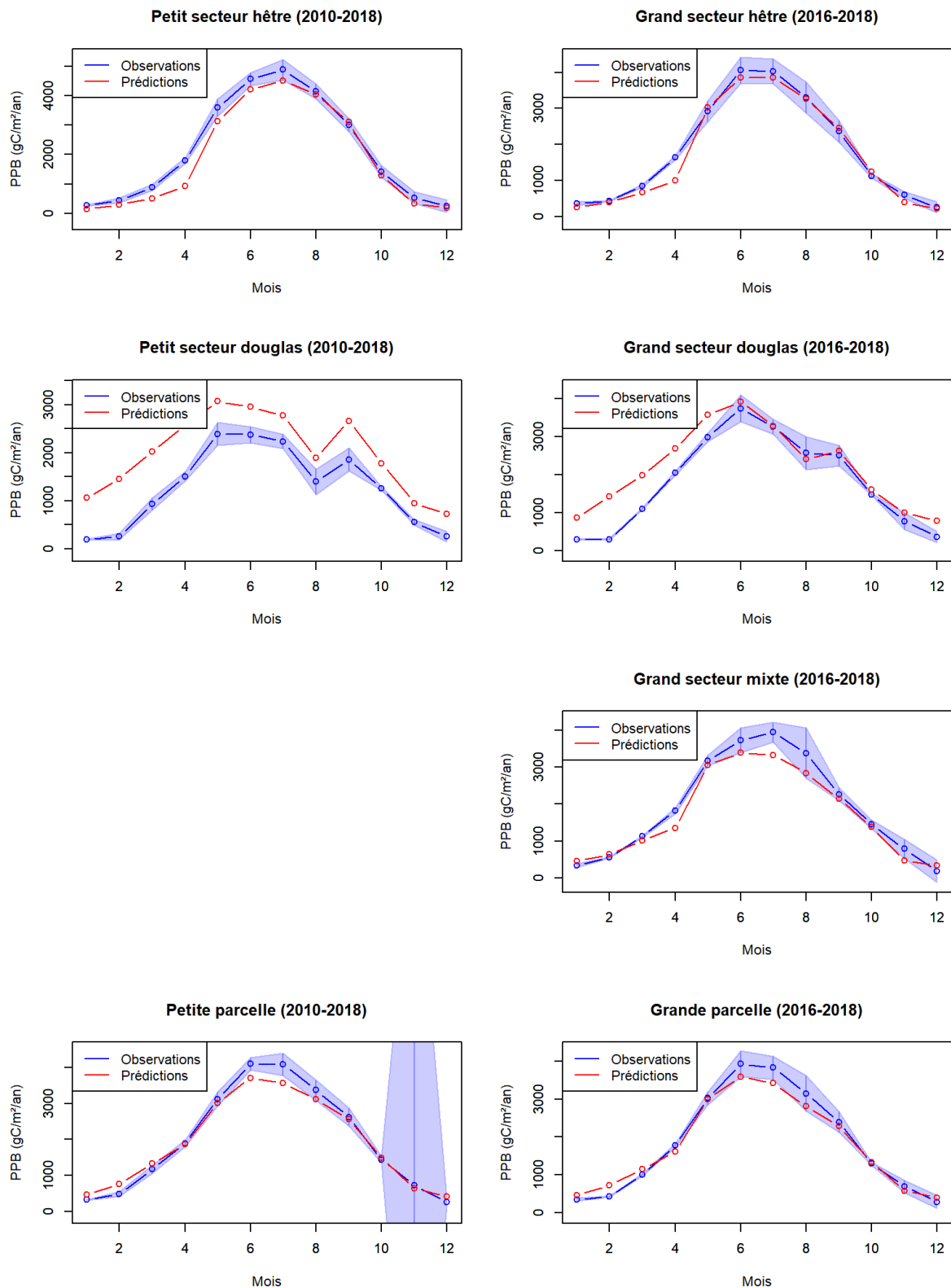


FIGURE 26 – Evolution mois par mois de la PPB sur une année moyenne (la période est précisée entre parenthèses pour chaque graphique) durant les heures où le vent provient des différents secteurs et pour les différentes parcelles. La zone colorée en bleu correspond à l'incertitude sur les observations liée au choix de la u^* seuil.

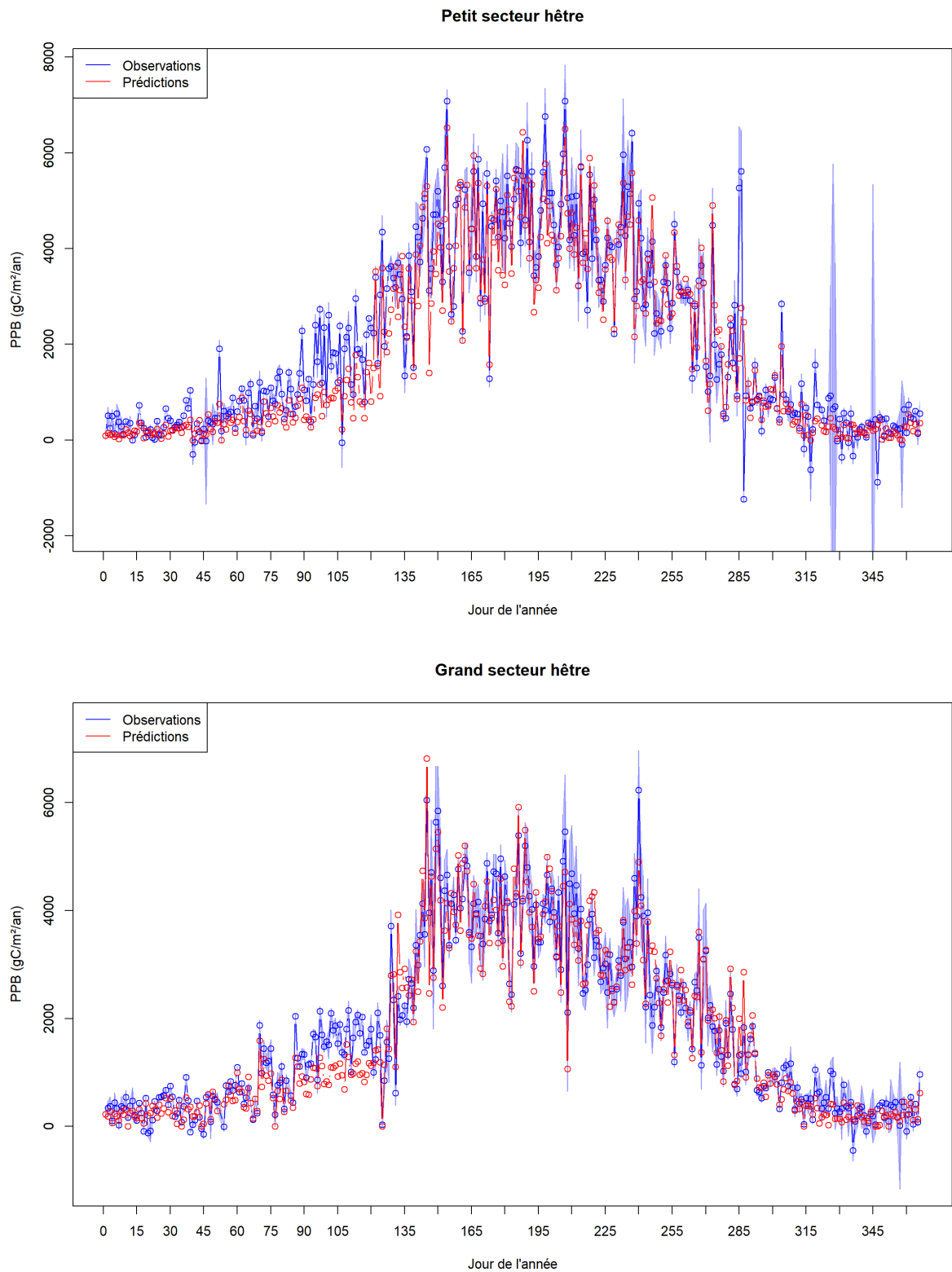


FIGURE 27 – Evolution jour par jour de la PPB sur une année moyenne durant les heures où le vent provient du petit secteur hêtre (entre 2010 et 2018) et durant les heures où le vent provient du grand secteur hêtre (entre 2016 et 2018). La zone colorée en bleu correspond à l'incertitude sur les observations liée au choix de la u^* seuil.

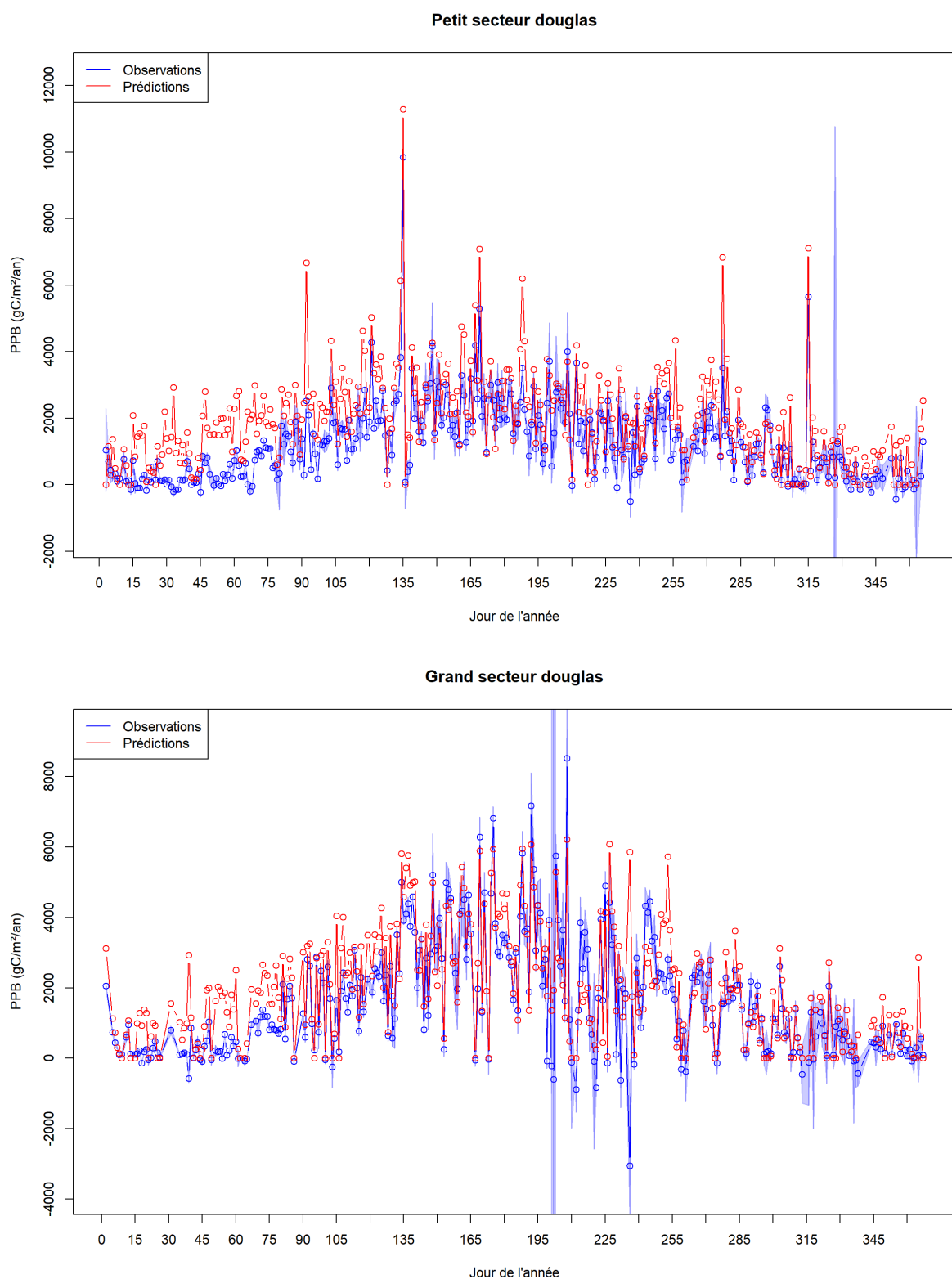


FIGURE 28 – Evolution jour par jour de la PPB sur une année moyenne durant les heures où le vent provient du petit secteur douglas (entre 2010 et 2018) et durant les heures où le vent provient du grand secteur douglas (entre 2016 et 2018). La zone colorée en bleu correspond à l'incertitude sur les observations liée au choix de la u^* seuil.

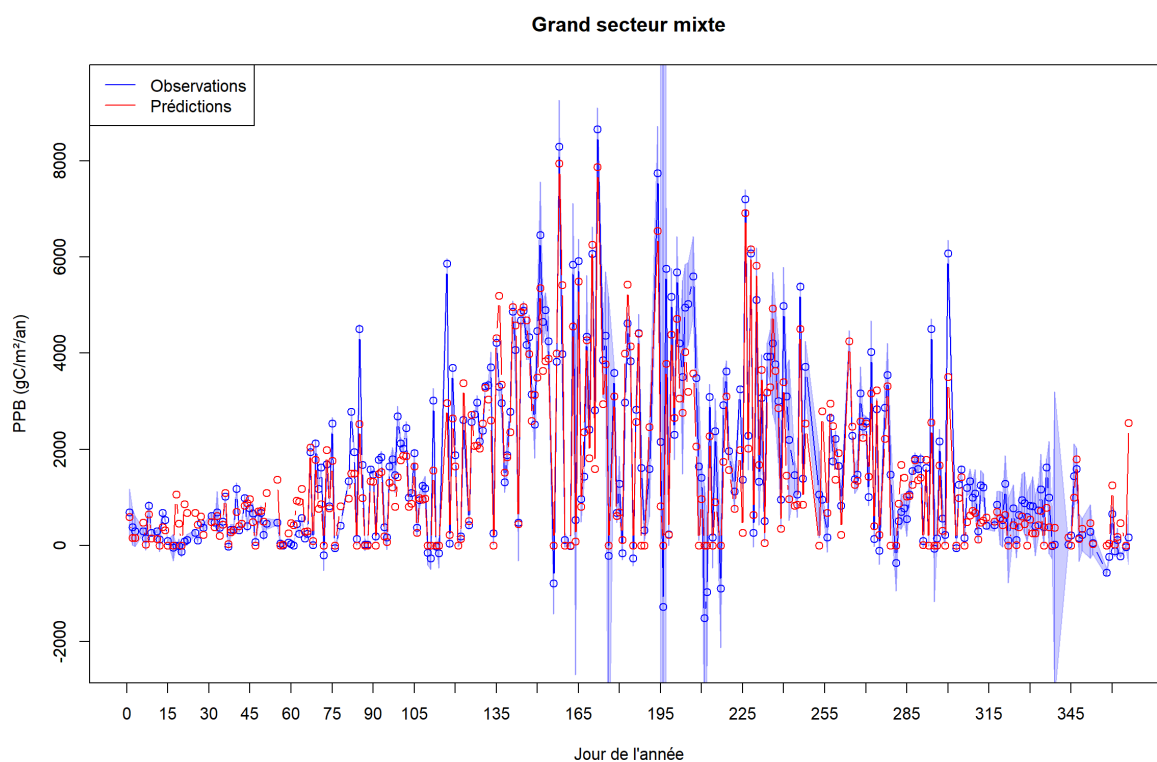


FIGURE 29 – Evolution jour par jour de la PPB sur une année moyenne durant les heures où le vent provient du grand secteur mixte (entre 2016 et 2018). La zone colorée en bleu correspond à l'incertitude sur les observations liée au choix de la u^* seuil.

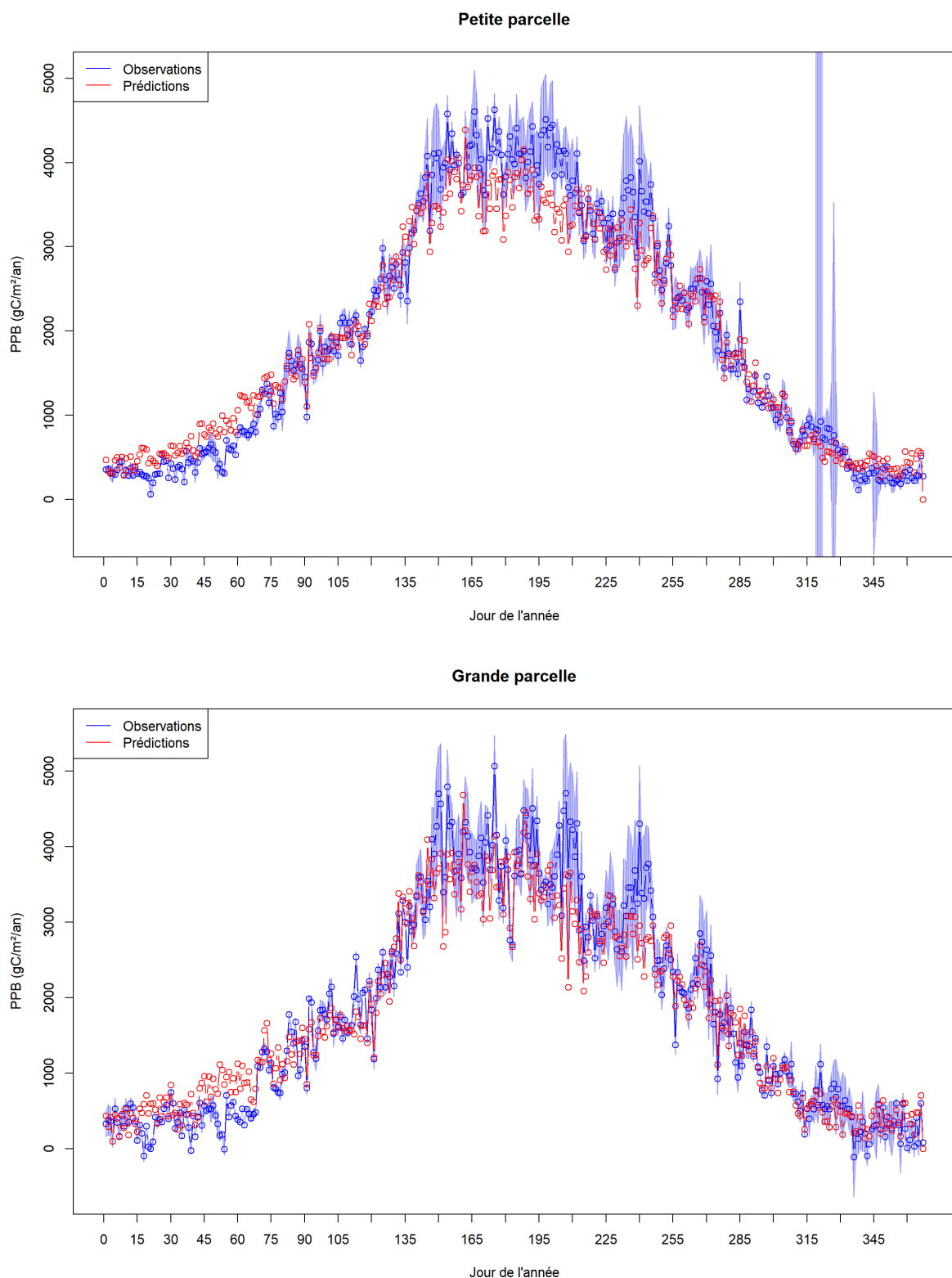


FIGURE 30 – Evolution jour par jour de la PPB sur une année moyenne pour la petite parcelle (entre 2010 et 2018) et la grande parcelle (entre 2016 et 2018). La zone colorée en bleu correspond à l'incertitude sur les observations liée au choix de la u^* seuil.

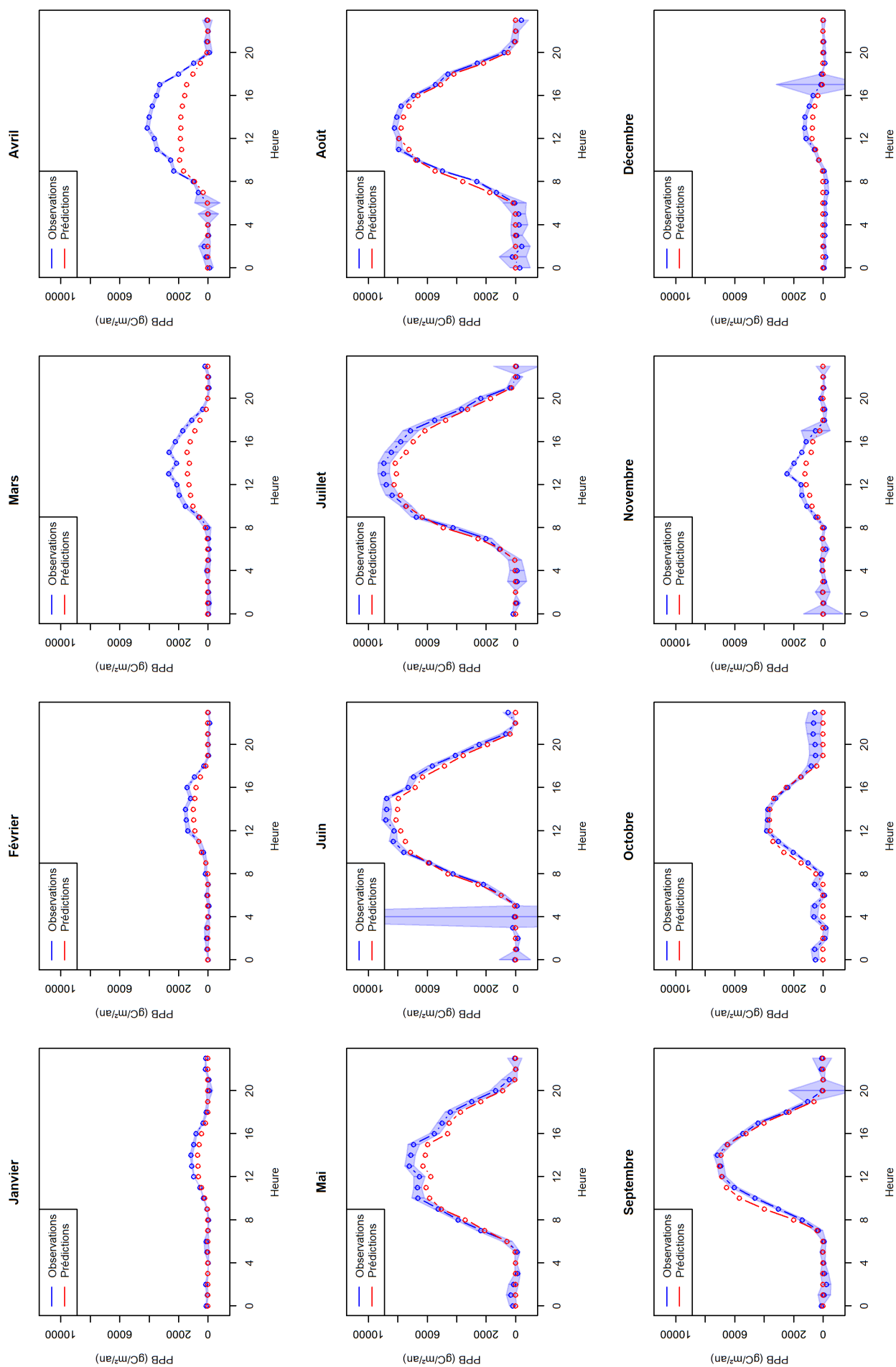


FIGURE 31 – Evolution heure par heure de la PPB durant les heures où le vent provient du petit secteur hêtre pour les différents mois d'une année moyenne (de 2010 à 2018). La zone colorée en bleu correspond à l'incertitude sur les observations liée au choix de la u^* seuil.

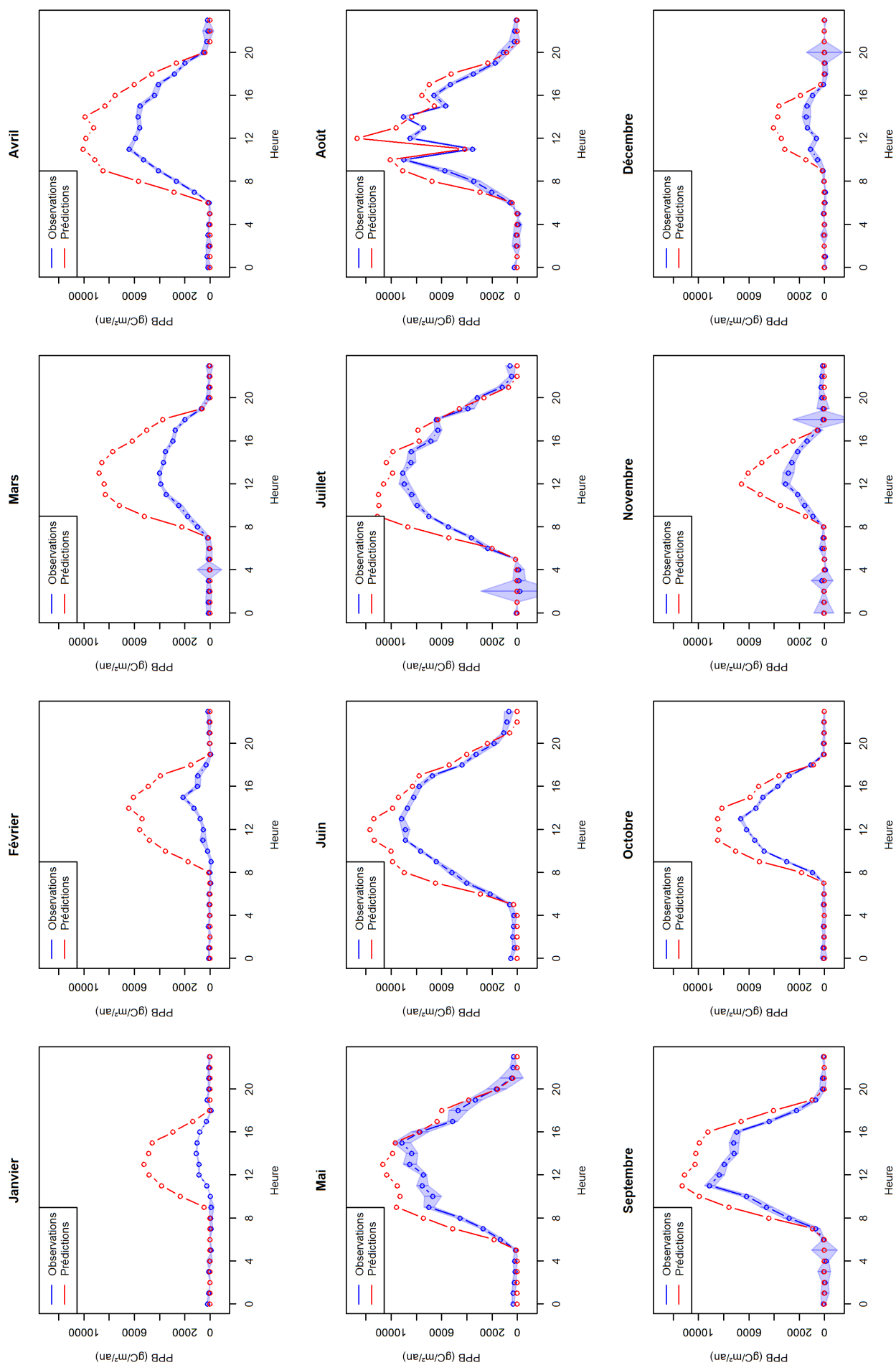


FIGURE 32 – Evolution heure par heure de la PPB durant les heures où le vent provient du petit secteur douglas pour les différents mois d'une année moyenne (de 2010 à 2018). La zone colorée en bleu correspond à l'incertitude sur les observations liée au choix de la u^* seuil.

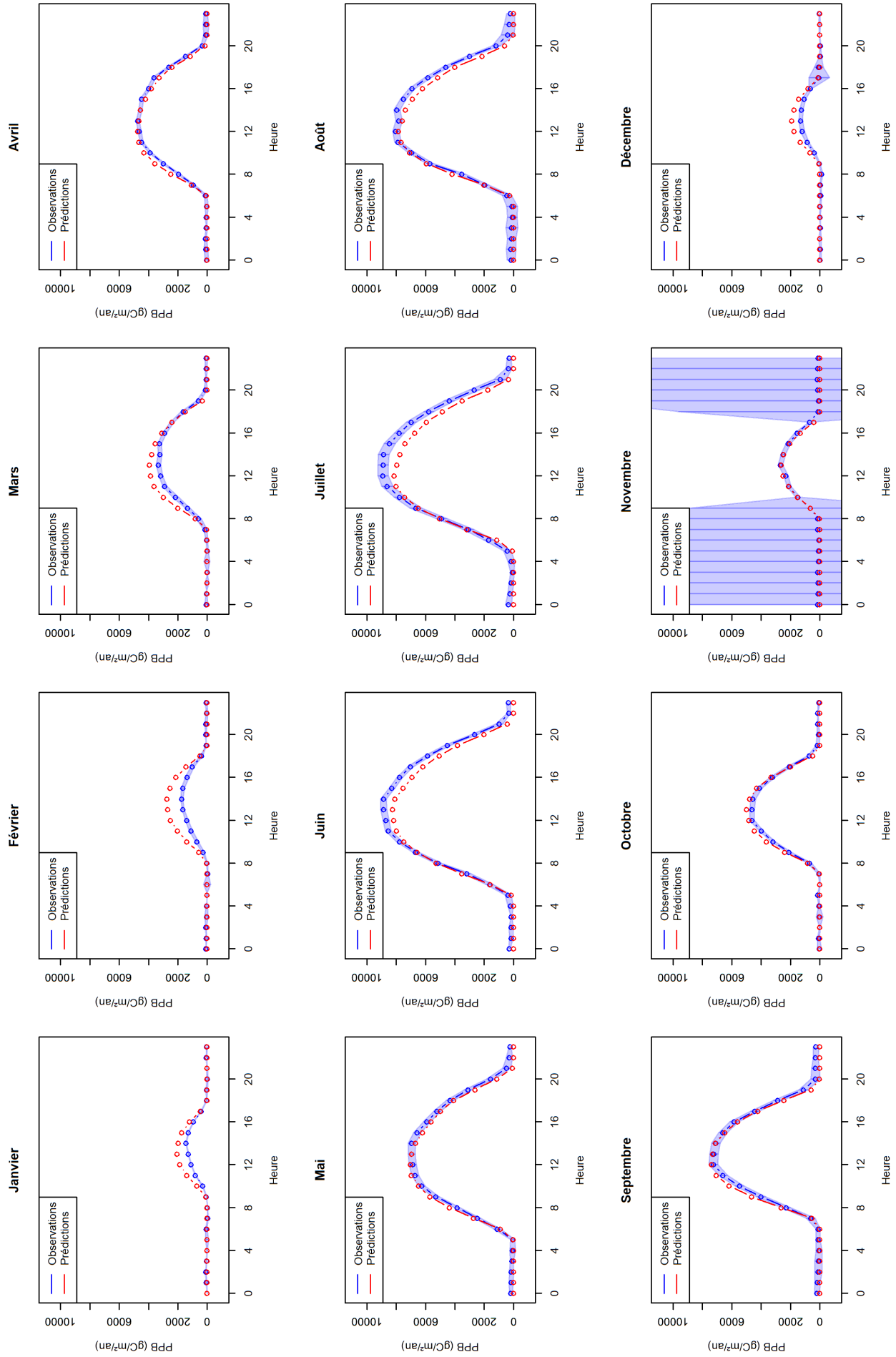


FIGURE 33 – Evolution heure par heure de la PPB de la petite parcelle pour les différents mois d’une année moyenne (de 2010 à 2018). La zone colorée en bleu correspond à l’incertitude sur les observations liée au choix de la u^* seuil.

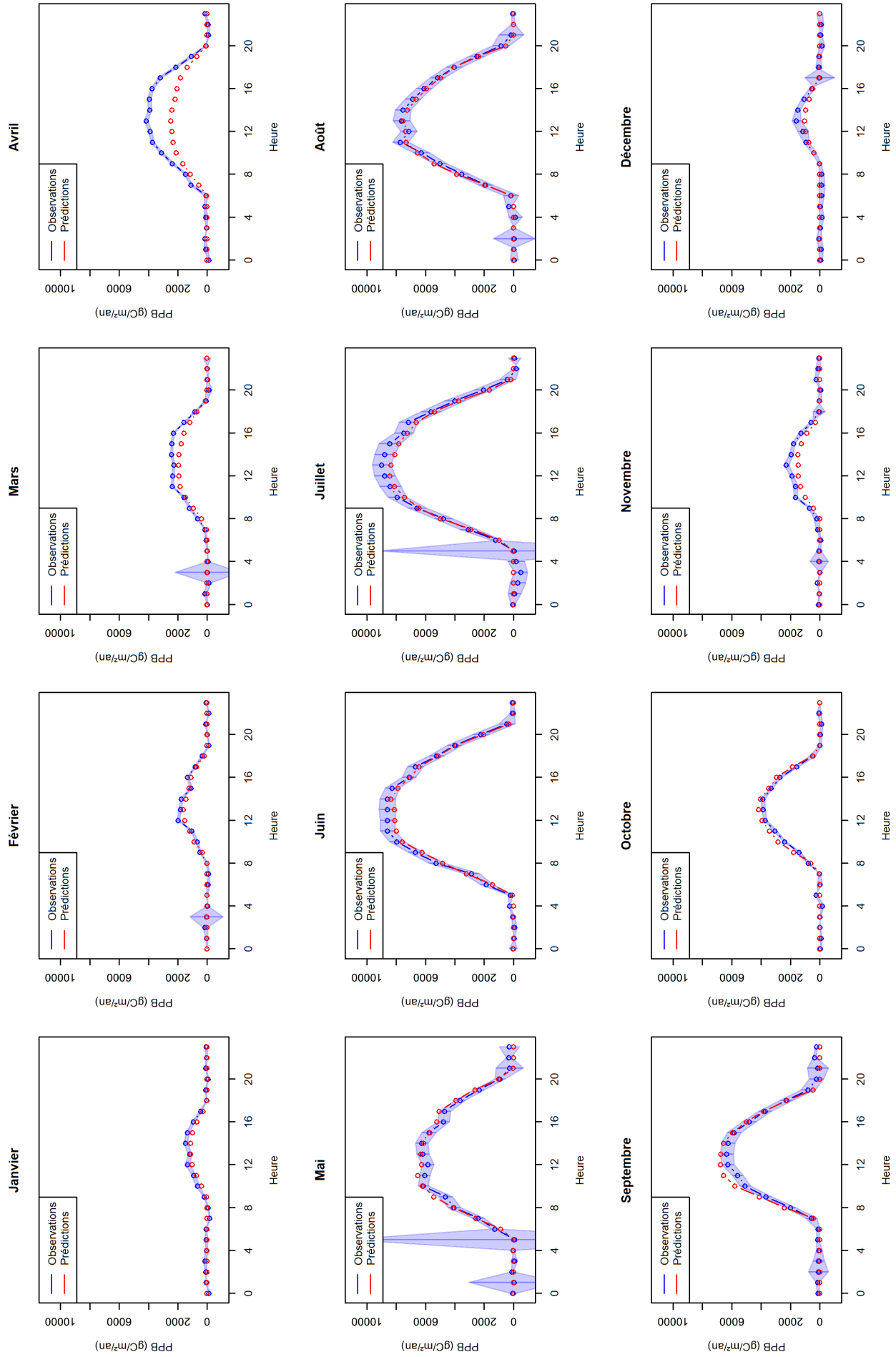


FIGURE 34 – Evolution heure par heure de la PPB durant les heures où le vent provient du grand secteur hêtre pour les différents mois d'une année moyenne (de 2016 à 2018). La zone colorée en bleu correspond à l'incertitude sur les observations liée au choix de la u^* seuil.

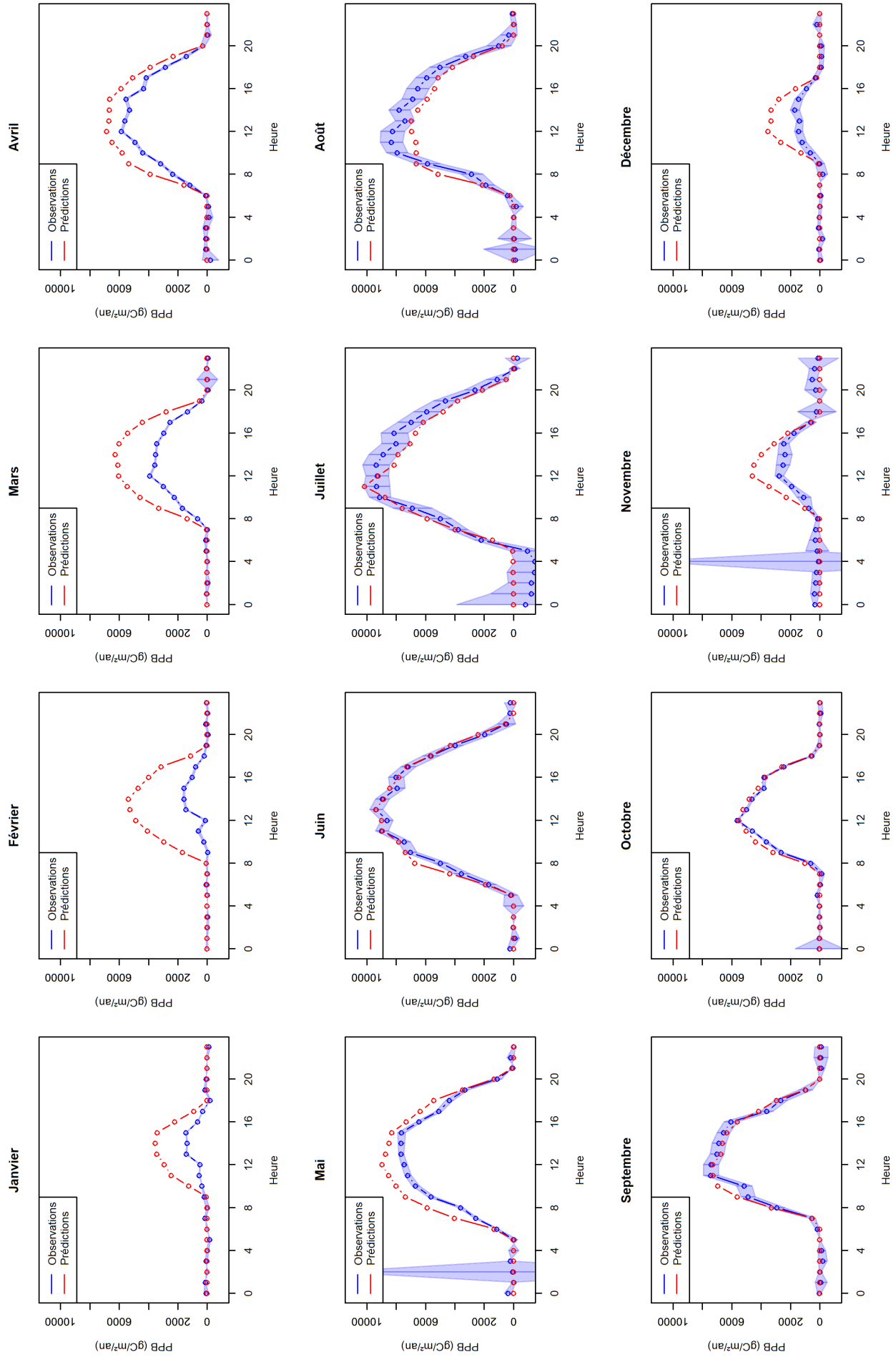


FIGURE 35 – Evolution heure par heure de la PPB durant les heures où le vent provient du grand secteur douglas pour les différents mois d'une année moyenne (de 2016 à 2018). La zone colorée en bleu correspond à l'incertitude sur les observations liée au choix de la u^* seuil.

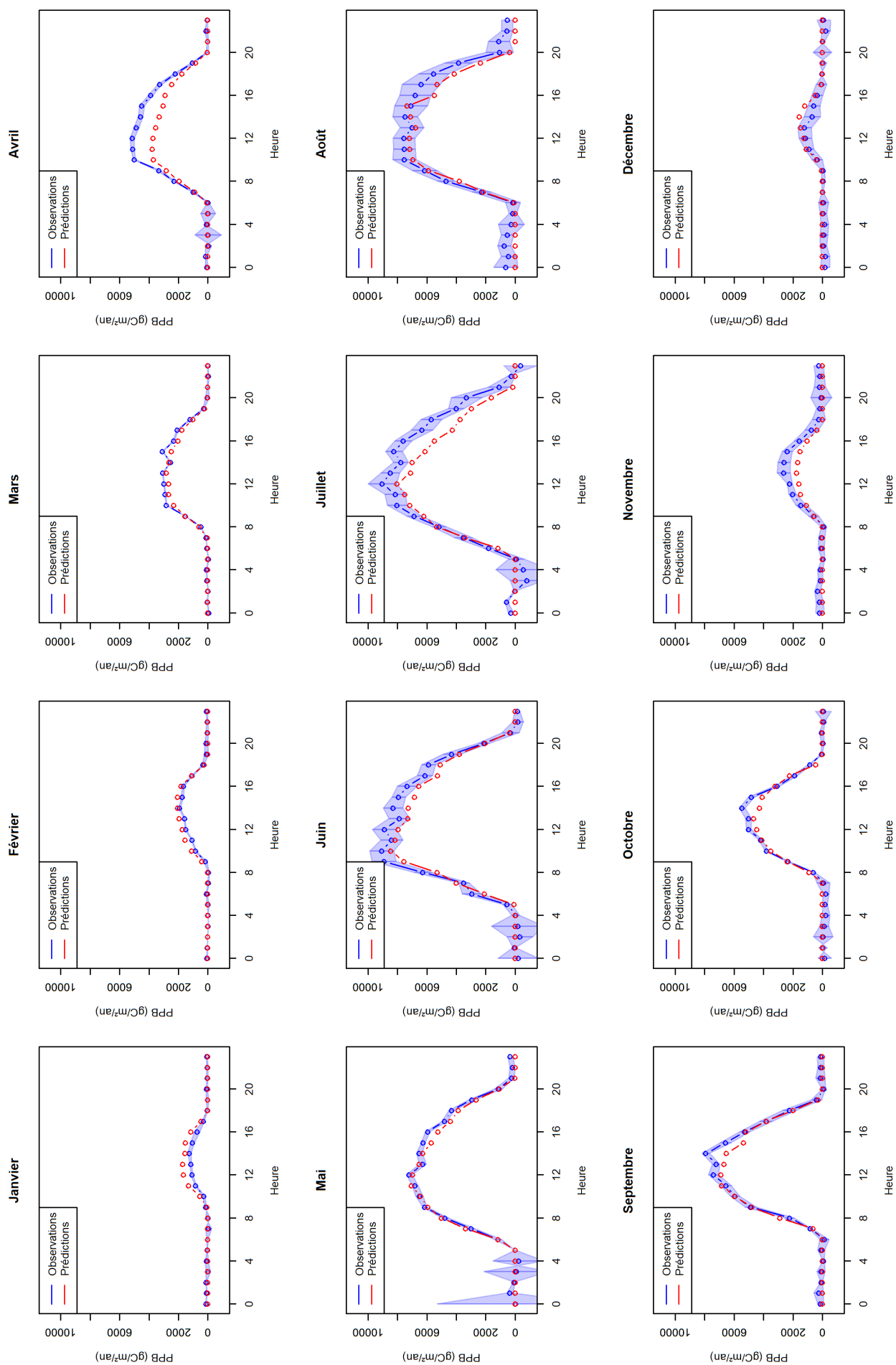


FIGURE 36 – Evolution heure par heure de la PPB durant les heures où le vent provient du grand secteur mixte pour les différents mois d'une année moyenne (de 2016 à 2018). La zone colorée en bleu correspond à l'incertitude sur les observations liée au choix de la u^* seuil.

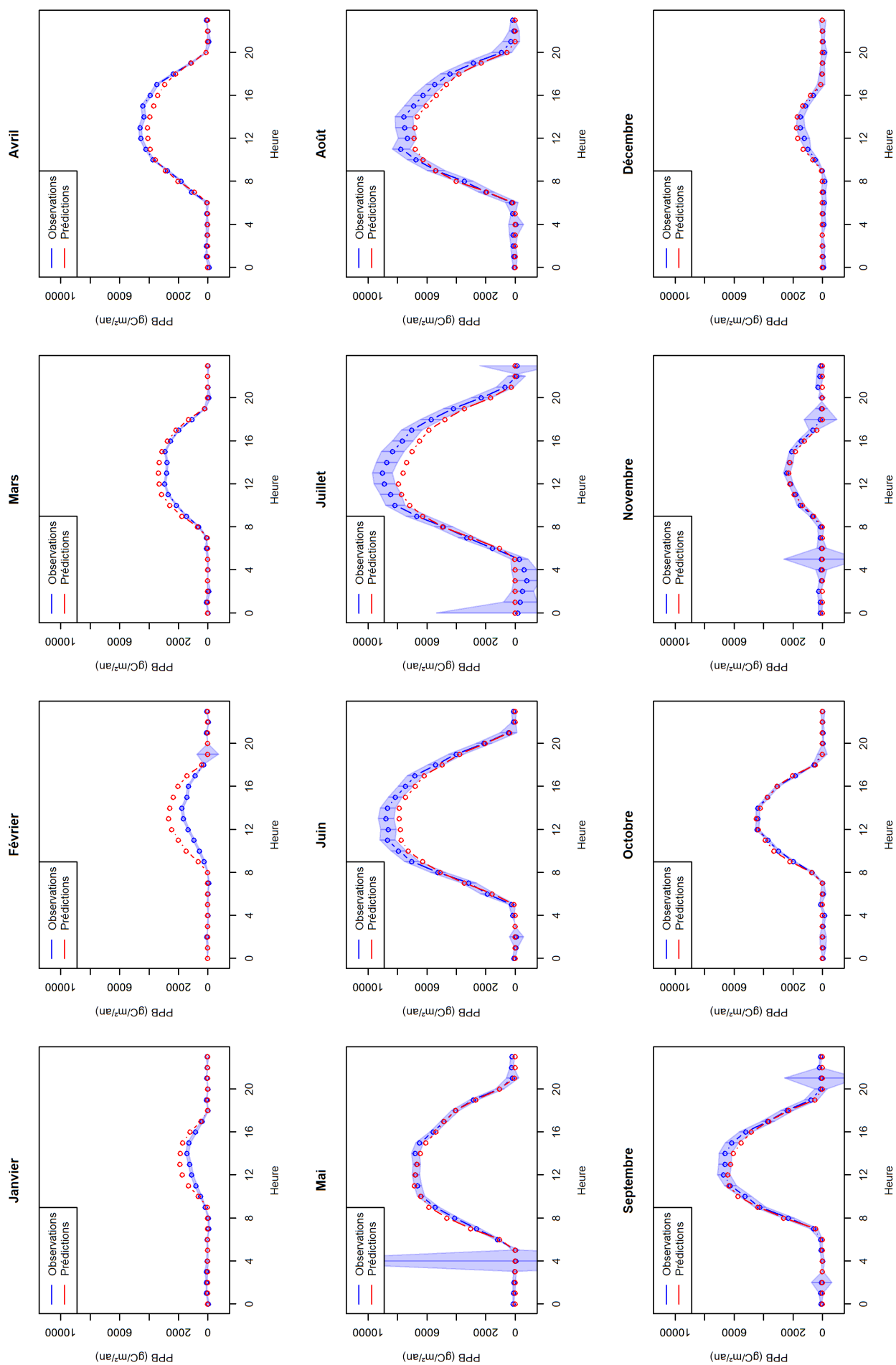


FIGURE 37 – Evolution heure par heure de la PPB de la grande parcelle pour les différents mois d'une année moyenne (de 2016 à 2018). La zone colorée en bleu correspond à l'incertitude sur les observations liée au choix de la u^* seuil.

3.1.7 Croissance radiale

La croissance radiale est facilement observable sur le terrain. En plus de considérer le produit de la photosynthèse, elle intègre aussi la notion d'allocation du carbone. C'est en fait une variable qui résulte de l'intégration de tous les processus de croissance. Deux aspects ont été évalués avec d'une part la confrontation des prédictions et des observations d'accroissement en surface terrière et d'autre part en vérifiant que le modèle était capable de reproduire les relations taille-croissance.

La calibration des paramètres des espèces a été faite sur les simulations à partir de la grande parcelle de 2015, dont les résultats de croissance radiale sont présentés dans cette section. Les résultats analogues pour la petite parcelle de 2009 sont consultables en annexe aux Figures 170 et 171 et au Tableau 15.

La correspondance entre prédictions et observations d'accroissement en surface terrière, établie grâce à des régressions orthogonales pour les quatre espèces majoritaires, est bonne. Les droites 1 : 1 sont comprises dans les intervalles de confiance des droites de régression ou en sont proches. Les valeurs d'intercept et de pente possèdent un intervalle de confiance comprenant respectivement 0 et 1. Les corrélations de Pearson prennent des valeurs comprises entre 0,621 pour le hêtre et 0,757 pour le sapin pectiné. Le RMSE va de 11,289 $\frac{\text{cm}^2}{\text{an}}$ pour le hêtre à 35,715 $\frac{\text{cm}^2}{\text{an}}$ pour le sapin pectiné. Les tests t de comparaison de moyennes ne révèlent pas de différences significatives entre les prédictions et les observations, sauf dans le cas du sapin pectiné pour lequel la moyenne des prédictions est significativement plus petite que celle des observations. Sa droite de régression s'écarte d'ailleurs un peu plus de la droite 1 : 1 que celles des autres espèces.

Pour évaluer le modèle, nous avons également vérifié qu'il est capable de reproduire les relations taille-croissance (voir Section 2.5.7). Les représentations des accroissements en surface terrière individuelle en fonction de la circonférence initiale pour les espèces majoritaires semblent présenter des nuages de points similaires pour les observations et les prédictions (Figure 39). Néanmoins, l'établissement des relations taille-croissance par régression segmentée met en lumière quelques différences (Figure 39 et Tableau 13). Tout d'abord, les circonférences seuils prédites pour les quatre espèces majoritaires sont systématiquement plus hautes que pour les observations. Si l'écart se limite à 10 centimètres dans le cas du douglas, il est de plusieurs dizaines de centimètres pour les autres espèces. Cette différence est en quelque sorte compensée par une pente prédite sensiblement plus forte que la pente observée chez le hêtre et l'épicéa. En revanche, pour le sapin pectiné, les pentes, celle prédite et celle observée, sont très proches. En combinaison avec le seuil de circonférence trop élevé, cela conduit à des prédictions de croissance généralement trop faibles, et ce, quelle que soit la taille de l'arbre. Cela corrobore avec l'analyse des résultats de la Figure 38. Pour le douglas, les relations prédite et observée sont finalement très proches l'une de l'autre. Une autre constatation, valable pour chacune des espèces

considérées, est que la variance des prédictions est moins grande que celle des observations. Cela est traduit par les R^2 des régressions segmentées, qui sont systématiquement plus élevés pour les prédictions que pour les observations. Les résultats restent néanmoins satisfaisants.

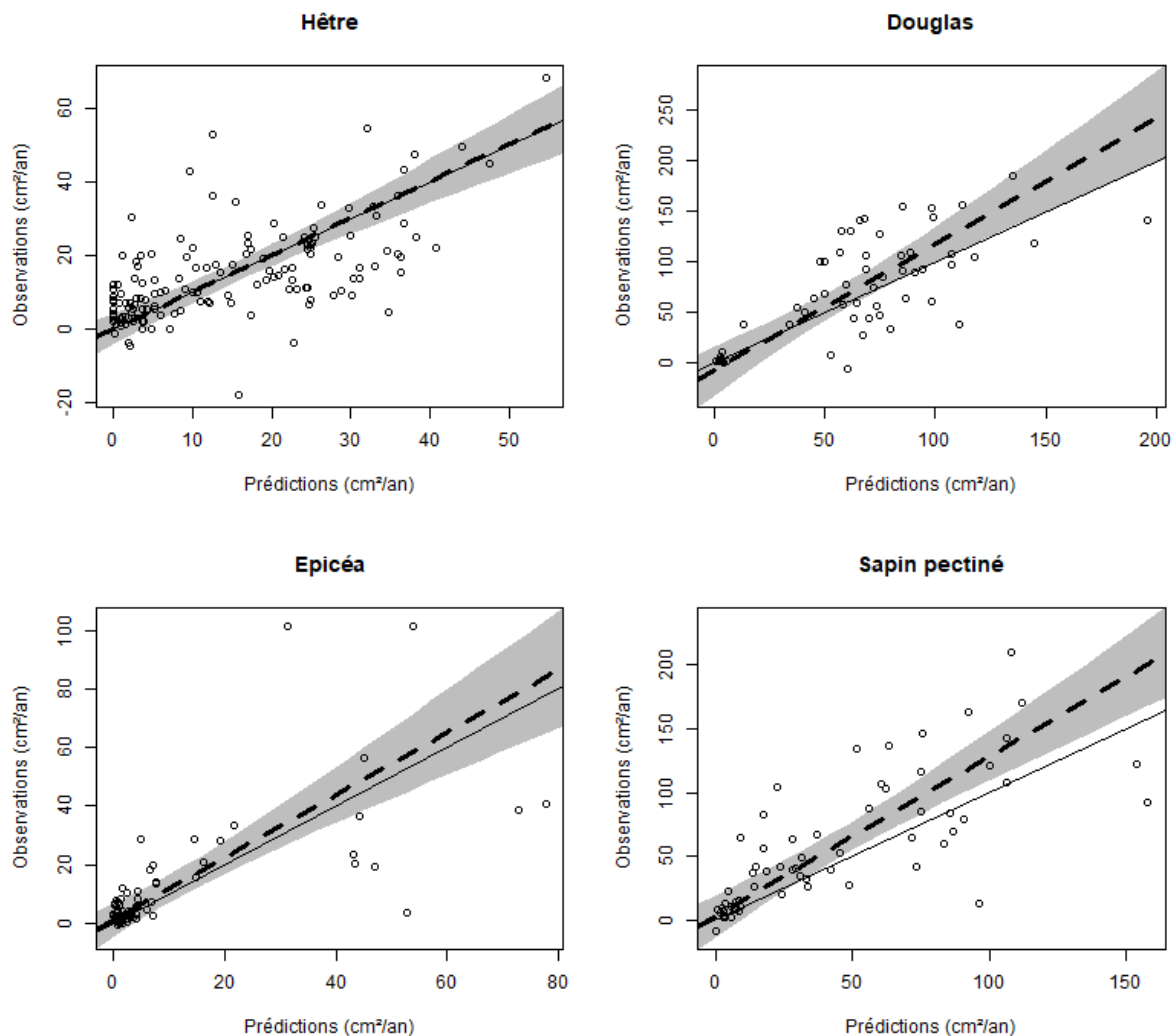


FIGURE 38 – Comparaisons des accroissements en surface terrière individuelle prédits et observés à l'aide d'une régression orthogonale. La droite de régression est représentée en trait tireté avec son intervalle de confiance en grisé et est à comparer avec la droite 1 : 1. On considère l'accroissement annuel moyen des arbres de la grande parcelle entre 2015 et 2019.

TABLEAU 12 – Comparaison de l'accroissement en surface terrière individuelle prédit et observé ($\text{cm}^2.\text{an}^{-1}$) pour les différentes essences sur base d'un test t, d'un test de régression orthogonale (intervalles de confiance pour $\alpha = 0,05$), du RMSE et de la corrélation de Pearson. On considère l'accroissement annuel moyen des arbres de la grande parcelle entre 2015 et 2019.

Essence	Moyenne des prédictions	Moyenne des observations	p-valeur du test t	Intercept	Pente	RMSE	r
Hêtre	14,933	14,986	0,9559	-0,052 (-4,275 ; 4,171)	1,007 (0,793 ; 1,221)	11,289	0,621
Douglas	63,387	71,495	0,08732	-7,905 (-31,769 ; 15,958)	1,253 (0,936 ; 1,569)	36,110	0,727
Epicéa	10,013	11,823	0,2995	1,139 (-4,426 ; 6,704)	1,067 (0,793 ; 1,341)	14,809	0,677
Sapin pectiné	42,857	57,076	0,001121	3,462 (-12,756 ; 19,679)	1,251 (0,974 ; 1,528)	35,715	0,757

TABLEAU 13 – Ajustement des relations taille-croissance : résultats des régressions segmentées, affichées dans la Figure 39, déterminant une circonférence seuil au-delà de laquelle la croissance radiale augmente linéairement avec la circonférence, ainsi que la pente de cette relation pour différentes essences et pour les différents scénarios. Le seuil et la pente sont présentés avec leurs intervalles de confiance à 95%. Le R^2 des relations est également indiqué.

Essence	Observations ou prédictions	Seuil (cm)	Pente	R^2
Hêtre	Observations	$1,9 \pm 2,0$	$0,149 \pm 0,003$	0,26
	Prédictions	$42,4 \pm 1,5$	$0,234 \pm 0,004$	0,49
Douglas	Observations	$135,3 \pm 0,8$	$0,846 \pm 0,007$	0,65
	Prédictions	$145,2 \pm 0,8$	$0,829 \pm 0,007$	0,86
Epicéa	Observations	$42,3 \pm 1,7$	$0,233 \pm 0,003$	0,63
	Prédictions	$80,1 \pm 1,7$	$0,308 \pm 0,005$	0,89
Sapin pectiné	Observations	$61,4 \pm 1,0$	$0,640 \pm 0,005$	0,64
	Prédictions	$97,0 \pm 0,7$	$0,684 \pm 0,005$	0,80

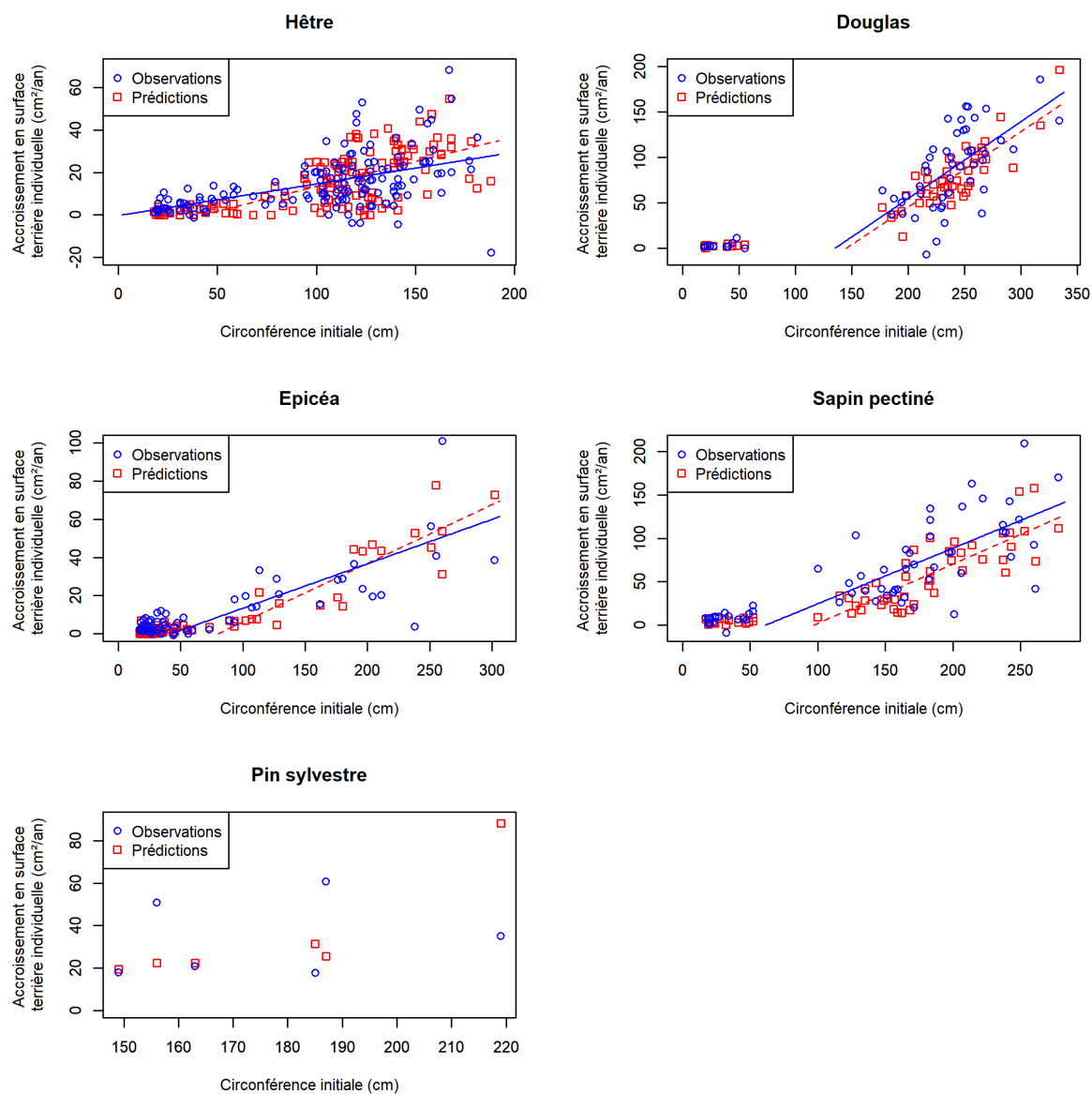


FIGURE 39 – Comparaisons des relations taille-croissance prédites et observées pour différentes essences. On considère l'accroissement annuel moyen des arbres de la grande parcelle entre 2015 et 2019. Les droites représentent la régression segmentée déterminant une circonférence seuil au-delà de laquelle la croissance radiale augmente linéairement avec la circonférence, ainsi que la pente de cette relation (voir aussi le Tableau 13). La droite pleine se rapporte aux observations et la droite pointillée aux prédictions. Au vu du peu de données, les régressions ne sont pas effectuées pour le pin sylvestre.

3.2 Expériences de simulation

Les expériences de simulations réalisées ont pour but de mettre en lumière l'impact général du changement climatique sur la forêt. Pour ce faire, des simulations ont été effectuées sous différents scénarios climatiques et plusieurs variables ont ensuite été analysées : la longueur de la période de végétation, l'évapotranspiration, le déficit de transpiration, la PPB et la croissance radiale (à nouveau par les accroissements en surface terrière et les relations taille-croissance). Les résultats des tests de Tukey comparant les différents scénarios entre eux pour chacune de ces variables sont rapportés en annexe dans les Tableaux 16 à 20.

Dans HETEROFOR, la longueur de la période de végétation n'est pas impactée par la concentration en CO_2 atmosphérique. Les deux modalités de concentration en CO_2 atmosphérique amènent donc aux mêmes résultats (Figure 40). L'allongement de la période de végétation n'est pas significatif pour le scénario RCP2.6 mais les deux autres scénarios RCP montrent bien que l'intensification du changement climatique le favorise avec une période de végétation plus longue de 23 jours dans le cas du RCP8.5 (Figure 40).

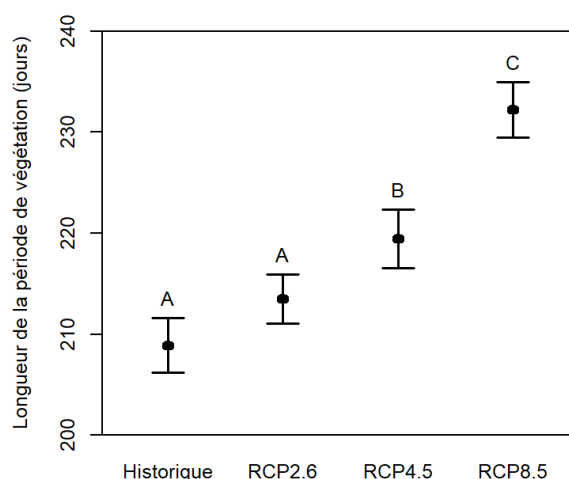


FIGURE 40 – Longueur de la période de végétation du hêtre du début du débourrement à la fin du jaunissement des feuilles selon les différents scénarios climatiques considérés (historique, RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5). Les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance à la moyenne ($\alpha = 0,05$). Les scénarios avec des lettres communes ne sont pas significativement différents les uns des autres ($\alpha = 0,05$).

L'évapotranspiration (Figure 41) prédite avec une concentration en CO_2 fixe pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 est plus élevée que pour les scénarios historique et RCP2.6. Avec une concentration en CO_2 variable, aucun scénario RCP ne se distingue significativement de la période historique, mais l'évapotranspiration reste plus élevée pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 que pour le RCP2.6. L'augmentation de la concentration en CO_2 atmosphérique semble limiter l'évapotranspiration pour les scénarios RCP4.5 et

RCP8.5.

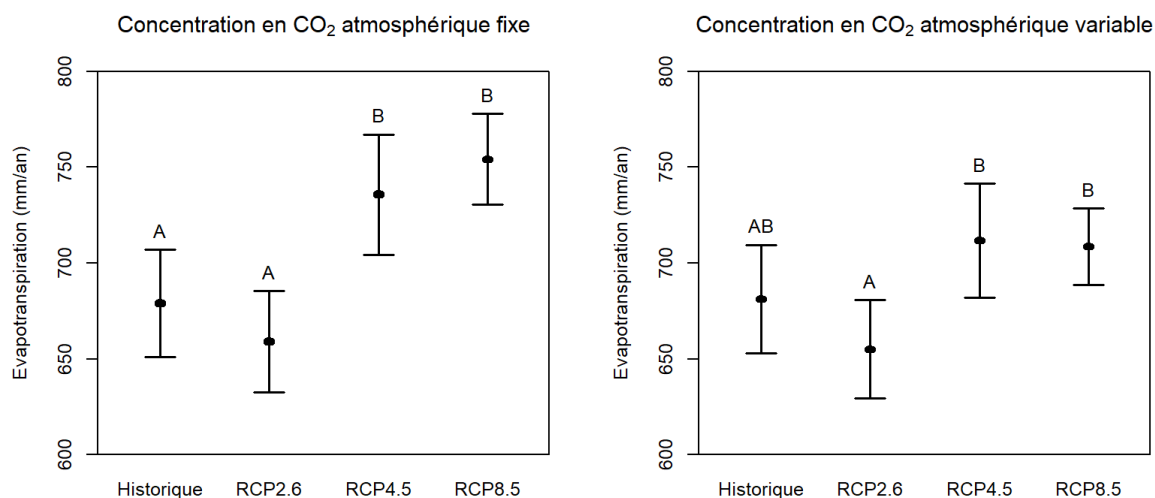


FIGURE 41 – Evapotranspiration de la grande parcelle selon les différents scénarios climatiques considérés (historique, RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5) avec une concentration en CO₂ fixe ou variable. Les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance à la moyenne ($\alpha = 0,05$). Pour une modalité de concentration en CO₂ donnée, les scénarios avec des lettres communes ne sont pas significativement différents les uns des autres ($\alpha = 0,05$).

Pour chacun des scénarios RCP, avec une concentration en CO₂ fixe, le déficit de transpiration (Figure 42) ne peut être considéré différent de celui obtenu pour la période historique, que ce soit pour la parcelle entière ou pour une des espèces majoritaires. Les larges intervalles de confiance traduisent une forte variabilité inter-annuelle. Dans le cas où la concentration en CO₂ atmosphérique est variable, le déficit de transpiration est plus faible pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 que pour les scénarios RCP2.6 et historique.

Lorsqu'on considère la concentration en CO₂ fixe, les différences de PPB (Figure 43) entre les scénarios RCP et la période historique ne sont pas significatives, excepté pour les scénarios RCP4.5 et 8.5 dans le cas du hêtre. Les différences entre scénarios sont faibles et n'excèdent pas 1,05 % pour la parcelle entière. Logiquement, c'est la concentration en CO₂ atmosphérique qui influe sur la PPB. Quand on la considère variable, la PPB augmente progressivement pour les scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5, même si les différences entre le scénario historique et RCP2.6 ne sont pas significatives pour chacune des espèces.

Sans surprise, l'accroissement en surface terrière (Figure 44) présente des résultats analogues à ceux de la PPB quelque soit la modalité de CO₂ utilisée. Les différences entre scénarios ne sont marquées que dans le cas d'une concentration en CO₂ atmosphérique variable. L'accroissement en surface terrière augmente de 60% pour la parcelle dans

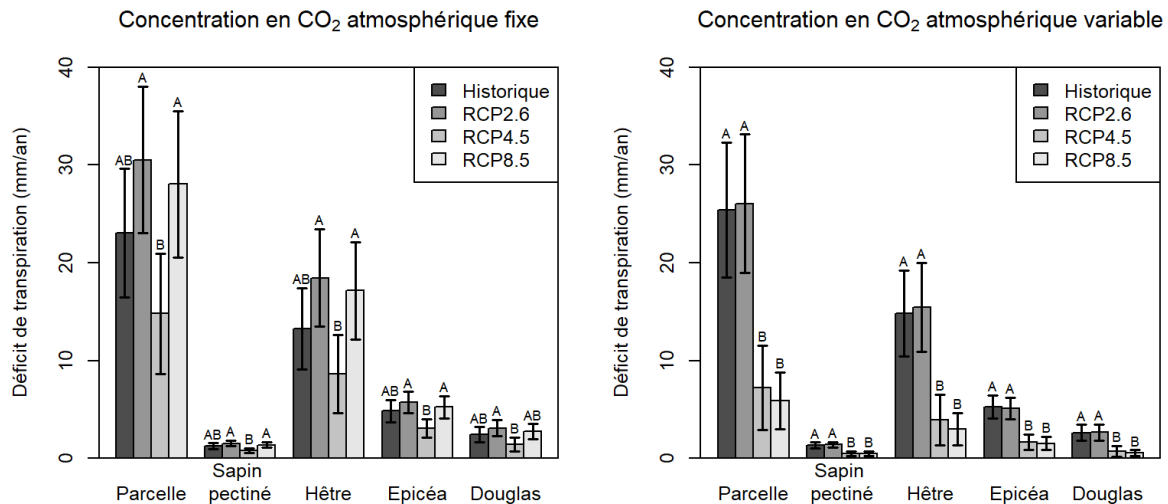


FIGURE 42 – Déficit de transpiration annuel moyen pour la grande parcelle et pour les quatre espèces majoritaires obtenu avec les différents scénarios climatiques considérés (historique, RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5) avec une concentration en CO₂ fixe ou variable. Les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance à la moyenne ($\alpha = 0,05$). Pour une modalité de concentration en CO₂ et une espèce donnée, les scénarios avec des lettres communes ne sont pas significativement différents les uns des autres ($\alpha = 0,05$).

le cas du scénario RCP8.5 par rapport à la période historique.

La comparaison des accroissements annuels en surface terrière des espèces majoritaires entre la période historique et le scénario RCP8.5 (Figure 45) montre qu'un tel changement climatique, sans faire varier la concentration en CO₂ atmosphérique, limiterait faiblement la croissance radiale du douglas, de l'épicéa et du sapin pectiné, alors que la croissance radiale du hêtre serait plutôt favorisée. Avec une concentration en CO₂ variable, les accroissements annuels en surface terrière seraient multipliés par un facteur allant de 1,5 pour le douglas à 1,863 pour le sapin pectiné.

L'établissement des relations taille-croissance (Tableau 14 et Figures 46 et 47) nous confirme les tendances liées à la modalité de concentration en CO₂ atmosphérique. Les changements dans les pentes et intercepts sont faibles pour une concentration en CO₂ fixe et l'effet du scénario est différent selon l'essence considérée. Pour une concentration en CO₂ variable, les scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 provoquent dans cet ordre, des changements de pente de plus en plus grands, le plus souvent accompagnés d'une augmentation de la circonférence seuil. La part de la variance expliquée par ces relations est similaire d'un scénario à l'autre pour les différents cas de figure.

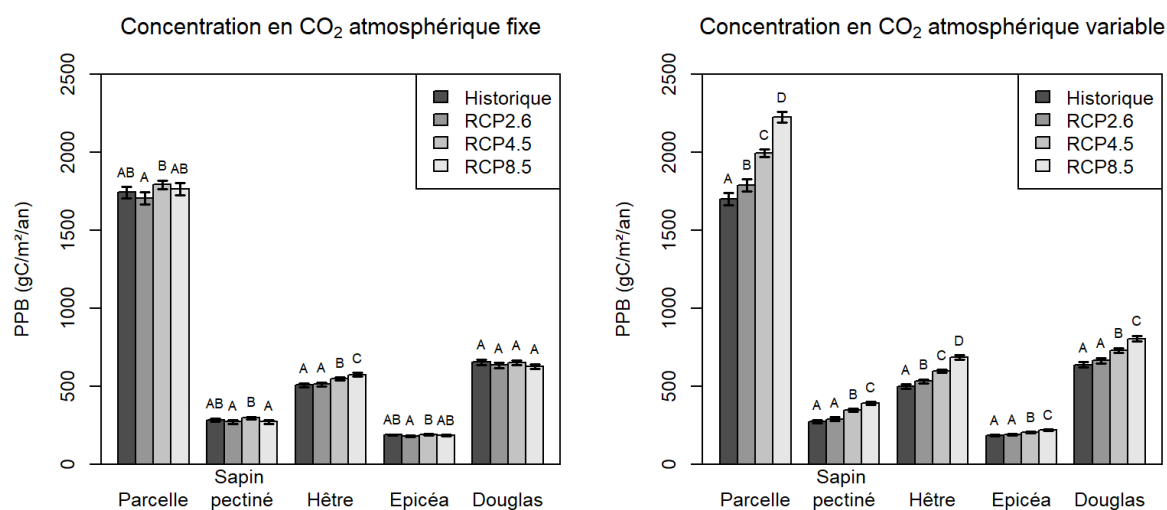


FIGURE 43 – Production primaire brute moyenne pour la grande parcelle et pour les quatre espèces majoritaires obtenue avec les différents scénarios climatiques considérés (historique, RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5) avec une concentration en CO₂ fixe ou variable. Les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance à la moyenne ($\alpha = 0,05$). Pour une modalité de concentration en CO₂ et une espèce donnée, les scénarios avec des lettres communes ne sont pas significativement différents les uns des autres ($\alpha = 0,05$).

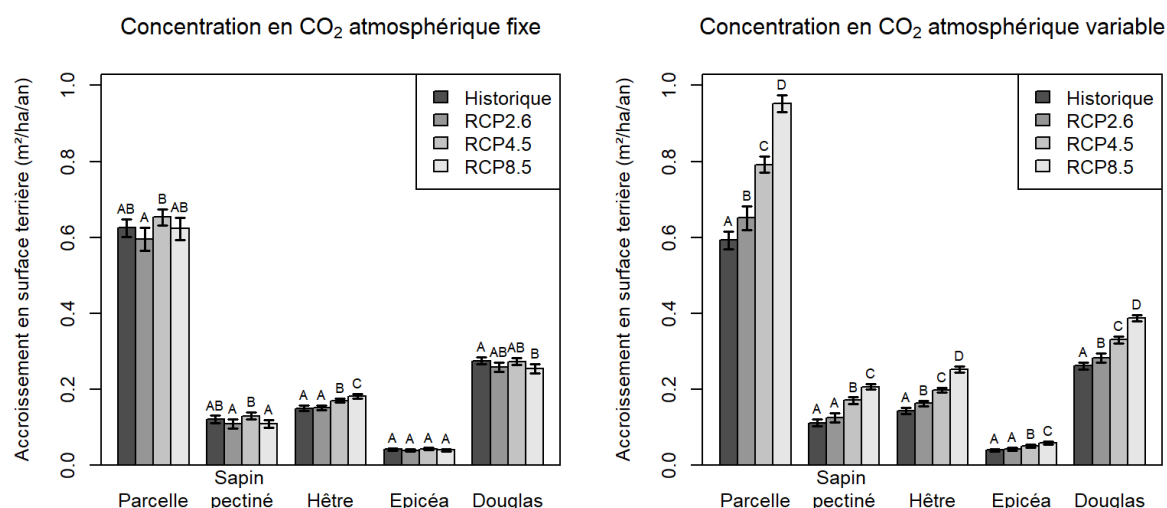


FIGURE 44 – Accroissement annuel moyen en surface terrière pour la grande parcelle et pour les quatre espèces majoritaires obtenue avec les différents scénarios climatiques considérés (historique, RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5) avec une concentration en CO₂ fixe ou variable. Les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance à la moyenne ($\alpha = 0,05$). Pour une modalité de concentration en CO₂ et une espèce donnée, les scénarios avec des lettres communes ne sont pas significativement différents les uns des autres ($\alpha = 0,05$).

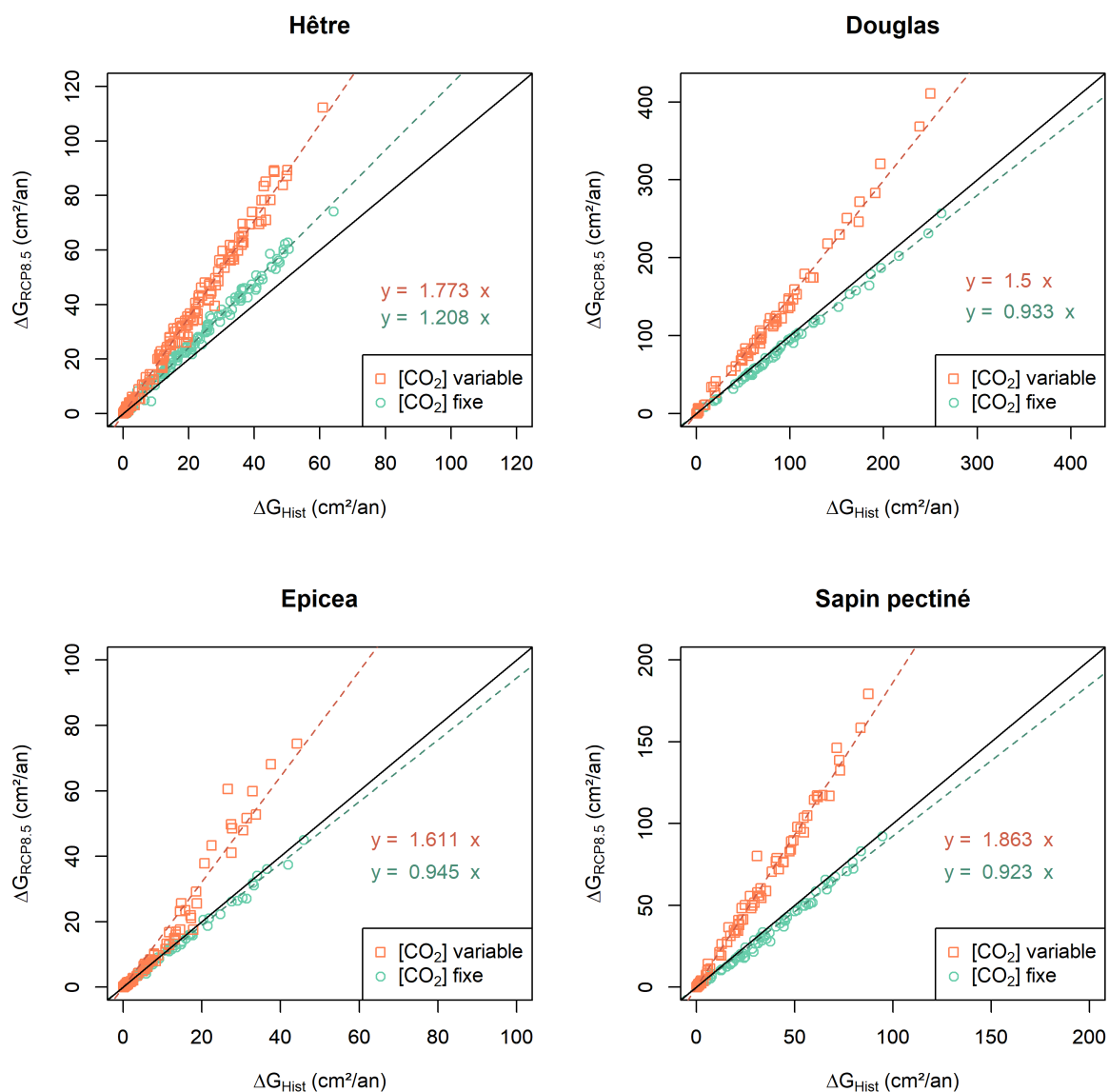


FIGURE 45 – Comparaison des accroissements annuels en surface terrière (ΔG) entre le scénario historique et le scénario RCP8.5 avec concentration en CO₂ fixe et variable pour les hêtres, douglas, épicéas et sapins pectinés. Les lignes pointillées représentent les régressions avec un intercept forcé à 0. Les équations de ces régressions sont affichées sur les graphiques.

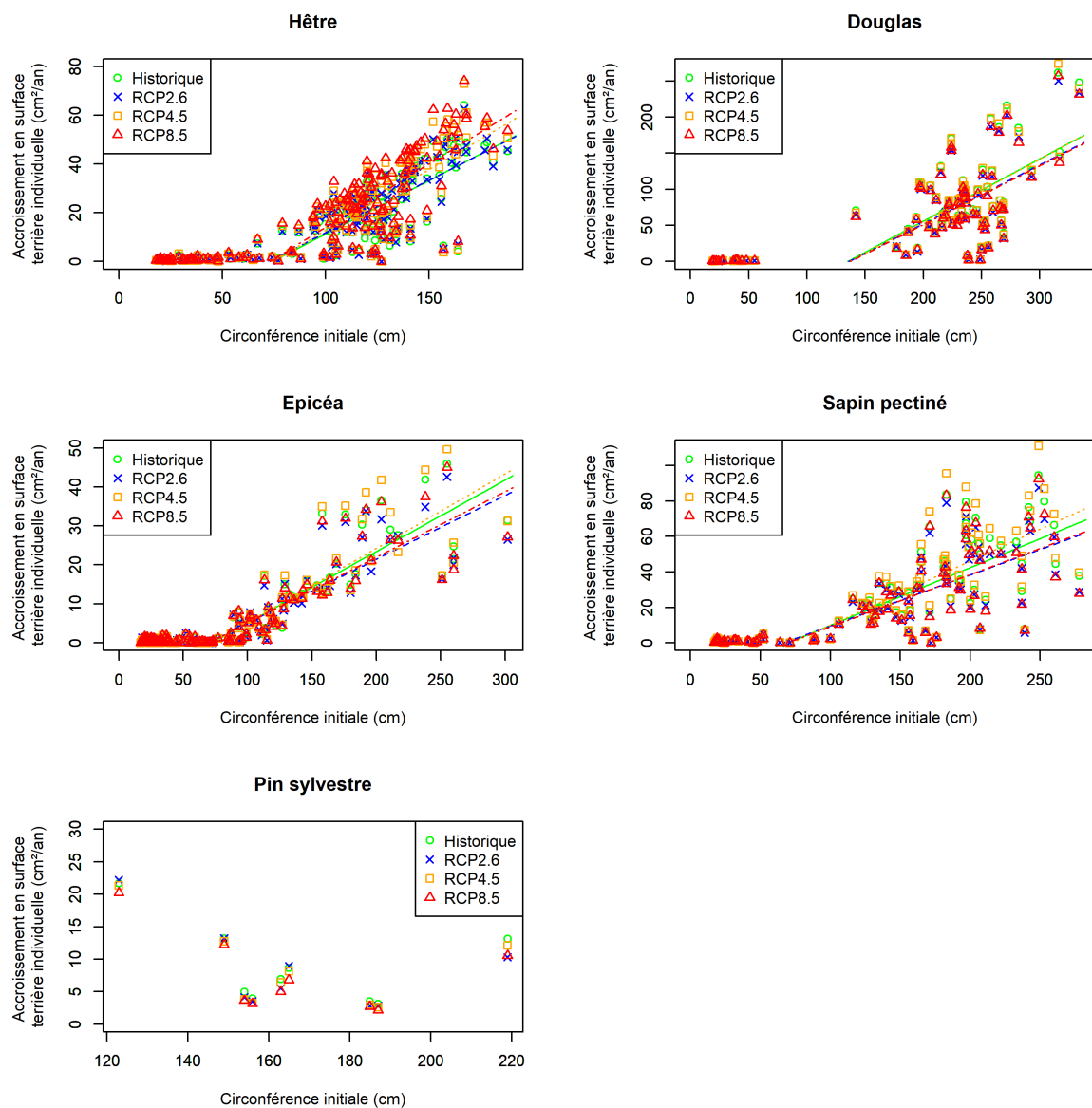


FIGURE 46 – Comparaison des relations taille-croissance pour différentes essences et pour les différents scénarios climatiques avec une concentration en CO_2 fixe. Les droites représentent la régression segmentée déterminant une circonférence seuil au-delà de laquelle la croissance radiale augmente linéairement avec la circonférence, ainsi que la pente de cette relation (voir aussi la Table 14). Les couleurs des droites se rapportent aux scénarios climatiques correspondant. Au vu du peu de données, les régressions ne sont pas effectuées pour le pin sylvestre.

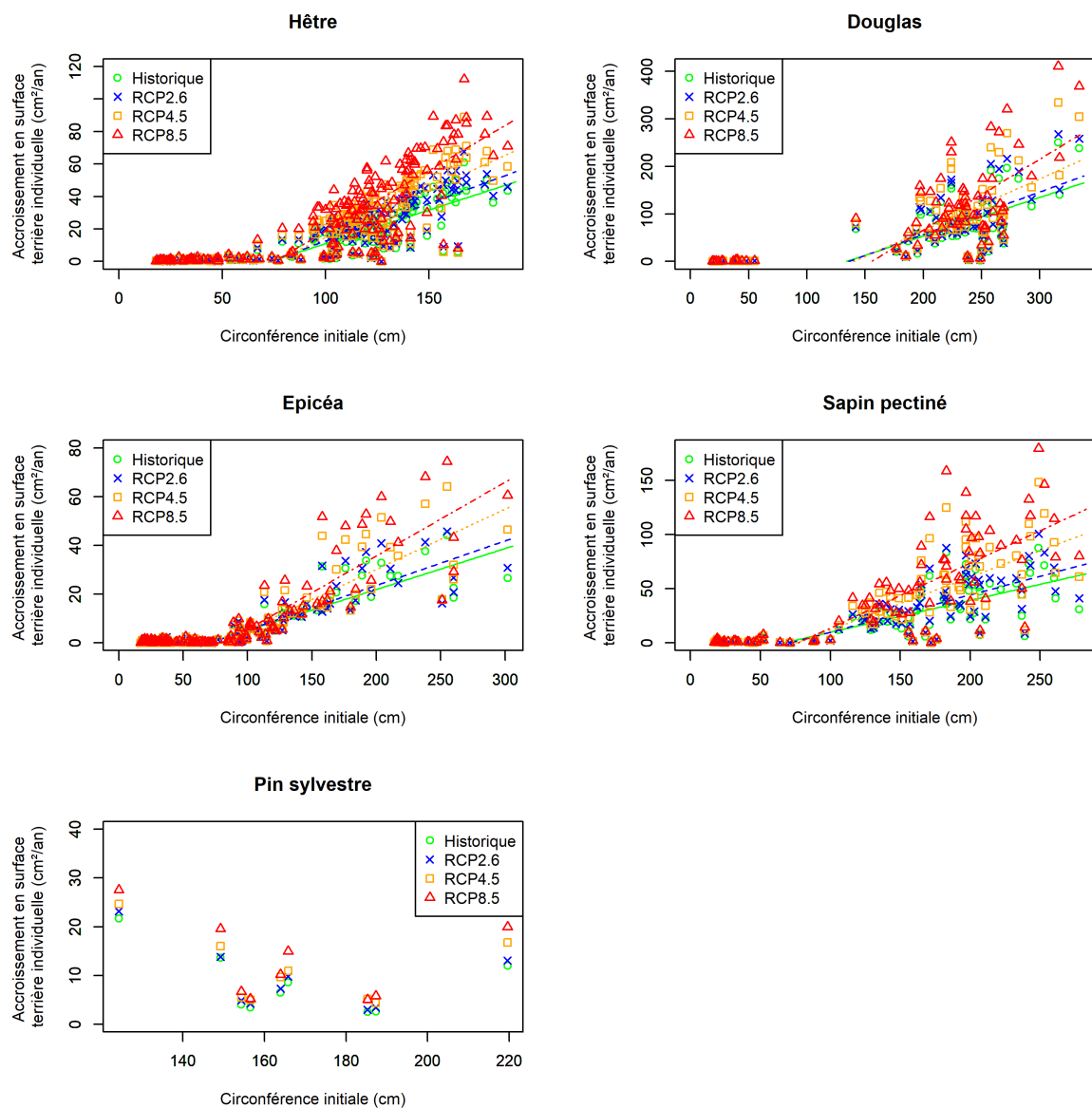


FIGURE 47 – Comparaison des relations taille-croissance pour différentes essences et pour les différents scénarios climatiques avec une concentration en CO_2 variable. Les droites représentent la régression segmentée déterminant une circonférence seuil au-delà de laquelle la croissance radiale augmente linéairement avec la circonférence, ainsi que la pente de cette relation (voir aussi la Table 14). Les couleurs des droites se rapportent aux scénarios climatiques correspondant. Au vu du peu de données, les régressions ne sont pas effectuées pour le pin sylvestre.

TABLEAU 14 – Ajustement des relations taille-croissance : résultats des régressions segmentées, affichées dans les Figures 46 et 47, déterminant une circonférence seuil au-delà de laquelle la croissance radiale augmente linéairement avec la circonférence, ainsi que la pente de cette relation pour différentes essences et pour les différents scénarios. Le seuil et la pente sont présentés avec leurs intervalles de confiance à 95%. Le R^2 des relations est également indiqué.

Essence	Scénario	Concentration en CO ₂ fixe			Concentration en CO ₂ variable		
		Seuil (cm)	Pente	R^2	Seuil (cm)	Pente	R^2
Hêtre	Historique	$74,2 \pm 0,7$	$0,438 \pm 0,005$	0,70	$73,3 \pm 0,7$	$0,413 \pm 0,005$	0,71
	RCP2.6	$72,6 \pm 0,7$	$0,430 \pm 0,005$	0,71	$72,8 \pm 0,7$	$0,464 \pm 0,005$	0,71
	RCP4.5	$74,5 \pm 0,6$	$0,500 \pm 0,005$	0,70	$74,7 \pm 0,5$	$0,583 \pm 0,005$	0,69
	RCP8.5	$73,2 \pm 0,6$	$0,522 \pm 0,005$	0,71	$75,0 \pm 0,4$	$0,749 \pm 0,005$	0,69
Douglas	Historique	$135,2 \pm 0,7$	$0,862 \pm 0,005$	0,48	$134,2 \pm 0,7$	$0,813 \pm 0,005$	0,48
	RCP2.6	$136,2 \pm 0,7$	$0,817 \pm 0,005$	0,48	$135,9 \pm 0,7$	$0,891 \pm 0,005$	0,49
	RCP4.5	$136,9 \pm 0,7$	$0,869 \pm 0,005$	0,48	$140,5 \pm 0,5$	$1,090 \pm 0,005$	0,48
	RCP8.5	$137,4 \pm 0,7$	$0,816 \pm 0,005$	0,47	$155,5 \pm 0,4$	$1,490 \pm 0,006$	0,49
Epicéa	Historique	$72,1 \pm 1,5$	$0,183 \pm 0,003$	0,83	$69,7 \pm 1,6$	$0,168 \pm 0,003$	0,82
	RCP2.6	$69,0 \pm 1,6$	$0,164 \pm 0,003$	0,82	$71,0 \pm 1,5$	$0,183 \pm 0,003$	0,81
	RCP4.5	$73,1 \pm 1,5$	$0,191 \pm 0,003$	0,80	$78,4 \pm 1,1$	$0,248 \pm 0,003$	0,80
	RCP8.5	$69,7 \pm 1,6$	$0,168 \pm 0,003$	0,81	$81,8 \pm 0,9$	$0,302 \pm 0,003$	0,79
Sapin pectiné	Historique	$69,8 \pm 1,4$	$0,326 \pm 0,004$	0,60	$67,2 \pm 1,5$	$0,296 \pm 0,004$	0,58
	RCP2.6	$66,6 \pm 1,6$	$0,287 \pm 0,004$	0,58	$71,6 \pm 1,3$	$0,345 \pm 0,004$	0,61
	RCP4.5	$72,3 \pm 1,3$	$0,361 \pm 0,004$	0,59	$75,5 \pm 0,9$	$0,488 \pm 0,004$	0,60
	RCP8.5	$69,4 \pm 1,5$	$0,295 \pm 0,004$	0,56	$77,1 \pm 0,7$	$0,599 \pm 0,004$	0,60

4 Discussion

Le modèle HETEROFOR a été évalué sur le site de l’Observatoire Terrestre de Vielsalm afin de voir s’il permettait de reproduire le fonctionnement d’une forêt complexe. Cette étape était indispensable pour pouvoir donner du crédit aux prédictions que l’on peut obtenir du modèle pour ce site. L’étape suivante était de réaliser des expériences de simulations sur base de scénarios climatiques pour identifier les possibles futures réponses de la forêt de Vielsalm au changement climatique global.

4.1 Reproduction des résultats observés à Vielsalm

Avec l’évaluation du modèle, on souhaite voir si le modèle est capable de reproduire les phénomènes observés sur un site très instrumenté.

Grâce aux mesures effectuées sur le site de Vielsalm, le cycle de l’eau a pu être évalué au niveau de différents flux. Les pluviolessivats sont intéressants à évaluer car ils dépendent de la capacité de stockage du feuillage, de l’évaporation et de la proportion d’écoulement de tronc. Les très bons résultats obtenus à l’échelle du peuplement lors de l’évaluation de cette variable laissent penser que l’évaporation et le partitionnement des précipitations lorsqu’elles atteignent la canopée sont correctement reproduits. C’est encourageant sachant que le couvert du site est assez complexe car composé de feuillus et de résineux. Par contre, l’inconvénient d’une mesure si intégrative est que des erreurs commises à différents niveaux pourraient se compenser et masquer des divergences. On peut regretter de ne disposer de données de validation que pour quelques mois en 2010, 2011 et 2019. Quelle que soit l’année, on ne dispose malheureusement d’aucune mesure entre décembre et février qui est pourtant une période intéressante vu l’état différent du couvert durant l’hiver.

Après calibration, les résultats de transpiration des arbres à l’échelle mensuelle et journalière sont bons. Comme pour les pluviolessivats, la validation n’est effectuée que sur une période limitée puisque l’on ne dispose de mesures qu’entre mai et octobre en 2010 et 2011. Par contre, il est appréciable de pouvoir évaluer la transpiration prédite par notre modèle individu-centré directement à l’échelle de l’arbre, même si le nombre d’arbres est limité (11 arbres répartis dans trois espèces). Les capteurs de flux de sève ne fournissent pas directement une mesure de transpiration, mais elle a pu être calculée en prenant en compte la surface d’aubier et le profil radial de densité de flux de sève pour les différentes espèces. Seul le profil radial de densité de flux de sève du sapin pectiné a été considéré identique à celui du douglas en l’absence d’informations à son sujet.

L’évaluation des teneurs en eau du sol a montré de bons résultats à l’échelle de la grande parcelle. Mais les mesures des différents profils laissent penser que la teneur en eau du sol n’est pas homogène pour tout le peuplement. Une forte variabilité des teneurs en eau du sol entre les différents points de mesure avait déjà été constatée dans la thèse de

Rémy Soubie (Soubie, 2014). Elle peut s'expliquer par l'hétérogénéité des caractéristiques du sol, comme par exemple la porosité, la charge caillouteuse ou la densité racinaire. Comme le fichier "sol" d'HETEROFOR renseigne des caractéristiques homogènes pour l'ensemble de la parcelle, il n'a pas été possible de prendre cette variabilité spatiale en compte. La structure et la composition du couvert impactent également la variabilité des précipitations arrivant au sol. Ce dernier point aurait pu être pris en compte grâce à une option alternative d'HETEROFOR qui permet de calculer les flux d'eau à l'échelle individuelle. Le sol est dans ce cas divisé en différents petits volumes appelés pédons pour lesquels le bilan d'eau est effectué individuellement. Cette option requiert un temps de calcul nettement plus important, ce qui a empêché qu'elle soit utilisée dans le cadre de ce mémoire. La sous-estimation de la réserve en eau utile relative relevée durant les périodes les plus sèches peut être mise en lien avec une surestimation de l'évapotranspiration.

Les mesures d'eddy covariance réalisées au-dessus de la canopée ont constitué une source d'information précieuse pour pouvoir valider le modèle du point de vue de l'évapotranspiration et de la PPB. Les différentes composantes de l'évapotranspiration mesurée par la tour à flux ne sont pas dissociées et elle a donc été comparée à la somme des prédictions pour les différents flux qui la composent. Mais si les mesures de flux de CO₂ par eddy covariance ont été largement validées, c'est moins le cas pour les mesures d'évapotranspiration. Nous avons remarqué que le modèle HETEROFOR prédisait en moyenne une évapotranspiration supérieure à celle qui était mesurée, surtout pour la grande parcelle. Dans une étude portant sur l'évapotranspiration de la forêt à Vielsalm, l'évapotranspiration a été estimée en 2010 et 2011 par quatre méthodes différentes afin de pouvoir les inter-valider : l'eddy covariance, un bilan hydrique du sol, une méthode analytique (mesure de chacun des flux élémentaires) et par modélisation grâce au modèle BILJOU (Soubie *et al.*, 2016). Il en est ressorti que la méthode d'eddy covariance menait aux estimations d'évapotranspiration les plus basses à l'échelle de la parcelle pour les deux années d'étude (de l'ordre de 10% inférieures à la moyenne des résultats obtenus avec les différentes méthodes), ce qui peut en partie expliquer les valeurs plus élevées obtenues avec HETEROFOR. Il arrive aussi d'avoir des mesures légèrement négatives de nuit, ce qui a tendance à faire baisser la moyenne générale des observations sur l'année. Concernant les prédictions durant la nuit, elles se maintiennent toujours au-dessus de 0. Elles sont peut-être légèrement surestimées car localement, dans le feuillage, l'air est à saturation et les données d'humidité relative du fichier météo peuvent être plus faibles et créer une demande évaporative en réalité inexistante. Le décalage nocturne entre les courbes d'évapotranspiration observées et prédites pourrait donc s'expliquer par une sous-estimation des mesures et une surestimation des prédictions.

En ce qui concerne la PPB, les résultats obtenus pour les secteurs hêtres sont particulièrement probants, sauf durant la période de débourrement où les prédictions sont sous-estimées. Le secteur mixte semble présenter la même divergence de manière atté-

nuée. Cette constatation n’a pas été faite durant l’automne qui est pourtant une autre période phénologique sensible. Bien que les périodes de débourrement prédites concordent avec celles établies sur base des mesures de PAR, allonger la période de débourrement des hêtres permettrait peut-être une reprise plus précoce de l’activité photosynthétique des hêtres. Notons que malgré l’absence de feuilles sur les hêtres durant l’hiver, la PPB (aussi bien prédite qu’observée) n’est pas nulle, ce qui peut notamment s’expliquer par la présence éparse de conifères dans les secteurs hêtre.

L’analyse des résultats du grand secteur douglas a en revanche mis en évidence une surestimation de la PPB débutant en hiver. Même pour les arbres sempervirents, la photosynthèse est fortement réduite durant cette saison et augmente progressivement durant les premiers mois de l’année. En décembre et janvier, la PPB prédite est trop élevée et la reprise progressive d’une activité photosynthétique plus intense s’effectue trop rapidement. Une série de phénomènes complexes non pris en compte par le modèle peuvent se produire en hiver. Si le sol est gelé, cela peut par exemple limiter la disponibilité en eau. Le froid peut causer des dommages aux arbres réduisant leur activité et nécessitant un temps d’adaptation avant de retrouver un fonctionnement optimal. Dans cette optique, une perspective d’amélioration pour le modèle HETEROFOR, actuellement étudiée, est l’implémentation d’une routine d’acclimatation hivernale.

Les mesures d’eddy covariance ont donc permis de mettre en évidence quelques grandes tendances dans l’évaluation de l’évapotranspiration et de la PPB calculées par le modèle. Nous devons néanmoins garder à l’esprit que faire la correspondance entre les mesures d’eddy covariance et les prédictions d’un modèle spatialement explicite et individu-centré comme HETEROFOR n’est pas trivial. En effet, le modèle prédit la PPB individuelle de chaque arbre dans la zone d’inventaire utilisée, et ce à l’échelle horaire. On a donc une résolution très fine qui ne peut pas être obtenue avec les mesures d’eddy covariance, puisque ce sont des mesures intégratives prises par un capteur unique pour le peuplement. Il est donc nécessaire de synthétiser les prédictions du modèle pour procéder aux comparaisons. Sommer la PPB des différents arbres en la rapportant à la superficie qu’ils occupent permet d’avoir une PPB à l’échelle de la parcelle. Celle-ci a donc pu être comparée aux mesures de flux. Mais même si les résultats obtenus sont déjà convaincants, de telles comparaisons négligent d’importantes sources de variabilité dans les mesures. En premier lieu, la direction du vent n’est pas prise en compte. Elle a pourtant son importance au vu de l’hétérogénéité et de la répartition des espèces au sein de la forêt. Dans les prédictions pour l’ensemble de la parcelle, la contribution de chaque arbre à la PPB globale ne dépend aucunement de sa position. Or, dans les mesures, la direction du vent fait jouer un rôle à la position des arbres par rapport à la tour. A Vielsalm, la direction majeure du vent est le sud-ouest. Si on considère l’ensemble des mesures de flux valables pour l’entièreté de la parcelle, la contribution des arbres au sud-ouest de la tour (principalement des hêtres) risque donc d’être surestimée. C’est pourquoi la délimitation de

différents secteurs a été opérée, en tenant compte de la répartition de la végétation. Pour chaque secteur, ne sélectionner que les données horaires pour lesquelles la direction du vent concorde permet d'être plus représentatif. La direction du vent peut aussi s'accompagner de conditions météorologiques spécifiques. Ainsi à Vielsalm, les deux directions de vent les plus fréquentes sont le sud-ouest souvent associé à des conditions perturbées, et le nord-est associé à des conditions anticycloniques. De plus, l'écart de hauteur entre les hêtres et les douglas peut entraîner des différences de turbulence pour les secteurs qui leur sont associés. Alors que la hauteur moyenne des hêtres ne dépasse pas les 30 mètres, celles des douglas est au-delà de 40 mètres (en considérant uniquement les arbres de plus de 20 mètres). La proximité de la canopée avec le point de mesure peut alors induire des biais (Hurdebise *et al.*, 2017). Deuxièmement, en plus de la direction du vent, les conditions atmosphériques déterminent une empreinte de mesure, que l'on appelle footprint et qui varie au cours du temps. La zone d'influence des mesures d'eddy covariance n'est pas fixe et ne peut certainement pas être assimilée directement aux secteurs qui ont été délimités. De plus, dans cette zone d'influence, la distance à la tour impacte la contribution d'un arbre à la mesure effectuée. Au pied de la tour la contribution est très faible, elle est maximale à quelques mètres et puis diminue progressivement sur plusieurs centaines de mètres (Soubie, 2014). Dans les zones d'inventaires utilisées avec HETEROFOR, la distance maximale à la tour est d'environ 80 mètres et il est donc impossible de prendre en compte la contribution d'arbres plus éloignés. Ces notions de footprint et de distance à la tour n'ont pas été prises en compte dans les comparaisons. Pour l'évaluation de la PPB (et de l'évapotranspiration), le côté individu-centré d'HETEROFOR n'est que partiellement exploité. Il nous permet de délimiter des secteurs pouvant être de composition mixte et pouvant répondre à la complexité de la forêt mais la méthode de mesure ne permet pas d'atteindre une résolution aussi détaillée que ce que ne le permet le modèle. On considère simplement que l'ensemble des arbres de la parcelle compris dans un certain secteur de vent est représentatif de la zone qui influence la mesure d'eddy covariance à un moment donné. Cette hypothèse est évidemment pertinente dans un environnement très homogène. Sur le site hétérogène de Vielsalm, on peut la considérer valable parce que feuillus et résineux occupent des secteurs de vent assez bien définis autour de la tour (Aubinet *et al.*, 2005). Les résultats obtenus pour la PPB du petit secteur douglas n'étaient pas très convaincants, surtout par rapport aux autres secteurs. Seuls une quarantaine d'arbres de notre peuplement étant compris dans ce secteur, on peut penser qu'il est moins représentatif. Un autre inconvénient des mesures d'eddy covariance est qu'elles nécessitent des conditions atmosphériques suffisamment turbulentes, elles ont donc subi des traitements et des procédures de remplacements qui sont sources d'erreur, comme c'est aussi le cas pour le partitionnement des mesures de NEE en PPB et respiration de l'écosystème.

Finalement, la croissance des arbres a été validée sur base de données d'inventaire.

Seule la croissance radiale a été évaluée car la circonférence du tronc à hauteur de poitrine est la seule variable pour laquelle nous disposons de mesures pour chacun des arbres. L'établissement des relations taille-croissance a montré que l'on pouvait reproduire des relations linéaires expliquant l'accroissement en surface terrière en fonction de la circonférence initiale du tronc, à partir d'un certain seuil de circonférence initiale. L'augmentation d'accroissement en surface terrière avec la circonférence initiale s'explique d'abord par une raison purement géométrique, puisque pour une même augmentation de rayon, la surface gagnée par le tronc d'un grand arbre est plus importante que pour celui d'un petit. L'autre raison est que les arbres de plus grande circonférence sont généralement les plus hauts et ont donc un accès facilité à la lumière. Cet aspect est pris en compte par le module d'interception du rayonnement basé sur une approche de lancer de rayons et semble même exagéré pour certaines essences pour lesquelles la pente des relations taille-croissance prédite est surestimée. HETEROFOR utilise une représentation détaillée de la structure des arbres et il est pour cela nécessaire de renseigner diverses dimensions caractéristiques pour chaque arbre. Pour la plupart des arbres, la hauteur totale et les rayons de couronne ont été estimés grâce à des relations se basant sur les mesures de circonférence à hauteur de poitrine. La croissance en hauteur et la croissance radiale du houppier n'ont donc pas été directement évaluées. Ce sont néanmoins des variables qui influent sur la structure de la canopée impactant de nombreux processus. Des erreurs liées à l'interception de la lumière pourraient expliquer la tendance à surestimer les circonférences seuils des relations taille-croissance, engendrant plus de difficultés à reproduire la croissance des arbres dominés à la limite de la survie. Une autre explication possible serait que l'utilisation de la lumière par les arbres dominés n'est pas aussi efficace dans le modèle que ce qu'elle ne l'est dans la réalité. Le modèle prend pourtant en compte le fait que les arbres dominés ont une meilleure efficacité d'utilisation de la lumière, du fait notamment d'un pourcentage de feuilles d'ombre plus important, mais peut-être pas de manière suffisante.

4.2 Expériences de simulation pour le futur à Vielsalm

Après avoir validé le modèle sur le site de Vielsalm, des expériences de simulation ont été réalisées pour évaluer l'impact futur du changement climatique sur ce site d'étude. Les simulations effectuées n'ont pas pour but de prédire quel sera l'état de la forêt d'ici la fin du siècle. La circonférence des arbres obtenue au terme des 30 années d'évolution n'est par exemple pas représentative de ce à quoi on s'attend à observer en 2100. En effet, les simulations ne débutent qu'en 2070 et le peuplement initial est dans l'état dans lequel il était en 2015. De plus, il est réinitialisé à mi-parcours, annulant entre autres l'effet de la croissance effectuée durant les 15 premières années de simulation. Or, il est évident que la forêt aura subi des modifications non négligeables entre 2015 et 2070

et que la réinitialisation du peuplement n'est pas réaliste. On cherche uniquement à mettre en lumière l'impact du changement climatique sur le comportement de la forêt. La modification des caractéristiques du peuplement au cours du temps est plutôt vue comme un effet parasite. Dans cette optique, il aurait même été préférable de lancer chaque année une nouvelle simulation à partir du même peuplement initial, comme cela a été fait pour différentes forêts wallonnes dans de Wergifosse *et al.* (2020b). Mais effectuer autant de simulations, ainsi que l'exportation et le traitement de leurs résultats aurait été bien plus fastidieux ou aurait nécessité des procédures d'automatisation.

Les scénarios RCP choisis par le GIEC couvrent une large gamme de changements futurs possibles pour le forçage radiatif. Trois de ces scénarios ont été adaptés à l'échelle locale par l'IRM pour les années 2070 à 2100. En climatologie, il est d'usage de travailler sur des périodes de 30 ans, une durée suffisamment longue pour être représentative sans que les changements climatiques au cours de celle-ci ne soient trop importants. Le fait de travailler avec une période démarrant en 2070, et non plus rapprochée de nos jours, permet d'avoir des conditions climatiques sensiblement différentes de celles de la période historique, induisant des changements notables dans le fonctionnement de la forêt. Les projections utilisées sont obtenues à partir d'un modèle climatique de l'IRM auquel sont associées des erreurs et incertitudes. L'utilisation de modèles climatiques différents induirait des changements dans les variables climatiques considérées. Si l'augmentation graduelle de la température avec l'intensification du forçage radiatif ne fait pas de doute, l'amplitude des changements pourrait varier. Quant aux précipitations, les variations attendues sous nos latitudes sont plus discutables. La plupart des modèles projettent une augmentation des précipitations durant l'hiver. Durant l'été, les modèles globaux suggèrent qu'une réduction des précipitations est possible mais cela n'est pas mis en évidence par les modèles régionaux qui sont plus raffinés. Dans tous les cas, les incertitudes sur les précipitations sont grandes (Marbaix, 2020). A l'échelle annuelle, les projections utilisées montrent en moyenne une légère baisse pour le scénario RCP2.6 (-1,3%) et une augmentation conséquente pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (respectivement +16,0% et +19,6%)(Tableau6). Il aurait été intéressant de comparer les résultats avec ceux d'autres projections qui ne prévoiraient par exemple pas une telle augmentation de précipitations pour ces scénarios, favorisant ainsi le stress hydrique.

Avec les projections utilisées, les résultats ont montré que les variations de la PPB et de la croissance radiale entre les différents scénarios étaient limitées en considérant la concentration en CO₂ atmosphérique fixe, alors qu'une nette tendance à l'augmentation s'est démarquée avec l'intensification du changement climatique en considérant l'élévation de la concentration en CO₂ atmosphérique (Figures 43 et 44). L'augmentation de productivité de la forêt est donc expliquée principalement par le facteur CO₂. Mais on a également noté que l'intensification du changement climatique favorisait l'accroissement et la PPB du hêtre, même lorsque la concentration en CO₂ est fixée. Cela pourrait

s'expliquer par l'allongement de la période de végétation du hêtre (seule essence feuillue parmi les quatre majoritairement présentes sur le site), qui a été mis en évidence à la Figure 40. Le seuil de débourrement est atteint plus rapidement grâce à l'augmentation globale de température, et le jaunissement est retardé. Une étude menée entre 1997 et 2014 (Hurdebise *et al.*, 2019) tendait cependant à montrer que l'augmentation de température réduisait la longueur de la saison de végétation des hêtres à Vielsalm, sans pour autant affecter significativement la PPN de la forêt. Comme prévu avec HETEROFOR, le démarrage de la saison de végétation serait plus précoce mais il serait aussi plus lent. Quant à la fin de la période de végétation, elle serait aussi avancée car la précocité du débourrement se répercuterait jusqu'à la fin de la saison menant à l'avancement de la chute des feuilles et même à un raccourcissement général de la période de végétation. Cela suggère que la productivité des hêtres pourrait baisser. HETEROFOR ne prend pas en compte de dépendance entre le début et la fin de vie des feuilles et prévoit donc plutôt un allongement de la période de végétation. Mais l'étude d'Hurdebise *et al.* (2019) porte sur une période passée assez courte et l'allongement de la période de végétation avec le réchauffement climatique est par ailleurs reconnu (Liu *et al.*, 2018).

Concernant le cycle de l'eau, on s'est intéressé à l'évapotranspiration. Celle-ci est censée augmenter avec la température, qui favorise l'ouverture des stomates mais dépend aussi des précipitations, car l'eau doit être disponible pour pouvoir être transpirée ou évaporée. Il n'est donc pas surprenant que les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 affichent une évapotranspiration en hausse par rapport à la période historique puisqu'aussi bien la température que les précipitations sont plus élevées. En revanche, pour le scénario RCP2.6, l'augmentation de température plus modérée n'a pas suffi à augmenter l'évapotranspiration, qui semble même baisser. Les précipitations, légèrement en baisse par rapport à la période historique, semblent donc avoir un effet limitant sur l'évapotranspiration. Le déficit de transpiration (Figure 42) était d'ailleurs clairement plus élevé pour le RCP2.6 que pour le RCP4.5, quelles que soient les conditions ou l'espèce. Avec une concentration en CO₂ fixe, on notait cependant que le déficit de transpiration était également plus élevé pour le scénario RCP8.5, qui montrait pourtant une hausse de l'évapotranspiration. Cela s'explique bien sûr par les précipitations plus importantes, qui permettent d'évapotranspirer une plus grande quantité d'eau avant de subir le déficit de transpiration. Le passage à une modalité de concentration en CO₂ variable a cependant fait chuter ce déficit hydrique pour le scénario RCP8.5. On peut penser que la grande concentration de CO₂ dans l'atmosphère facilite l'assimilation de carbone et que la fermeture des stomates a alors été favorisée pour limiter la transpiration. L'efficacité d'utilisation de l'eau se voit ainsi améliorée par une plus grande quantité de carbone assimilée par unité d'eau transpirée. De manière générale, quelque soit le scénario considéré, les déficits hydriques obtenus restent faibles, puisqu'ils ne dépassent pas 40 mm/an en moyenne. La forêt de Vielsalm semble peu sujette au stress hydrique. L'effet de l'augmentation de température est soit

limité (RCP2.6), soit contrebalancé par des précipitations accrues (RCP4.5 et RCP8.5) et par l'augmentation de la concentration en CO_2 qui permet une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau.

Les simulations effectuées présentent cependant des limites. Pour commencer, aucune des deux modalités de CO_2 utilisées n'est véritablement réaliste. Comme l'augmentation de la concentration en CO_2 est le facteur principal expliquant la croissance de la forêt, elle ne peut être négligée, comme c'est le cas avec la modalité fixe. La modalité variable semble donc plus plausible mais considère que le statut nutritionnel des arbres reste inchangé. Or, en conditions réelles, l'augmentation de la productivité de la forêt s'accompagne d'une demande en nutriments accrue. Rien ne garantit qu'elle puisse être comblée et la croissance risque donc d'être limitée par la disponibilité en nutriments. Les deux modalités de CO_2 utilisées illustrent donc deux cas extrêmes et on s'attend plutôt à des changements intermédiaires entre ceux obtenus avec la modalité de concentration en CO_2 fixe et ceux obtenus avec la modalité de concentration en CO_2 variable. Ils seraient plus proches de ceux de la modalité fixe pour les sites les plus pauvres où le statut nutritionnel des arbres serait fortement détérioré et plus proches de ceux de la modalité variable quand les conditions nutritionnelles sont peu limitantes. Un module de nutrition minérale et de cycle des nutriments a été développé pour HETEROFOR mais n'a pas encore été documenté et n'était pas pleinement opérationnel pour la réalisation de ce mémoire. Dans le futur, son utilisation devrait permettre de faire des projections prenant en compte cet aspect.

Une autre limite concerne les effets à long terme d'une perturbation. Lors d'une sécheresse prolongée par exemple, le comportement de l'écosystème est modifié, ce qui est pris en compte dans le modèle tant que la réserve en eau du sol est limitée. Une fois la perturbation passée, les processus impactés, comme la transpiration des arbres, reprennent leur fonctionnement initial. Cependant, en conditions réelles, une telle perturbation pourrait entraîner de la cavitation chez certains arbres, endommageant leur système hydraulique à plus long terme (cet affaiblissement de l'arbre peut aller jusqu'à provoquer la mort en cas de stress hydrique très intense). De même, les réserves carbonées de l'arbre pourraient ne plus être suffisantes pour lui permettre de reconstruire ses feuilles. La disponibilité en eau ne suffirait alors plus à retrouver un fonctionnement normal. Avec l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes liée aux changements climatiques, ce genre de phénomènes pourraient prendre de plus en plus d'ampleur dans le futur. Les expériences de simulation proposées permettent donc d'évaluer l'impact général du climat moyen durant les 30 années considérées mais ne rendent compte que de manière limitée des perturbations ponctuelles. Une piste d'amélioration serait donc d'envisager une meilleure prise en compte des événements extrêmes en considérant que certains aspects du fonctionnement des forêts sont moins réversibles que d'autres.

5 Conclusion

Nous avons pu mener à bien une validation rigoureuse du modèle HETEROFOR sur le site de l'Observatoire Terrestre de Vielsalm. La qualité et la richesse des mesures effectuées sur ce site ont permis d'évaluer différentes variables relatives à la phénologie, au cycle de l'eau, au cycle du carbone et à la croissance des arbres. En particulier, les mesures d'eddy covariance prises au sommet de la canopée ont constitué une source d'informations précieuses pour évaluer la production primaire brute et l'évapotranspiration. La complexité du site, composé d'un mélange de feuillus et de résineux, a été l'occasion de mettre le modèle HETEROFOR à l'épreuve. Dans l'ensemble, les résultats obtenus sont cohérents et ont donné satisfaction. Ils nous permettent d'avoir confiance dans les prédictions réalisées avec HETEROFOR pour le site de Vielsalm. Nous avons ainsi pu réaliser des expériences de simulation à l'aide de projections climatiques. Il en est ressorti que le changement climatique semblait augmenter la productivité de la forêt de Vielsalm, peu sujette au stress hydrique. Nous devons cependant garder à l'esprit que le modèle a certaines limites et que des améliorations sont possibles. Parmi elles, nous pensons à l'intégration du module de nutrition minérale et de cycle des nutriments, ainsi qu'à l'adoption d'une routine d'acclimatation hivernale de la photosynthèse pour les conifères. La prise en compte de l'impact des événements extrêmes pourrait aussi être améliorée par la considération de dommages irréversibles qu'ils pourraient provoquer, comme la cavitation. Bien sûr, de nombreuses autres améliorations sont possibles. On ne sera jamais capable de prédire et simuler exactement la croissance des forêts. Mais nous avons montré que la modélisation apparaît comme un outil intéressant et pertinent pour leur gestion, particulièrement dans le contexte d'incertitudes liées aux changements climatiques.

Références

- ANDRÉ, F., de WERGIFOSSE, L. et JONARD, M. (2019). Amélioration des itinéraires sylvicoles pour une foresterie durable dans un environnement changeant. *Forêt.Nature*, 152:44–52.
- AUBINET, M., HEINESCH, B., PERRIN, D. et MOUREAUX, C. (2005). Discriminating net ecosystem exchange between different vegetation plots in a heterogeneous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132(3-4):315–328.
- AUBINET, M., HURDEBISE, Q., CHOPIN, H., DEBACQ, A., DE LIGNE, A., HEINESCH, B., MANISE, T. et VINCKE, C. (2018). Inter-annual variability of Net Ecosystem Productivity for a temperate mixed forest : A predominance of carry-over effects? *Agricultural and Forest Meteorology*, 262:340–353.
- BAAR, F., AUQUIÈRE, P., BALLEUX, P., BARCHMAN, G., DEBOIS, C., de WOUTERS, P., GRAUX, G., LETOCART, M. et VAN DRIESSCHE, I. (2008). Sylviculture pro silva : définitions, objectifs et mesures sylvicoles préconisées. *Forêt Wallonne*, 95:10–25.
- BOSC, A. (2000). Emilion, a tree functional-structural model : Presentation and first application to the analysis of branch carbon balance. <http://dx.doi.org/10.1051/forest:2000142>, 57.
- COURBAUD, B., COLIGNY, F. et CORDONNIER, T. (2003). Simulating radiation distribution in a heterogeneous norway spruce forest on a slope. *Agricultural and Forest Meteorology*, 116:1–18.
- DE LIGNE, A. et MANISE, T. (2016). Documentation on the Terrestrial Observatory of Viesalm (OTV).
- de WERGIFOSSE, L., ANDRÉ, F., BEUDEZ, N., de COLIGNY, F., GOOSSE, H., JONARD, F., PONETTE, Q., TITEUX, H., VINCKE, C. et JONARD, M. (2020a). 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.
- de WERGIFOSSE, L., ANDRÉ, F., GOOSSE, H., CALUWAERTS, S., de CRUZ, L., de TROCH, R., VAN SCHAEYBROECK, B. et JONARD, M. (2020b). CO₂ fertilization, transpiration deficit and vegetation period drive the response of mixed broadleaved forests to a changing climate in Wallonia. *Annals of Forest Science*, 77(3):70.
- DUFOUR-KOWALSKI, S., COURBAUD, B., DREYFUS, P., MEREDIEU, C. et de COLIGNY, F. (2012). Capsis : an open software framework and community for forest growth modelling. *Annals of Forest Science*, 69(2):221–233.

- DUFRÊNE, E., DAVI, H., FRANÇOIS, C., le MAIRE, G., DANTEC, V. L. et GRANIER, A. (2005). Modelling carbon and water cycles in a beech forest : Part i : Model description and uncertainty analysis on modelled net. *Ecological Modelling*, 185(2):407 – 436.
- DUURSMA, R. A. et MEDLYN, B. E. (2012). Maespa : a model to study interactions between water limitation, environmental drivers and vegetation function at tree and stand levels, with an example application to CO₂ x drought interactions. *Geoscientific Model Development*, 5(4):919–940.
- GROTE, R. et PRETZSCH, H. (2002). A model for individual tree development based on physiological processes. *Plant Biology*, 4:167–180.
- HURDEBISE, Q., AUBINET, M., HEINESCH, B. et VINCKE, C. (2019). Increasing temperatures over an 18-year period shortens growing season length in a beech (*Fagus sylvatica* L.)-dominated forest. *Annals of Forest Science*, 76(3):75.
- HURDEBISE, Q., HEINESCH, B., DE LIGNE, A., VINCKE, C. et AUBINET, M. (2017). Impact of canopy aerodynamic distance spatial and temporal variability on long term eddy covariance measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247:131–138.
- JONARD, F., ANDRÉ, F., PONETTE, Q., VINCKE, C. et JONARD, M. (2011). Sap flux density and stomatal conductance of European beech and common oak trees in pure and mixed stands during the summer drought of 2003. *Journal of Hydrology*, 409(1-2):371–381.
- JONARD, M., ANDRÉ, F., de COLIGNY, F., de WERGIFOSSE, L., BEUDEZ, N., DAVI, H., LIGOT, G., PONETTE, Q. et 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.
- JONARD, M., FÜRST, A., VERSTRAETEN, A., THIMONIER, A., TIMMERMANN, V., POTČIĆ, N., WALDNER, P., BENHAM, S., HANSEN, K., MERILÄ, P., PONETTE, Q., de la CRUZ, A. C., ROSKAMS, P., NICOLAS, M., CROISÉ, L., INGERSLEV, M., MATTEUCCI, G., DECINTI, B., BASCIETTO, M. et RAUTIO, P. (2015). Tree mineral nutrition is deteriorating in Europe. *Global Change Biology*, 21(1):418–430.
- LIGOT, G. (2014). *Managing understory light to maintain the coexistence of forest tree species with different shade tolerances*. Thèse de doctorat, Prom. : Lejeune, P.
- LIU, Q., PIAO, S., JANSSENS, I., FU, Y., PENG, S., LIAN, X., CIAIS, P., MYNENI, R., PENUELAS, J. et WANG, T. (2018). Extension of the growing season increases vegetation exposure to frost. *Nature Communications*, 9.

- MARBAIX, P. (2020). Évolution du climat en wallonie : Vive la pluie ? *Ressources en eau et climat La Wallonie en manque de pluie ? (1/2)*, pages 2–8.
- PRETZSCH, H., FORRESTER, D. I. et RÖTZER, T. (2015). Representation of species mixing in forest growth models. a review and perspective. *Ecological Modelling*, 313:276 – 292.
- SEIDL, R., RAMMER, W., SCHELLER, R. M. et SPIES, T. A. (2012). An individual-based process model to simulate landscape-scale forest ecosystem dynamics. *Ecological Modelling*, 231:87–100.
- SIMIONI, G., MARIE, G. et HUC, R. (2016). Influence of vegetation spatial structure on growth and water fluxes of a mixed forest : Results from the notg 3d model. *Ecological Modelling*, 328:119 – 135.
- SOUBIE, R. (2014). *Évaluation de l'évapotranspiration réelle, de ses composantes et de sa régulation dans un peuplement composé de hêtre et de douglas : analyse comparative de l'effet espèce et des méthodes d'évaluation*. Thèse de doctorat, Prom. : Vincke, C.
- SOUBIE, R., HEINESCH, B., GRANIER, A., AUBINET, M. et VINCKE, C. (2016). Evapotranspiration assessment of a mixed temperate forest by four methods : Eddy covariance, soil water budget, analytical and model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228-229:191–204.
- WUTZLER, T., LUCAS-MOFFAT, A., MIGLIAVACCA, M., KNAUER, J., SICKEL, K., ŠIGUT, L., MENZER, O. et REICHSTEIN, M. (2018). Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc. *Biogeosciences*, 15(16):5015–5030.

Modélisation de la production primaire brute et de l'évapotranspiration dans une forêt de hêtre et de douglas et simulations selon différents scénarios climatiques

Le changement climatique impacte le fonctionnement des forêts en modifiant différents facteurs qui régulent leur croissance tels que la température, les précipitations et la concentration en CO₂ atmosphérique. L'intensité et la fréquence des événements extrêmes sont aussi modifiées. Certains de ces changements impactent positivement la croissance des forêts, tandis que d'autres ont un effet négatif. Comme ces facteurs interagissent les uns avec les autres, il peut être difficile de prévoir l'effet général du changement climatique sur une forêt particulière. Face à cette incertitude, la diversification des forêts par mélange d'espèces et d'âges est préconisée. Elle permet d'augmenter la résilience de l'écosystème en présentant une variété de réponses aux perturbations. Mais cela rend aussi les forêts plus compliquées à comprendre et à gérer. On peut donc se demander d'une part quelle est la réponse des forêts au changement climatique et d'autre part comment prédire l'évolution d'une forêt complexe. Des réponses peuvent être apportées par la modélisation car elle permet d'intégrer les connaissances des différents processus qui gouvernent la croissance des forêts. HETEROFOR, un modèle spatialement explicite et individu-centré, a été utilisé pour simuler l'évolution d'une forêt complexe située à Vielsalm. La richesse des mesures relevées sur ce site d'étude a permis d'effectuer une évaluation rigoureuse et convaincante du modèle en se basant sur différents critères relatifs à la phénologie, au cycle de l'eau, au cycle du carbone et à la croissance des arbres. En particulier, la production primaire brute et l'évapotranspiration ont pu être évaluées grâce à des mesures d'eddy covariance relevées au sommet de la canopée. Différents scénarios climatiques ont ensuite été utilisés pour simuler l'évolution future du site. Les résultats ont montré que le changement climatique semblait augmenter la productivité de la forêt de Vielsalm. Les limites du modèle doivent cependant être gardées à l'esprit et des améliorations sont possibles telles que la considération de contraintes nutritionnelles et une meilleure prise en compte de l'impact à long terme des événements extrêmes.

Guillaume De Meue