

Evaluation de l'impact de la réserve en eau du sol sur la croissance du tilleul à petites feuilles (*Tilia cordata*) à l'aide de l'outil de modélisation Hydrus

Auteur : Tasseroul, Marie-Pierre

Promoteur(s) : Degré, Aurore; Claessens, Hugues

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels, à finalité spécialisée

Année académique : 2018-2019

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/8179>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

**EVALUATION DE L'IMPACT DE LA RÉSERVE EN EAU DU SOL
SUR LA CROISSANCE DU TILLEUL À PETITES FEUILLES (*TILIA
CORDATA*) À L'AIDE DE L'OUTIL DE MODÉLISATION
*HYDRUS***

MARIE-PIERRE TASSEROUL

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS

ANNÉE ACADÉMIQUE 2018-2019

CO-PROMOTEURS : HUGUES CLAESSENS & AURORE DEGRE

©Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

**EVALUATION DE L'IMPACT DE LA RÉSERVE EN EAU DE SOL
SUR LA CROISSANCE DU TILLEUL À PETITES FEUILLES (*TILIA
CORDATA*) À L'AIDE DE L'OUTIL DE MODÉLISATION
*HYDRUS***

MARIE-PIERRE TASSEROUL

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2018-2019

CO-PROMOTEURS : HUGUES CLAESSENS & AURORE DEGRE

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier l'ensemble du corps professoral de la Faculté de Gembloux Agro-Bio Tech pour l'enseignement et la formation qu'ils m'ont dispensés durant mes années d'étude, et sans lesquels, je n'aurais pu mener à bien ce projet.

J'aimerais remercier de manière plus spécifique mes co-promoteurs, Pr. Hugues Claessens et Pr. Aurore Degré, pour leur disponibilité, leur soutien, leurs conseils et leur encadrement de manière générale durant la réalisation de ce travail.

Un grand merci également à Katia Berghmans pour m'avoir guidée durant mes démarches administratives, à Stéphane Becquevort pour son aide durant la phase d'échantillonnage et également pour son suivi durant mes analyses en laboratoire. Je n'oublie évidemment pas Vincent Cantreul, que je remercie pour sa disponibilité et ses précieux conseils durant toute la phase de modélisation du projet. Merci également à Nicolas Latte et à Philippe Taverniers qui m'ont apporté leurs connaissances et de nombreuses informations nécessaires au bon déroulement de cette recherche.

Je remercie également les agents forestiers et les propriétaires privés pour leur gentillesse, pour m'avoir permis de réaliser des prélèvements au sein de leurs parcelles, et pour l'intérêt qu'ils ont manifesté face à ce projet.

J'en viens maintenant aux personnes de mon entourage proche qui ont eu leur importance durant mon passage à Gembloux.

Tout d'abord, j'aimerais remercier mes amis, qui chacun à leur manière, m'ont permis de tenir la distance durant ces longs mois de labeur, et sans qui, mes années d'étude n'auraient pu être les mêmes.

Merci également à toi, Charly, pour ton soutien de manière général, pour m'avoir accompagnée sur le terrain par tous les temps possibles, et pour m'avoir donné des conseils avisés concernant mon travail, me permettant ainsi de prendre le recul suffisant pour l'aborder sereinement.

Un immense merci à Caroline Dubourg pour son regard critique apporté à l'ensemble de mes questions et de mes choix, qui m'a permis d'avancer toujours plus dans cette recherche.

Enfin, je ne remercierai sans doute jamais assez Marie Preux pour sa disponibilité sans faille durant l'entièreté de mon travail, pour ses commentaires et sa relecture générale, ainsi que pour ses remarques judicieuses sur la forme de mon écrit.

Je ne peux achever ces remerciements sans adresser à ma famille ma reconnaissance la plus sincère, et plus particulièrement à mes parents, Alfred Tasseroul et Chantal Detry. Papa, Maman, merci à vous pour l'intérêt que vous avez témoigné à mes études, à mes choix de stage, et, plus particulièrement, à mon travail de fin d'étude. Je n'oublierai jamais vos encouragements durant les périodes plus dures et votre confiance tout au long de mon parcours. Du fond du cœur, merci à vous.

Résumé

L'évaluation de la réserve en eau du sol et le rôle qu'elle joue dans la croissance des arbres sont deux sujets de préoccupation du monde forestier. Le tilleul à petites feuilles (*Tilia cordata* Mill) semble être, quant à lui, une essence bien armée pour faire face aux changements climatiques de par sa tolérance et ses stratégies de survie. L'objectif de cette recherche est donc d'évaluer l'impact de la réserve en eau du sol sous peuplement depuis 1961 sur la croissance du *T. cordata*. Pour ce faire, le sol en présence a été caractérisé et les flux d'eau en son sein ont été modélisés à l'aide du programme *Hydrus*. Sur base des données fournies par la modélisation, l'évolution de la réserve en eau au cours du temps a été analysée à travers différents indicateurs. Ceux-ci ont permis de définir le niveau de sécheresse hydrique du sol rencontré. Enfin, ces variables ont été mises en relation avec l'indice de largeur de cerne du tilleul à petites feuilles afin de mesurer le niveau de corrélation réserve hydrique-cernes. Cette étude a été réalisée sur deux sites localisés en Wallonie. Le nombre de jours secs rencontrés durant la période s'étendant de mai à juillet a montré la meilleure corrélation (négative) avec le développement de l'arbre. Les résultats ont également démontré que ces mois étaient sensibles aux valeurs maximales et minimales enregistrées durant cette période par la réserve en eau du sol (corrélation positive).

Mots-clés : *Tilia cordata*, tilleul à petites feuilles, Wallonie, sécheresse, croissance radiale, réserve en eau utile, modélisation, *Hydrus*

Abstract

The assessment of the soil water reserve and the role it plays in tree growth are two areas of concern for the forest community. The small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill) appears to be a well-armed species to deal with climate change by its tolerance and survival strategies. The objective of this research is therefore to evaluate the impact of the soil water reserve under settlement since 1961 on the growth of *T. cordata*. To achieve this goal, the soil involved was characterized and the water flows within it were modelled using the *Hydrus* program. Based on the data provided by the modelling, the evolution of the water reserve over time has been analyzed through different indicators. These allowed to define the level of water drought of the soil encountered. Finally, these indices were related to the radial growth index of the small-leaved lime to measure the level of correlation between water reserve and ring width. This study was carried out in two sites located in Wallonia. The number of dry days encountered during the period from May to July showed the best (negative) correlation with the development of the tree. The results also showed that these months were sensitive to the maximum and minimum values recorded during this period by the soil water reserve (positive correlation).

Key-words: *Tilia cordata*, small-leaved lime, Wallonia, drought, radial growth, useful water reserve, modelling, *Hydrus*

Table des matières

Remerciements	3
Résumé.....	4
Abstract	4
1. Introduction.....	11
2. Synthèse bibliographique.....	12
2.1. <i>Tilia Cordata</i> , un arbre d'avenir ?.....	12
2.1.1. Répartition spatiotemporelle	12
2.1.2. Description autécologique et caractéristiques biologiques	14
2.1.3. Sylviculture et qualité du bois	15
2.1.4. Ses perspectives d'avenir face au changement climatique.....	16
2.2. Hydrologie : interactions eau-sol- plante en milieu forestier	17
2.2.1. Stockage de l'eau par le sol	17
a) Texture.....	18
b) Structure.....	18
c) Porosité.....	18
2.2.2. Accessibilité de l'eau pour les plantes.....	19
a) Caractéristiques de l'eau dans le sol	19
b) Prélèvement racinaire	21
c) Bilan hydrique.....	22
d) Réserve en eau du sol.....	22
2.3. Dendroécologie : un outil analysant le passé pour mieux comprendre le futur.....	23
3. Méthodologie	25
3.1. Démarche générale	25
3.2. Partie I : Sites d'étude	26
3.2.1. Processus de sélection des sites.....	26
3.2.2. Description générale de la zone d'échantillonnage	27
3.2. Partie II : Récolte de données de terrain.....	29
3.2.1. Protocole d'échantillonnage	29
3.2.2. Contraintes relevées sur le terrain.....	30
3.2.3. Caractérisation du sol sous peuplement	30

3.4.	Partie III : Analyses physiques du sol.....	31
3.3.1.	Mesure de la perméabilité	31
3.3.2.	Mesure de la charge caillouteuse.....	32
3.3.3.	Mesure de la densité apparente sèche	33
3.3.4.	Analyse granulométrique	33
3.5.	Partie IV : Modélisation	33
3.5.1.	Choix du modèle.....	33
3.5.2.	Fonctionnement du programme	34
3.5.3.	Limites du modèle	35
4.	Résultats	36
4.1.	Analyse descriptive des zones d'étude	36
4.1.1.	Dolomies.....	36
a)	Le plateau	37
b)	La pente	37
c)	Conclusions retenues pour la modélisation	37
4.1.2.	Enfer	39
a)	Le plateau	40
b)	La pente	41
c)	Conclusions retenues pour la modélisation	41
4.2.	Production de variables hydriques.....	43
4.2.1.	Courbes de pF.....	43
4.2.2.	Taux volumétrique en eau du sol	44
4.2.3.	Evaluation des réserves en eau du sol	47
4.2.4.	Evaluation de la réserve utile au cours du temps	48
4.2.5.	Indices de sécheresse	51
a)	Nombre total de jours de sécheresse par année	51
b)	Nombre de jours de sécheresse cumulés.....	56
c)	Réserve en eau relative	58
4.3.	Mise en relation avec les indices de cerne.....	61
4.3.1.	Niveau de corrélation	61
a)	Variables hydriques	61

.....	62
b) Extremas.....	62
c) Représentation graphique.....	63
66	
5. Discussion.....	67
5.1. Choix de départ et leurs implications.....	67
5.2. Analyse critique de la méthodologie.....	67
5.2.1. Récolte des données.....	67
5.2.2. Modélisation.....	68
5.3. Discussion générale des résultats.....	69
5.3.1. Variables hydriques.....	69
5.3.2. Relation réserve hydrique-cernes.....	70
5.3.3. Perspectives.....	72
6. Conclusion générale.....	73
7. Bibliographie.....	74
8. Annexes.....	79
Annexe 1 : Extrait du fichier ATMOSPH.IN utilisé pour l'initiation d'HYDRUS (Enfer).....	79
Annexe 2 : Extrait du fichier METEO.IN utilisé pour l'initiation d'HYDRUS (Enfer).....	80
Annexe 3 : Extrait du fichier ATMOSPH.IN utilisé pour l'initiation d'HYDRUS (Dolomies).....	81
Annexe 4 : Extrait du fichier METEO.IN utilisé pour l'initiation d'HYDRUS (Dolomies).....	82

Table des Figures

Figure 1 : Aire de distribution naturelle de <i>Tilia cordata</i> Mill., représentée en bleu foncé sur la carte (Svejgaard Jensens, 2003).	13
Figure 2 : Exemple de courbes de rétention en eau d'un sol sableux et d'un sol argileux montrant les trois régions décrites précédemment (d'après (Radcliffe et Simunek, 2010)).	20
Figure 3 : Relation entre types d'eau, accessibilité, rétention et types d'humidité (Ridremont et al., 2012 ; d'après Baize, 2000, Baize et al., 1995 ; Delecour, 1981).	21
Figure 4 : Signaux de basse, moyenne et haute fréquences de l'accroissement radial d'un arbre (Latte et al., 2012).	24
Figure 5 : Schéma détaillant la méthodologie générale suivie lors de la réalisation de ce travail.	26
Figure 6 : Localisation des sites d'échantillonnage au sein de la carte des régions bioclimatiques de la Région Wallonne (QGis) - échelle : 1/1000000 (Van der Perre et al., 2015).	27
Figure 7 : Localisation des sites d'échantillonnage au sein de la carte des sols de Wallonie – échelle de l'ensemble des cartes : 1/5000 (Géoportail de la Wallonie). En haut à gauche : Chimay. En haut à droite : Eupen. Au milieu à gauche : Enfer. Au milieu à droite : Honnelles. En bas à droite : Dolomies.	29
Figure 8 : Le perméamètre : 1) réservoir, 2) pompe, 3) filtre, 4) bac régulateur, 5) bac d'immersion, 6) burettes, 7) bac récolteur. Les flèches symbolisent le circuit de l'eau. (Becquevort, 2013)	32
Figure 9 : Localisation des zones "plateau" (point bleu) et "pente" (point rouge entouré d'un cercle noir) du site des Dolomies sur la carte IGN (au-dessus) et sur le Modèle Numérique des Pentes 2013-2014 classifié (en-dessous) - échelle : 1/5000.	36
Figure 10 : Schéma représentant le profil de sol du site des Dolomies. Les pointillés correspondent aux différentes profondeurs modélisées (50 cm (noir), 100 cm (rouge) et 200cm (bleu)).	38
Figure 11 : Localisation des zones "plateau" (en bleu) et "pente" (en rouge) du site d'Enfer sur la carte IGN (au-dessus) et sur le Modèle Numérique des Pentes 2013-2014 classifié (en-dessous) - échelle : 1/10000.	40
Figure 12 : Schéma représentant le profil de sol du site d'Enfer. Les pointillés correspondent aux différentes profondeurs modélisées (50 cm (noir), 100 cm (rouge) et 200cm (bleu)).	41
Figure 13 : Comparaison entre les courbes de pF du site Enfer.	44
Figure 14 : Comparaison entre les courbes de pF du site des Dolomies.	44
Figure 15 : Représentation des horizons (H1 en rouge, H2 en bleu et H3 en vert) au sein des profils de sol des Dolomies (à gauche) et d'Enfer (à droite) ainsi que des nœuds d'observations (carrés rouges) étudiés.	45
Figure 16 : Evolution journalière du taux volumétrique en eau du sol (Theta) en fonction de la profondeur (au début, au milieu et à la fin de chaque horizon) pour les deux sites d'étude durant l'année 1961. – A gauche : Dolomies. – A droite : Enfer	46
Figure 17 : Graphiques comparant la valeur médiane des réserves annuelles en eau du sol sur 200 cm de profondeur et les précipitations associées au cours du temps entre les sites d'Enfer (en-dessous) et des Dolomies (au-dessus).	49

Figure 18 : Représentation de la régression linéaire et du coefficient de détermination obtenus entre les valeurs médianes annuelles de la réserve en eau du sol et les précipitations annuelles cumulées pour les deux sites étudiés.....	50
Figure 19 : Graphiques permettant de comparer le nombre total de jours en-dessous du seuil de sécheresse (10e percentile) pour les trois profondeurs étudiées. Au-dessus : Dolomies. En-dessous : Enfer.....	53
Figure 20 : Evolution au cours de temps du nombre de jours en déficit hydrique sur base de la valeur seuil "10e percentile" pour les deux sites étudiés.....	54
Figure 21 : Gauche : Graphiques comparant le nombre total de jours de sécheresse annuel et celui durant la période allant de mars à juillet. - Droite : Répartition des jours de sécheresse durant les mois de mars à juillet.....	55
Figure 22 : Evolution au cours de temps du nombre de jours en déficit hydrique sur base de la valeur seuil "1er percentile" pour les deux sites étudiés.....	56
Figure 23 : Comparaison des durées annuelles de sécheresse les plus longues sur base de la valeur seuil "10e percentile" pour les deux sites étudiés.....	57
Figure 24 : Comparaison de la durée du déficit hydrique enregistré par les sols des deux sites, étudiée pour différentes profondeurs.....	58
Figure 25 : Graphiques reprenant les réserves en eau relative journalières pour les années 1965, 1976 et 2001 des sites étudiés.....	60
Figure 26 : Représentation graphique de la mise en relation des indices de largeur de cerne des sites Dolomies (au-dessus) et Enfer (en-dessous) avec le nombre total de jours de sécheresse rencontrés durant la période Mars-Juillet pour une profondeur de 200 cm.....	63
Figure 27 : Représentation graphique de la mise en relation des indices de largeur de cerne des sites Dolomies (au-dessus) et Enfer (en-dessous) avec la valeur minimale atteinte par la réserve hydrique sur une profondeur de 200 cm durant l'année.....	65
Figure 28 : Représentation des régressions linéaires et des coefficients de détermination obtenus entre les deux indices de sécheresse choisis et l'indice de largeur de cerne pour les deux sites étudiés.....	66

Table des Tableaux

Tableau 1 : Moyennes et écart-types à la moyenne des indicateurs climatiques des différents sites d'échantillonnage en fonction de leur région bioclimatique (d'après Van de Perre et al., 2015).	28
Tableau 2 : Synthèse reprenant l'ensemble des données de texture et de structure du sol obtenues sous peuplement pour le site des Dolomies.	38
Tableau 3 : Synthèse reprenant l'ensemble des densités apparentes calculées pour le sol sous peuplement du site des Dolomies.	39
Tableau 4 : Tableau reprenant l'ensemble des paramètres hydriques initiaux du sol des Dolomies pour le logiciel HYDRUS.	39
Tableau 5 : Synthèse reprenant l'ensemble des données de texture et de structure du sol obtenues sous peuplement pour le site d'Enfer.	42
Tableau 6 : Synthèse reprenant l'ensemble des densités apparentes calculées pour le sol sous peuplement du site d'Enfer.	42
Tableau 7 : Tableau reprenant l'ensemble des paramètres hydriques initiaux du sol d'Enfer pour le logiciel HYDRUS.	42
Tableau 8 : Synthèse des quantités d'eau présentes (exprimées en mm de hauteur de lame d'eau) à différents potentiels hydriques caractéristiques à 200 cm, 100 cm et 50 cm de profondeur pour les sites d'Enfer et des Dolomies.	47
Tableau 9 : Synthèse des réserves utiles maximales d'eau (RUM), exprimées en mm, avec comme seuil inférieur respectivement le point de flétrissement et les 2/3 de la réserve utile vides pour les deux sites d'étude à trois profondeurs différentes.	48
Tableau 10 : Tableau de synthèse reprenant l'ensemble des valeurs des coefficients de corrélation (r) entre les variables hydriques produites et l'indice de cerne du tilleul à petites feuilles.	62
Tableau 11 : Tableau de synthèse reprenant l'ensemble des valeurs des coefficients de corrélation (r) entre les extrema de la réserve en eau et l'indice de cerne du tilleul à petites feuilles.	62

1. Introduction

Si le changement climatique n'est plus une question mais bien une certitude, les conséquences actuelles et futures qui en découlent, restent encore incertaines. Synonyme de grands changements, cette période oblige les forestiers à revoir la manière dont ils géraient les forêts depuis des siècles. Face aux incidents climatiques (tempêtes, canicules, vagues de sécheresse) de plus en plus fréquents, de nombreuses essences jusqu'ici très présentes dans les forêts wallonnes pourraient ne pas être adaptées aux conditions climatiques à venir (Bradshaw et al., 2000 ; Leuschner et al., 2009). C'est pourquoi, l'intérêt scientifique se porte depuis quelques années sur des essences moins connues et pourtant bien armées face aux bouleversements à venir. Le sujet de ce travail de fin d'étude est donc dans la continuité de cette réflexion et s'intéressera au tilleul à petites feuilles (*Tilia cordata Mill.*) et plus spécifiquement à l'impact que les sécheresses pourraient avoir sur sa croissance.

Le tilleul, bien que peu présent dans les forêts européennes et a fortiori dans les forêts wallonnes, est une espèce tolérante et connue pour sa capacité à s'épanouir malgré des températures élevées et des réserves en eau limitées (Pigott, 1991). Cette thématique a déjà fait l'objet de plusieurs recherches au sein de la Faculté de Gembloux Agro Bio-Tech et ce travail s'inscrit dans la suite de celles-ci. En 2013, Tanguy De Jaegere a notamment débuté son projet de thèse et s'est intéressé à l'autécologie du tilleul à petites feuilles. Il a par la suite publié une revue de la littérature sur le sujet (De Jaegere et al., 2016) afin de montrer l'importance que cette essence pourrait jouer dans le futur, insistant sur le fait que ce sujet devait être approfondi à l'avenir. Philippe Taverniers et Nicolas Latte se sont penchés par la suite sur les relations existantes entre le climat et la croissance du tilleul grâce à la dendroécologie. Tous ces auteurs en sont arrivés à la même conclusion : le tilleul à petites feuilles pourrait occuper une place de choix dans les peuplements forestiers wallons dans un avenir proche.

Parallèlement à ces recherches, François Ridremont s'est intéressé à la manière de caractériser et d'évaluer les réserves en eau des sols forestiers. Il rappelle notamment dans l'un de ses articles que les forestiers sont à l'heure actuelle fortement démunis pour quantifier cet apport d'eau au sein des peuplements. En raison de l'élévation moyenne des températures et des vagues de chaleur ou de sécheresse annoncées dans les derniers rapports du GIEC, les stocks d'eau accessibles pour les arbres seront déterminants dans la capacité des forêts à réagir à ces bouleversements. De nombreux travaux de recherche entrepris par l'INRA semblent également aller dans le même sens et rappellent l'urgence d'évaluer les réserves en eau forestières afin de pouvoir adapter la gestion des forêts aux contraintes futures.

Ces deux axes de recherche, particulièrement d'actualité, sont à l'origine du choix de ce travail de fin d'étude. Philippe Taverniers conclut d'ailleurs en indiquant que « la réserve en eau utile alimentée par les précipitations de mars à juillet semble jouer un rôle important dans la stratégie de survie du tilleul ». Il invite ensuite à vérifier cette hypothèse par l'étude de la relation « cerne-réserve hydrique », sujet à part entière de ce mémoire. Afin de vérifier ou d'infirmer cette hypothèse de départ, ce travail aura pour objectif de répondre aux questions suivantes :

- (1) Comment les réserves en eau accessibles pour le tilleul à petites feuilles ont-elles évolué ces dernières années ?
- (2) Le tilleul à petites feuilles a-t-il été en situation de stress hydrique par le passé ? Dans l'affirmative, quelles sont les caractéristiques des années les plus marquantes et ce stress a-t-il tendance à s'amplifier ?
- (3) Comment la disponibilité en eau influence-t-elle la croissance du tilleul ?

L'impact des stress hydriques sur le tilleul sera estimé par son effet sur la largeur de cerne du tilleul (dendrochronologie) et les réserves en eau disponibles et leur évolution seront estimées par le programme de modélisation *HYDRUS*. Ce dernier choix méthodologique constitue une approche exploratoire pour les sols forestiers. En effet, ceux-ci sont bien différents des sols dans lesquels les modèles hydriques sont généralement mis au point et utilisés.

La suite du travail sera divisée en quatre grandes parties, cette structure permettra de donner toutes les informations nécessaires dans un ordre logique afin de comprendre les résultats obtenus pour les différentes questions posées ci-dessus. La première partie reprendra l'ensemble des informations principales issues de la recherche bibliographique afin, d'une part, de mettre en contexte le tilleul et, d'autre part, d'expliquer les notions liées à l'hydrologie et à la dendroécologie. Ensuite, la méthodologie suivie durant cette étude sera expliquée et chacune des étapes nécessaires au bon déroulement des opérations sera justifiée et détaillée. Les résultats obtenus seront, quant à eux, développés dans la troisième partie. Cette dernière synthétisera en premier lieu les caractéristiques pédologiques spécifiques des sites d'étude pour ensuite mettre en lien ces réserves hydriques disponibles avec les indices de cernes du tilleul à petites feuilles. Pour terminer, ce rapport discutera des biais et des pistes d'améliorations du travail réalisé et se terminera par une conclusion remettant toutes les informations obtenues dans le contexte actuel.

2. Synthèse bibliographique

Ce chapitre a pour but de mettre en évidence les principaux éléments issus de la littérature. Afin de clarifier le contexte d'étude, cette section sera divisée en trois parties et détaillera les points fondamentaux liés à la thématique de recherche. En premier lieu, les caractéristiques et les exigences stationnelles du tilleul à petites feuilles seront abordées afin de le replacer dans son cadre spatiotemporel. Cette démarche sera réalisée tant à l'échelle de l'Europe, qu'à celle de la Wallonie. La seconde partie de ce chapitre se focalisera sur les interactions eau-sol-plante et détaillera les facteurs influençant la disponibilité et le stockage en eau du sol forestier. Un point concernant la modélisation comme outil d'évaluation des flux d'eau dans le sol sera également repris dans cette deuxième section. Pour terminer, les grands principes de la dendroécologie et l'intérêt de cette discipline seront définis, expliqués et mis en relation avec le sujet étudié.

2.1. *Tilia Cordata*, un arbre d'avenir ?

2.1.1. Répartition spatiotemporelle

S'il est vrai que le tilleul à petites feuilles n'est que peu représenté actuellement dans nos forêts, il a précédemment dominé l'Europe pendant plusieurs milliers d'années. Différentes analyses de pollen ont pu démontrer que le tilleul était l'une des trois espèces majoritaires des forêts européennes durant la période comprise entre l'ère post-glaciaire et le milieu de l'Holocène (Latalowa et al., 2013 ; Pigott, 2012). Entre 8200 et 5300 BP¹, sa dominance est décrite par ces mêmes auteurs comme étant quasiment absolue sur l'ensemble de l'Europe de l'Est. Ce laps de temps correspond au maximum thermique de l'Holocène, caractérisé par un climat très sec et chaud avec des températures estivales de 3°C supérieures à la moyenne actuelle (Latalowa et al., 2013). Par la suite, le tilleul est

¹ BP est une abréviation désignant l'expression « Before Present » et traduite en français par « Avant le Présent ». Cette locution est utilisée dans des disciplines comme l'archéologie, la géologie et la climatologie pour désigner les âges exprimés en nombre d'années comptées vers le passé à partir de l'année 1950 du calendrier géorgien. Cette date a été fixée arbitrairement comme année de référence et correspond aux premiers essais de datation par le carbone 14 (Foucault et Raoult, 2010 ; Foucault, 2009).

parvenu à maintenir sa co-dominance durant près de 2000 ans avant de décliner et d'occuper son actuelle distribution. En effet, le retour d'un climat plus clément a alors permis à d'autres espèces comme le hêtre (*F. sylvatica*) et l'épicéa (*P. abies*) de devenir plus compétitives que le tilleul, le chassant progressivement des forêts européennes (Pigott, 2012 ; Bradshaw et al., 2000).

En raison d'une bonne tolérance à de nombreux facteurs climatiques, le tilleul est l'une des essences les plus répandues naturellement au sein de l'Europe (Pigott, 1991). Il se retrouve aussi bien sous un climat océanique que continental, voire même alpin. Malgré sa capacité à résister à des températures élevées, son besoin en eau important (> 500 mm par an) ne lui permet pas de coloniser les régions méditerranéennes. Dans ce climat plus aride, l'intensité des sécheresses et les trop faibles taux d'humidité de l'air et du sol l'obligent à se réfugier dans les versants nord des pentes, les ravins ou les sols possédant une bonne réserve en eau (Radoglou et al., 2009 ; Pigott, 1993). Les températures durant la saison de végétation devant être élevées (> 15°C) pour lui assurer une bonne fructification, son expansion est également limitée vers le nord ou en altitude (Pigott, 1981 ; Pigott, 1991). L'isotherme de Juillet, caractérisée par une température moyenne journalière maximale allant de 19 °C à 20 °C, matérialise sa limite nord. A l'ouest, le tilleul est présent jusqu'au nord de l'Irlande et s'étend à l'est jusqu'en Russie centrale. Les précipitations trop faibles dans les steppes russes ne lui permettent pas de continuer son expansion. Il est évidemment possible de retrouver le tilleul en dehors de son aire de distribution pour peu que les conditions locales lui soient adaptées. La Figure 1 ci-après permet de mesurer l'étendue de l'aire de distribution naturelle du tilleul à petites feuilles.

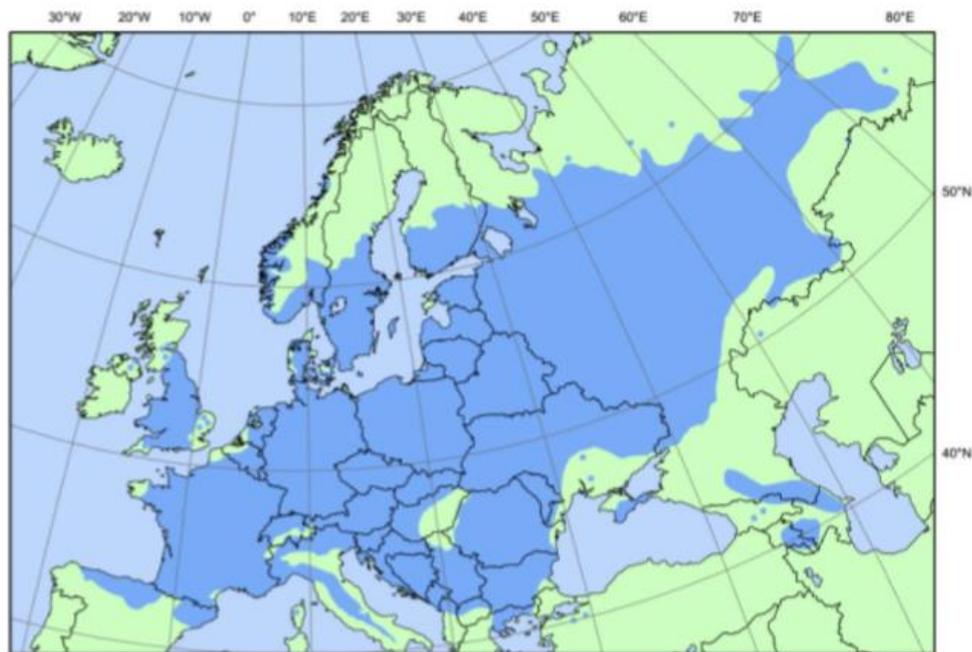


Figure 1 : Aire de distribution naturelle de *Tilia cordata* Mill., représentée en bleu foncé sur la carte (Svejgaard Jensens, 2003).

L'abondance de cette essence varie fortement au sein de l'Europe et ne représente au total qu'une fraction infime (< 5%) de la surface totale occupée par ces forêts. (Spiecker et al., 2009). En Wallonie, ce pourcentage peut même être ramené à 0,45% ce qui équivaut environ à une surface de 2000 hectares. Selon l'IPRFW (Inventaire Permanent des Ressources Forestières de Wallonie) de 2013, seul un nombre réduit de placettes, majoritairement situées en forêt privée, contenait au moins un tilleul. Cette faible représentativité au sein des forêts wallonnes est liée à la fois aux facteurs abiotiques

du milieu mais également à la gestion forestière favorisant des essences plus commerciales et naturellement très compétitives dans ce biotope.

2.1.2. Description autécologique et caractéristiques biologiques

De par sa capacité à se développer spontanément sous le couvert des espèces héliophiles, le tilleul à petites feuilles peut être considéré comme une espèce post-pionnière. Bien que qualifiée d'essence de « demi-ombre » (Pigott, 1991 ; Rameau et al., 1989 ; Barengo et al., 2001), il apparaît que ses besoins en lumière augmentent avec le temps et varient selon sa localisation (Diekmann, 1996 ; Kulagin et al., 2007). De plus, une fois bien établi dans son milieu, il semble réagir positivement à une mise en lumière progressive (Pigott, 1991). A titre de comparaison, son comportement et sa tolérance à l'ombrage sont meilleurs que ceux de l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*) et légèrement inférieurs à ceux du hêtre (Niinemets et Valladares, 2008).

La fertilité n'est pas un facteur limitant pour le tilleul, il peut s'établir sur une large gamme de sols et tolère des pH allant de 4 à 8. Bien que préférant les sols profonds à pH basique ou neutre et possédant une bonne réserve en eau, le tilleul peut en effet s'adapter à des conditions plus stressantes (Pigott, 2012). Il est fréquent, par exemple, de le voir se développer sur des sols superficiels ou à forte charge caillouteuse grâce à son enracinement profond et surtout puissant (Pigott, 1991). Le tilleul est également observé sur une large gamme de texture, mais croît préférentiellement sur des sols riches en limon ou en argile (Radoglou et al., 2009 ; Pigott, 1991). L'engorgement temporaire du sol ainsi que les sécheresses passagères ne sont pas un frein à sa survie. Cette espèce mésophile peut donc se développer sur la presque totalité des sols rencontrés en Wallonie à l'exception des tourbes (Weissen et al., 1991).

De manière générale, la large tolérance thermique du tilleul (comprise entre -48°C à 44°C) lui permet de n'être que faiblement impacté par de grandes variations de température durant l'année (Pigott, 2012 ; Radoglou et al., 2009). Les bourgeons en dormance peuvent également résister à des températures allant jusque -34°C (Till, 1956). Afin de maximiser ses chances de survie dans des climats aussi contrastés, le tilleul a opté pour une saison de végétation courte mais lui permettant d'être épargné par les gelées tardives et précoces (Pigott, 1991 ; Weissen et al., 1991). Son débourrement a lieu à partir de la mi-avril et la chute de ses feuilles arrive entre la mi-octobre et la mi-novembre sous nos latitudes. Lorsque les précipitations annuelles dépassent les 550-600 mm par an, la disponibilité en eau pour le tilleul devient généralement secondaire et c'est alors le facteur température qui a le plus d'influence sur son développement et sa dispersion (Pigott, 2012). Cependant, d'après les résultats obtenus par Philippe Taverniers, il semble que la réserve en eau utile disponible durant les mois de mars à juillet puisse jouer un rôle important dans sa stratégie de survie.

Cette essence peut théoriquement se reproduire aussi bien par voie sexuée qu'asexuée. Elle sait facilement rejeter de souche et drageonner ce qui induit une reproduction végétative très fréquente et importante (Cistyakova, 1979 ; Cistyakova, 1982). Le genre *Tilia* est répertorié comme étant hermaphrodite (Pigott, 1991) mais le tilleul à petites feuilles est en réalité andromonoïque (Tal, 2006). Cela signifie que sur un même individu se retrouvent à la fois des fleurs hermaphrodites et des fleurs mâles. Les fleurs sont principalement fécondées par différents insectes même si le vent permet aussi de disperser une faible partie du pollen. Il est également le vecteur de dispersion principal des graines (Anderson, 1976). Malgré des fructifications fréquentes et abondantes, la régénération naturelle issue des graines est très faible. La fertilité de celles-ci dépend en réalité d'un nombre élevé de paramètres, difficiles à rassembler. Lorsque les températures lors de la fertilisation sont trop faibles, les fruits vides au sein de la fructification sont très nombreux voire majoritaires. De plus, le temps de dormance de la graine avant germination est souvent de l'ordre de deux années et nécessite une

période prolongée de grand froid pour être levée (Suszka et al., 1994 ; Browse, 1979) tout cela en assurant une température supérieure à 2°C afin que la graine puisse germer (Heit, 1967).

Cet arbre d'une longévité importante (> 500 ans) n'est que rarement attaqué par des ravageurs qui pourraient déprécier la valeur de son bois. L'intensité des attaques et les dégâts occasionnés ne sont pas suffisants pour mettre en danger la survie de l'essence au sein du milieu forestier et ne mènent que dans des cas isolés à la mort de l'individu (De Jaegere et al., 2016). Il est toutefois possible d'observer de la pourriture dans le duramen des rejets de souche lorsqu'ils atteignent une soixantaine d'années (Pigott, 2012). Le gibier ne s'intéresse au tilleul qu'en dernier recours car cette essence n'est que peu appétante pour lui (Radoglou et al., 2009). Les cas d'écorcements ou d'abroutissements sont donc anecdotiques.

2.1.3. Sylviculture et qualité du bois

Rarement rencontré en peuplement pur, le tilleul est facilement observable dans les peuplements mélangés dans lesquels il joue le rôle d'une espèce d'accompagnement de premier choix (Svejgaard, 2003). Avec une hauteur culminant entre 20 et 35 mètres, il apparaît souvent dans le sous-étage des chênaies-charmaies de la Région Wallonne (Ellenberg et al., 1988 ; Noirfalise, 1984). Grâce à sa vitalité et à sa tolérance à l'ombrage, le tilleul est très compétitif dans ses jeunes années. Il peut alors investir les sous-bois avant d'être supplanté par le hêtre ou l'épicéa qui limitent son accès à la lumière, pourtant nécessaire à sa croissance. Son développement sous le couvert végétal lui permet de filtrer et de limiter l'apport direct de lumière dans le sous-étage et au niveau du sol. Son intervention permet une diversification des étages inférieurs et de la couverture de sol et rend possible le développement d'essences sciaphiles et de leurs cortèges floristiques.

Sa présence dans les peuplements mélangés offre d'autres avantages. Sa fane est dite améliorante car elle se décompose rapidement et possède une teneur élevée en éléments nutritifs intéressants (Pigott, 1991 ; Weissen et al., 1991 ; Barengo et al., 2001 ; Hagen-Thorn, 2004). Le tilleul remplit également d'autres services écosystémiques comme la fixation du sol dans des zones ravines ou à forte pente à l'aide de son enracinement puissant (Ziemer, 1981). Il ramène également une certaine biodiversité en forêt grâce à ses fleurs mellifères attractives pour les pollinisateurs (Pigott, 1991).

Si les sécheresses de courte durée n'ont que peu d'impact sur son développement, les trop fortes chaleurs estivales peuvent, quant à elles, diminuer sa croissance radiale. Le tilleul n'étant pas considéré comme une essence très commerciale, celui-ci n'est pas favorisé par la gestion sylvicole et sera plutôt cantonné aux zones marginales des forêts ce qui impacte négativement sa croissance. Cette dernière est rapide durant ses vingt-cinq premières années avant de ralentir progressivement. Son modèle de croissance est comparable à celui d'autres feuillus précieux comme l'érable sycomore, le frêne (*Fraxinus excelsior*) ou le merisier (*Prunus avium*) avec lesquels il se retrouve régulièrement en sous-étage dans les peuplements mélangés (De Jaegere et al., 2016).

La faible présence du tilleul sur le marché s'explique certainement par la caractéristique « non durable » de son bois, l'empêchant d'être utilisé pour tout usage extérieur ou relatif à la construction. Il est également exclu des chaînes de production de pâte à papier à cause de différents éléments chimiques que contient son écorce. Pourtant, en 2012, Pigott le décrit comme étant un bois de qualité offrant de bonnes qualités techniques et esthétiques. Avec sa structure fine et régulière, sa couleur homogène et ses propriétés isotropiques, il est particulièrement recherché pour la sculpture, l'ébénisterie ou même la lutherie. Léger et ne laissant pas d'écharde par frottement, il est aussi utilisé pour confectionner le manche des outils. Il se retrouve également dans le domaine de

l'agroalimentaire en tant qu'emballage pour différents aliments car il n'en modifie pas le goût et l'odeur. Grâce à ses caractéristiques biologiques, le tilleul est particulièrement adapté à la menuiserie. Peu sensible au risque de voir des pousses épicromiques se développer sur son tronc, il produit naturellement des billes d'une longueur satisfaisante et dépourvues de nœuds, idéales pour ce genre de travail (De Jaegere et al., 2016).

2.1.4. Ses perspectives d'avenir face au changement climatique

L'ensemble de l'Europe a été marqué au début du siècle dernier par une augmentation de sa température moyenne annuelle. Depuis, ce phénomène se poursuit avec une intensité inquiétante, et particulièrement dans la partie nord du continent (IPCC, 2014). Selon le rapport de l'Organisation Météorologiques Mondiale de 2018, les événements climatiques exceptionnellement chauds se sont multipliés ces 30 dernières années et cette tendance semble s'accélérer. Les neuf années les plus chaudes jamais enregistrées depuis 1880 sont toutes postérieures à 2004, tandis que la température moyenne calculée pour les années 2013-2017 n'a jamais été aussi élevée sur une période de 5 ans. Les modèles de prédiction réalisés par le GIEC, loin d'être encourageants, indiquent que cette hausse moyenne de la température restera aussi soutenue durant le siècle qui s'annonce. Les aléas climatiques violents verront alors leur fréquence augmenter ce qui pourrait avoir des répercussions importantes sur les écosystèmes forestiers (Latte et al., 2015 ; Lindner et al., 2010 ; Hemerey et al., 2010).

Contrairement à d'autres essences très présentes dans les forêts wallonnes, le tilleul semble déjà bien armé pour faire face aux changements climatiques à venir. Il est naturellement adapté à des périodes estivales chaudes et peut tolérer un certain manque d'eau (DGO3, 2017). Outre les caractéristiques décrites précédemment, le tilleul a en effet adapté sa stratégie de survie en développant certains mécanismes pour faire face au déficit hydrique. Très économe en eau, cette espèce possède notamment des stomates très sensibles lui permettant de limiter ses pertes en eau. La quantité d'eau présente dans les feuilles aura tendance à diminuer en période de grande sécheresse afin de limiter son évaporation (Aasamaa et al., 2004). Il est fort probable que ces avantages lui permettent à l'avenir de coloniser des milieux plus étendus et de ne plus être repoussés dans les zones marginalisées des forêts où il est majoritairement présent actuellement. Plusieurs études ont déjà montré que l'augmentation des températures a permis au tilleul d'avancer de quelques jours son débourrement et de retarder sa chute des feuilles. A l'avenir, il est certain que sa période de végétation deviendra plus longue et sera un atout de plus, lui conférant une plus grande compétitivité (Juknys et al., 2012 ; Chmielewski et Rötzer, 2001).

Dans les prochaines années, il faut s'attendre à une augmentation spontanée du tilleul au sein des peuplements mélangés, tendance qui est déjà observée à l'heure actuelle (Spiecker et al., 2009 ; Falinski, 1986). Au nord de l'Europe, les températures plus clémentes en été permettent au tilleul d'avoir une production plus fréquente de graines fertiles (Pigott, 2012). Sur le reste de l'Europe et particulièrement à l'est, c'est évidemment le climat plus chaud qui favorise son expansion, une référence à son comportement dominant durant le maximum thermique de l'Holocène (Huntley et Birks, 1983).

Différents modèles prédisent une distribution légèrement différente pour le futur (Seppä et al., 2009 ; Koca et al., 2006). En effet, comme d'autres essences feuillues, le tilleul semble destiné à migrer progressivement vers les régions plus au nord et les régions boréales où les vagues de sécheresse ne permettront plus au pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) et à l'épicéa de se maintenir. Les régions du sud, comme la péninsule Italienne, pourrait par contre se révéler trop hostile pour lui, ce qui pourrait mener à une diminution drastique de la surface forestière à cet endroit (Attorre, 2011). Il

faut également garder à l'esprit que des changements très localisés pourront également modifier en profondeur la composition de certains massifs forestiers et que l'expansion du tilleul au sein des forêts ne sera possible qu'avec l'assistance des gestionnaires forestiers. De Jaegere et al. (2016) insistent d'ailleurs sur le fait qu'il sera nécessaire, dans un avenir proche, de rassembler autant d'informations que possible sur toutes les essences encore peu répandues et possédant un potentiel intéressant afin de mesurer les risques et leur potentialité d'adaptation en vue d'une transition écologique inévitable.

Il apparaît très clairement que le tilleul a tout à fait sa place dans les forêts wallonnes et européennes. Pour peu qu'un marché du bois lui soit ouvert, il est fort probable que cette essence puisse s'installer durablement en Europe de l'ouest où sa productivité égale celles d'autres espèces feuillues plantées de manière traditionnelle (De Jaegere et al., 2016). De plus, avec tous ces bouleversements, le risque lié à la perte de productivité de certaines essences très prisées est bien réel et implique de trouver d'autres alternatives. Cela étant, l'intérêt du tilleul ne s'arrête pas à son aspect économique. En effet, de par ses caractéristiques biologiques ce dernier pourra jouer un rôle essentiel dans la protection de sols et le maintien de la biodiversité en forêt. Il est maintenant établi que l'une des meilleures armes face au changement climatique est la diversification des écosystèmes. En implantant des tilleuls dans des peuplements mélangés, les gestionnaires forestiers augmentent la résilience de leurs massifs forestiers et ainsi diminuent le risque de catastrophes liées à des incidents extrêmes (Taverniers, 2017).

2.2. Hydrologie : interactions eau-sol-plante en milieu forestier

La capacité du sol à servir de réserve en eau pour les plantes en milieu forestier sera l'élément central de ce chapitre. Ce dernier débutera par un rappel théorique de quelques éléments fondamentaux liés au fonctionnement du sol et remis en contexte pour cette étude. Par la suite, les interactions « eau-sol-plante » seront détaillées et introduiront la notion de « réserve en eau utile » très présente dans la suite de ce travail. La modélisation des flux d'eau comme outil d'évaluation de ces réserves sera également discutée. Pour terminer, les limites et contraintes liées au milieu forestier seront mises en évidence.

2.2.1. Stockage de l'eau par le sol

Issu de l'altération de diverses formations rocheuses sous l'action de la biosphère, de la lithosphère, de l'hydrosphère et des processus qui s'y manifestent, le sol apparaît comme un système complexe et dynamique dans le temps. Il est composé de trois phases (solide, liquide et gazeuse) pouvant interagir entre elles. Le sol peut être décrit grâce à l'étude de sa succession de couches sub-horizontales distinctes, appelées « horizons » (Boulaine, 1982 ; Wagenet, 1998).

L'intérêt du sol, ici considéré, vient de sa capacité à stocker de l'eau en partie accessible aux végétaux. Cette réserve dépend principalement de la « taille du réservoir », c'est-à-dire de la profondeur de sol mais également de la capacité que possède ce réservoir à stocker de l'eau, c'est-à-dire sa capacité de rétention (Ridremont et al., 2012). Cette dernière est fortement influencée par trois paramètres : la texture, la structure et la porosité du sol (Musy et Soutter, 1991). A noter que cette accessibilité au réservoir est à mettre en relation avec l'efficacité des arbres, ici le tilleul, à pouvoir prélever cette eau. En effet, un réservoir de taille importante et bien rempli ne lui est utile que dans le cas où ses racines peuvent s'y alimenter.

a) *Texture*

La texture est définie comme étant la composition granulométrique du sol. Elle peut être séparées en deux catégories : la partie fine du sol comprenant les particules inférieures à 2 mm et la partie grossière composée du reste des éléments (Musy et Soutter, 1991 ; Radcliffe et Simunek, 2010).

La première fraction peut à nouveau être scindée en trois grandes classes, établies sur base du diamètre des particules, à savoir : les argiles, les limons ou les sables. C'est cette analyse, réalisée par tamisage puis par sédimentation, qui sert de base au système de classification des sols. Chaque classe de sol a une capacité différente à retenir l'eau et à la rendre disponible aux végétaux. Cette observation prouve que la texture impacte directement la capacité du sol à stocker de l'eau (Musy et Soutter, 1991 ; Radcliffe et Simunek, 2010).

La seconde fraction, composée des éléments dits grossiers permet d'exprimer la charge caillouteuse d'un sol. Cette dernière est particulièrement importante dans le cas des sols forestiers qui, contrairement aux sols agricoles, en sont fortement constitués. La présence de ce taux de cailloux a un impact sur la quantité d'eau stockée au sein du réservoir « sol » car il influence la porosité du sol mais également l'accessibilité des racines à celui-ci (Ridremont et al., 2012).

b) *Structure*

Les informations délivrées par l'analyse texturale ne donnent qu'une partie de l'information relative à l'arrangement de la phase solide du sol. La structure du sol est la partie manquante de cette information. Elle caractérise la manière dont les particules s'assemblent et forment des agrégats. Cet assemblage peut mener ou non à la présence de macrostructures détectables à l'œil nu et qui permet de les classer. La structure correspond à la forme majoritaire des agrégats et peut alors être décrite comme étant (Musy et Soutter, 1991) :

- Particulaire si aucune agrégation n'est visible ;
- Fragmentaire dans le cas où les agrégats forment des blocs ou des prismes ;
- Massive si les particules s'agrègent en motte.

Au sein du sol, la perméabilité est plus élevée dans un sol granulaire ou peu agrégé. Cette réalité s'explique par l'influence que la structure peut avoir sur la porosité et donc sur la capacité de l'eau à s'infiltrer dans le sol.

c) *Porosité*

Cette notion fait souvent l'objet de confusion car elle est génériquement employée dans la littérature pour décrire des phénomènes divers. En effet, le mot « pore » regroupe à la fois les micropores et macropores qui interviennent à des échelles très différentes (Degré, 2014). Afin de lever toute ambiguïté ces termes seront définis ci-après :

- Le volume de sol non occupé par la matière solide est appelé *espace poral*. C'est dans ce réseau, formé par cet ensemble de vides, que circulent l'eau et l'air dans le sol. Le rapport de ce volume vide par rapport au volume de sol total définit ce qui est communément appelé la *porosité totale* (Définition issue du cours d'édaphologie dispensé par Mme Degré, 2014).
- La *macroporosité* du sol est occupée par l'eau dite libre ou gravitationnelle (Musy et Soutter, 1991).
- La *microporosité* du sol, quant à elle, est occupée par l'eau capillaire (Musy et Soutter, 1991).

La porosité a donc une influence considérable sur la capacité de rétention du sol car cette dernière dépend directement du volume de sol occupé par du vide et dans lequel l'eau peut séjourner (Radcliffe

et Simunek, 2010). En fonction de la taille des pores, l'eau est plus ou moins accessible pour les plantes. Ce point sera abordé dans la suite de cette section. Il est intéressant de noter que le diamètre de ces espaces est directement lié à la composition granulométrique et à l'assemblage des agrégats dans le sol. Les trois paramètres (texture, structure et porosité) influençant la capacité de stockage de l'eau dans le sol sont donc étroitement imbriqués.

2.2.2. Accessibilité de l'eau pour les plantes

a) *Caractéristiques de l'eau dans le sol*

L'influence que l'eau a sur le sol et sur ses processus internes est dépendante de deux caractéristiques majeures :

- La quantité d'eau ;
- Le « statut énergétique » de cette eau.

La quantité d'eau présente dans le sol peut être définie de différentes manières. Dans le cas présent, elle sera exprimée comme « le taux volumétrique en eau du sol » (θ) et correspond au volume occupé par l'eau divisé par le volume total du sol (en $[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$). Il est cependant difficile de comparer des sols différents sur base de la variable θ car celle-ci est directement dépendante des caractéristiques du sol. Pour pallier à ce problème, il est possible de comparer la disponibilité en eau des sols entre elles sur base du niveau d'énergie de ces sols : le potentiel hydrique du sol. Cette notion fondamentale correspond à la différence d'énergie potentielle par rapport à l'état standard et s'exprime soit en [Pa] soit en [m] où elle est alors définie comme une hauteur. L'état standard, 0, est fixé arbitrairement lorsque l'eau est pure, libre et à pression atmosphérique (Radcliffe et Simunek, 2010).

Le potentiel hydrique équivaut à la somme de différentes composantes, chacune liée à une force active du sol :

- La **composante gravitationnelle (z)** correspond à la différence de potentiel engendrée par l'élévation de l'eau par rapport au niveau de référence.
- La **composante hydrostatique (p)** est liée à la pression due à une colonne d'eau pesant sur l'eau du sol en conditions saturées.
- La **composante solutés (s)** varie en fonction de la concentration des solutés du sol.
- La **composante matricielle (h)** quantifie les effets de capillarité et d'adsorption en conditions insaturées. La matrice fait référence au système engendré par les pores du sol et les particules solides. La capillarité place le sol sous tension (pression négative) et diminue donc l'énergie de l'eau. Le fait qu'elle se lie à des particules chargées (argiles ou matière organique) diminue également son niveau énergétique.
- La **composante liée à la pression de l'air (a)** met en évidence l'effet de la pression de l'air sur les pores du sol en contact avec l'eau en milieu insaturé.

Le calcul du potentiel hydrique (H) peut cependant être simplifié et ne tenir compte que des composantes gravitationnelle et matricielle. Dans les sols saturés, les composantes h et z ont souvent la même amplitude mais dans les sols insaturés h est beaucoup plus important que z et aura tendance à tirer H vers des valeurs très négatives (Radcliffe et Simunek, 2010).

Le potentiel matriciel peut être évalué de manière indirecte à l'aide de la **courbe de rétention en eau du sol** indiquant le taux volumétrique d'eau du sol pour différents potentiels matriciels (définis comme une hauteur). Cette dernière, aussi connue sous le terme « courbe de pF » (lorsque l'axe des X correspond au logarithme de la hauteur du potentiel exprimé en centimètres de colonne d'eau) est

directement dépendante de la structure et de la texture du sol et peut être divisée en trois régions (Figure 2) (Radcliffe et Simunek, 2010) :

- La *zone d'adsorption* correspond au potentiel matriciel fortement négatif, là où le contenu en eau est très bas et presque constant.
- La *région capillaire* correspond aux valeurs intermédiaires de potentiel matriciel. Celui-ci y est moins négatif, les pores plus larges permettent à l'eau de rentrer par capillarité.
- La *région d'entrée de l'air* correspond aux valeurs proches de 0. Le potentiel est presque constant dans cette région et démarre à l'intersection en conditions saturées, lorsqu'il n'y a pas d'air dans le sol. A partir de là, le potentiel matriciel diminue mais la quantité d'eau reste constante jusqu'à arriver à une tension supérieure à la force capillaire qui retenait l'eau dans les pores les plus larges. A ce moment, l'air entre dans les pores et le potentiel matriciel atteint la valeur d'entrée d'air.

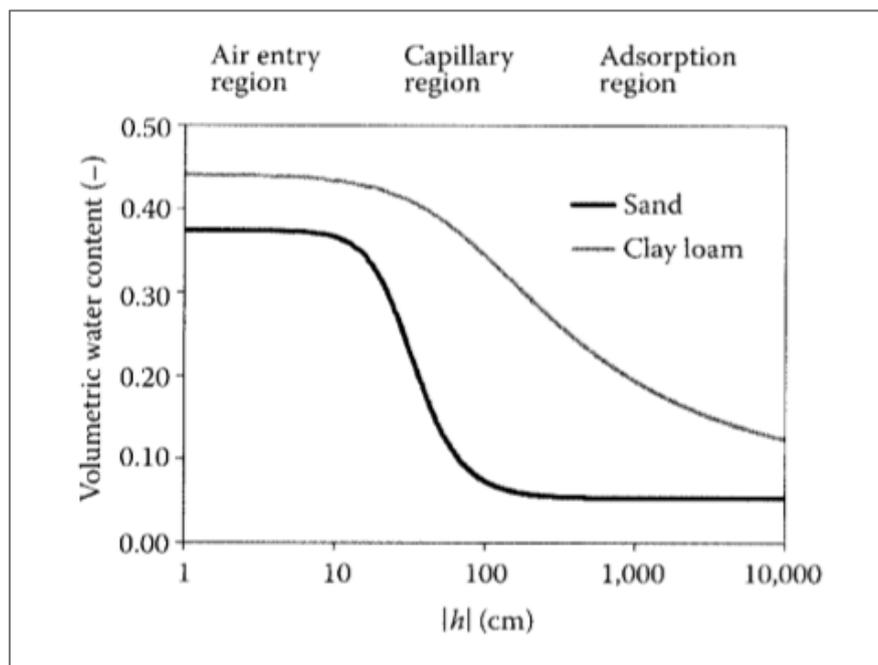


Figure 2 : Exemple de courbes de rétention en eau d'un sol sableux et d'un sol argileux montrant les trois régions décrites précédemment (d'après (Radcliffe et Simunek, 2010)).

Il apparaît qu'une faible quantité d'eau présente dans le sol est en réalité captable par les végétaux. L'eau considérée comme libre est facilement accessible mais ne fait que transiter par les pores, qu'elle quitte sous l'action de la pesanteur. Ce phénomène est connu sous le nom de ressuyage des sols et conduit à l'évacuation de l'eau des macropores qui se remplissent alors d'air. Cette quantité d'eau, de par son côté « transitoire » est rarement prise en compte dans les estimations de la réserve en eau du sol (Ridremont, 2012).

Lorsque le sol est ressuyé, seule l'eau retenue par capillarité, c'est-à-dire présente dans les micropores est encore partiellement disponible. Lorsque l'entièreté de ces micropores est remplie d'eau, le sol atteint son seuil d'humidité maximal connu sous le nom de **capacité au champ**. Toute cette eau n'est cependant pas exploitable pour les plantes car elle est retenue par les particules de sol plus ou moins fortement. Afin de prélever cette eau, les racines doivent réaliser un effort de succion supérieure à la force exercée par le sol. Cet effort est variable en fonction de la taille des pores, et donc de la texture du sol. De plus, à mesure que le sol s'assèche, la force de rétention exercée par le sol est de plus en plus élevée. Lorsque la plante n'est plus en mesure d'absorber de l'eau, le sol est défini comme étant arrivé au **point de flétrissement** (Baize, 2000). Ce dernier est variable en fonction des

essences. Certaines associations avec des mycorhizes, réalisées notamment par le tilleul à petites feuilles, permettent aux arbres de déplacer légèrement le point de flétrissement vers des potentiels hydriques plus bas (Ridremont, 2012). Le schéma ci-dessous (Figure 3) synthétise l'ensemble des informations relatives à l'accessibilité de l'eau dans le sol (issu du Forêt Wallonne n°116).

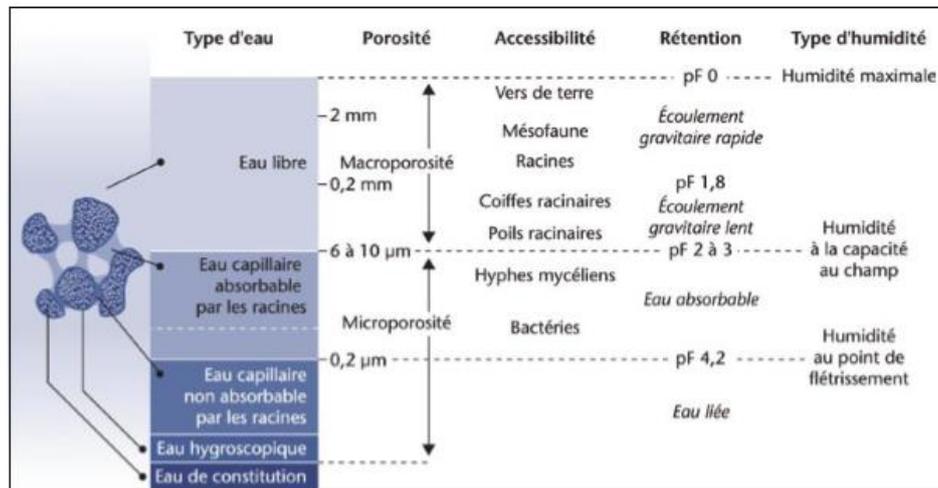


Figure 3 : Relation entre types d'eau, accessibilité, rétention et types d'humidité (Ridremont et al., 2012 ; d'après Baize, 2000, Baize et al., 1995 ; Delecour, 1981).

b) Prélèvement racinaire

Le bon développement racinaire d'un végétal est intimement lié à la macroporosité du sol. En effet, ce sont ces zones qui assurent une bonne circulation de l'air et permettent au système racinaire de croître sainement. De plus, cette aération du sol permet à la pédofaune et à la pédo flore d'assurer correctement leurs rôles dans la minéralisation de la matière et d'augmenter la quantité d'éléments nutritifs pour les arbres.

D'un point de vue spatial, le système racinaire de l'arbre adulte peut être divisé en plusieurs compartiments. Ces derniers ayant pour but de coloniser le sol par leur système racinaire de manière intensive (compartiment dit central) ou extensive (compartiments périphériques et de profondeur). C'est la complémentarité de ces deux modes d'investigation du sol qui permet à l'arbre d'avoir un enracinement aussi stabilisant et puissant. Cela étant, chacun des compartiments est pourvu de racines fines permettant le prélèvement en eau. En effet, les racines ne se spécialisent pas, mais sont influencées par le cortège mycélien qui les entoure et détermine ainsi leur fonction (Drénou, 2006 ; Ridremont, 2012).

Il faut garder à l'esprit que chaque essence a des stratégies différentes pour valoriser au maximum la réserve en eau mise à sa disposition. Comme évoqué précédemment, il est fréquent de voir le tilleul s'associer avec des mycorhizes afin d'augmenter sa surface de prospection du sol. Les hyphes mycéliens, de par leur taille réduite, peuvent s'infiltrer dans les pores les plus fins et ainsi augmenter la quantité d'eau capillaire captée (Pigott, 1982 ; Bréda, 2008). Un autre phénomène moins connu peut également aider les peuplements d'une même essence à surmonter un stress hydrique : il s'agit de l'anastomose racinaire. Ce processus est mis spontanément en place par une espèce et consiste en la création d'un réseau de connexions racinaires entre individus. Par ce réseau, les arbres peuvent faire communiquer leurs réserves en eau et ainsi aider les membres de la communauté les plus faibles. Les spécificités architecturales propres à chaque essence sont surtout marquées dans les couches superficielles du sol. Cette information est à mettre en lien avec le fait que le prélèvement en eau n'est pas assuré par le même compartiment tout au long de la saison. Assez logiquement, lorsque la teneur

en eau est forte dans le sol, ce sont principalement les compartiments de surface qui assurent l'approvisionnement en eau. Lorsque cette quantité d'eau diminue, les compartiments situés plus en profondeur assurent majoritairement le travail. Afin de s'adapter aux conditions changeantes du milieu, il est certain que l'arbre, dans son intérêt, doit au maximum étendre son système racinaire mais également le développer afin d'obtenir une densité racinaire suffisante dans toutes les strates du sol. Il est donc certain que la capacité de l'arbre à s'enraciner profondément lui permet de mieux résister à un stress passager mais que ses possibilités de récupération, une fois le stress terminé, sont directement liées à son enracinement superficiel (Bréda et al., 2002).

c) Bilan hydrique

De manière générale, le bilan hydrique d'un écosystème peut s'établir selon la différence des flux d'eau entrant et sortant, ce qui correspond à la variation de stock en eau du sol. En milieu forestier, les variables constituant ce bilan peuvent être facilement identifiées mais sont difficilement quantifiables. Les flux entrants regroupent toutes les formes de précipitations possibles en Wallonie (pluie, brouillard, grêle et neige) et le flux sortant comprend les flux latéraux, la percolation profonde ainsi que l'évapotranspiration réelle du milieu. Ce dernier terme regroupe en réalité le facteur transpiration, évaporation et interception lié au couvert végétal (Bréda et al., 2002).

En Belgique, il est relativement aisé de se procurer les données météorologiques permettant d'évaluer les flux entrants. Les flux sortants sont bien plus compliqués à obtenir et l'importance accordée à chacun des termes du bilan de sortie dépend fortement du milieu étudié. Si l'interception, par exemple, représente une part négligeable du bilan pour les systèmes herbacés, elle joue un rôle important dans les écosystèmes forestiers. Annuellement ce sont 15 à 30% des précipitations qui sont interceptés par les peuplements feuillus et qui sont donc évaporés avant d'avoir touchés le sol (Peiffer et al., 2005). Pour permettre une comparaison entre divers milieux, le bilan s'établit sur une surface de 1 m² en incluant le houppier des arbres ainsi que le système racinaire présent sur cette surface. Tous les flux présents dans ce bilan s'expriment en mm d'eau (ce qui correspond à 1 L²/m).

d) Réserve en eau du sol

- Caractérisation théorique du réservoir en eau du sol

Comme expliqué précédemment, la connaissance de la variation du stock d'eau issue du bilan hydrique n'est pas suffisante pour pouvoir estimer la quantité d'eau réellement disponible pour les plantes. C'est là que la notion de réserve en eau du sol prend tout son sens.

Selon la définition donnée par Veihmeyer et Hendrickson en 1927, celle-ci est définie comme la quantité d'eau retenue par un certain volume de sol entre ses valeurs d'humidités caractéristiques limites correspondant à ses états de capacité au champ et de point de flétrissement. Elle peut être vue comme la quantité d'eau maximale disponible pour les plantes (Baize, 2000). Afin de faciliter son intégration dans des bilans, elle sera également exprimée en mm d'eau et doit être perçue comme une lame d'eau pour une épaisseur de sol donnée (Baize, 2000 ; Quentin et al., 2001). Elle est calculée selon les deux équations qui suivent :

$$RU_{sol} = \sum_{i=1}^n RU_{horizon_i} \quad (1)$$

$$RU_{horizon} = (H_{cc} - H_{pf}) * Da * Ep * (1 - Tc) \quad (2)$$

Où RU est la réserve utile (mm), H_{cc} et H_{pf} les humidités pondérales à la capacité au champ et au point de flétrissement ($g \cdot (100 g)^{-1}$), Ep l'épaisseur de l'horizon considéré (dm), Da la densité apparente ($g \cdot cm^{-3}$) et Tc le taux de charge en éléments grossiers (%) (Ridremont et al., 2011).

- **Particularité des sols forestiers**

Le fait de travailler sur des sols forestiers présente certaines limites pour l'utilisation des équations et des modèles disponibles dans la littérature. En effet, ces derniers sont souvent calibrés ou pensés pour des sols agricoles qui diffèrent fortement de ceux trouvés en forêt (Bréda et al., 2002).

Tout d'abord, la profondeur à laquelle la réserve en eau utile doit être calculée est souvent difficile à évaluer pour les arbres. Celle-ci dépend de l'essence étudiée et des obstacles rencontrés par les racines. Afin de déterminer la profondeur exacte d'enracinement, il est souhaitable de creuser une fosse pédologique afin d'observer le comportement racinaire. Malheureusement, cette opération est souvent vouée à l'échec en raison d'un empierrement trop élevé dans ces zones d'étude. Par défaut, il est alors communément admis par la communauté scientifique que les racines des arbres prospectent au minimum à une profondeur de 2 mètres (INRA, 2014).

L'utilisation des fonctions de pédotransfert, outil permettant de prédire le comportement du sol sur base de sa composition texturale, doit être maniée avec prudence quand la recherche s'intéresse aux sols forestiers. Cette méthode, largement répandue pour l'évaluation des réserves en eau des sols agricoles, suppose une homogénéité du sol rarement rencontrée en forêt. En effet, cette évaluation appelée « méthode des textures » ne tient compte que d'une seule densité apparente pour l'ensemble du sol. Cette densité, supposée constante le long du profil de sol, n'est d'ailleurs pas celle retrouvée sur le terrain et est calculée sur base de différents jeux de données trop éloignés de la réalité forestière. Le taux de matière organique rencontré dans les premiers centimètres de sol en forêt ne peut en aucun cas être comparé à celui retrouvé en terres agricoles. Or, ce dernier influence fortement les propriétés physico-chimiques et la capacité de rétention en eau des sols (Bréda et al., 2002). La charge caillouteuse présente en forêt est également source de problème pour la calibration des modèles car elle est difficilement évaluable. L'utilisation de cette méthode n'est cependant pas à exclure mais doit plutôt être intégrée dans une démarche plus large de quantification des flux d'eau. L'idée d'employer un programme permettant de modéliser les flux d'eau comme l'outil BILJOU ou HYDRUS permet d'utiliser ce genre de fonction mais en s'éloignant des tables uniquement conçues pour l'agriculture.

Enfin, le potentiel hydrique associé au point de flétrissement est généralement fixé à -1.5MPa. Cette valeur est tout à fait appropriée pour les plantes cultivées (Baize, 2000) mais semble poser des problèmes lorsqu'elle est appliquée aux arbres. Les semis ont un comportement similaire à celui retrouvé en culture mais les adultes, eux, peuvent supporter un dessèchement de sol plus intense. Il est cependant difficile d'établir un seuil inférieur accepté par l'ensemble des scientifiques étant donné que cette aptitude est très dépendante de l'essence étudiée, de la localisation de celle-ci et n'est mesurée que de manière épisodique (Bréda et al., 2002).

2.3. Dendroécologie : un outil analysant le passé pour mieux comprendre le futur

Sous un régime tempéré, le climat impose aux arbres une alternance de périodes de croissance et de repos induisant chaque année la formation d'un cerne de bois. En coupe transversale, le nombre de cernes présents permet de déterminer l'âge de l'individu mais surtout de mesurer sa croissance durant chaque année de végétation (Latte et al., 2012). La dendrochronologie est la science qui repose sur la mesure des largeurs des cernes annuels de croissance et sur leur datation précise (Lebourgeois et Merian, 2012).

La dendroécologie, quant à elle, est une sous-branche de la dendrochronologie et s'intéresse à l'accroissement annuel des arbres afin d'analyser l'influence que l'environnement a sur la croissance et la dynamique de la forêt (Lebourgeois et al., 2012). La largeur des cernes est influencée par de nombreux facteurs que Latte et al., 2012 décrivent comme :

- Intrinsèques (espèce, individu, potentiel génétiques, âge, état sanitaire) ;
- Stationnels (climat, réserve en eau, topographie, sol) ;
- Sylvicole (statut social, concurrence).

Etant donné la large gamme de facteurs influençant les valeurs d'accroissement annuel durant la vie d'un arbre, plusieurs tendances (appelées « fréquences ») peuvent se dégager de cette évolution. Ces fréquences (Figure 4) s'étudient à des échelles de temps différentes et peuvent être définies comme suit (Latte et al., 2012) :

- La **basse fréquence**, mettant en évidence les variations à long-terme (50-100 ans), est liée à l'évolution de la sylviculture pratiquée, au stade de développement de l'arbre, aux tendances à long terme du climat ainsi qu'à la pollution atmosphérique.
- La **moyenne fréquence**, correspondant à des variations pluriannuelles (5-10 ans), est influencée par les opérations sylvicoles réalisées et le dépérissement. Elle peut également indiquer un stress important comme une reprise difficile après une longue période de sécheresse.
- La **haute fréquence**, présentant les variations inter-annuelles (1-2 ans), est déterminée par le climat en cours ou de l'année précédente. Cette fréquence permet de mettre en évidence la sensibilité climatique d'une essence.

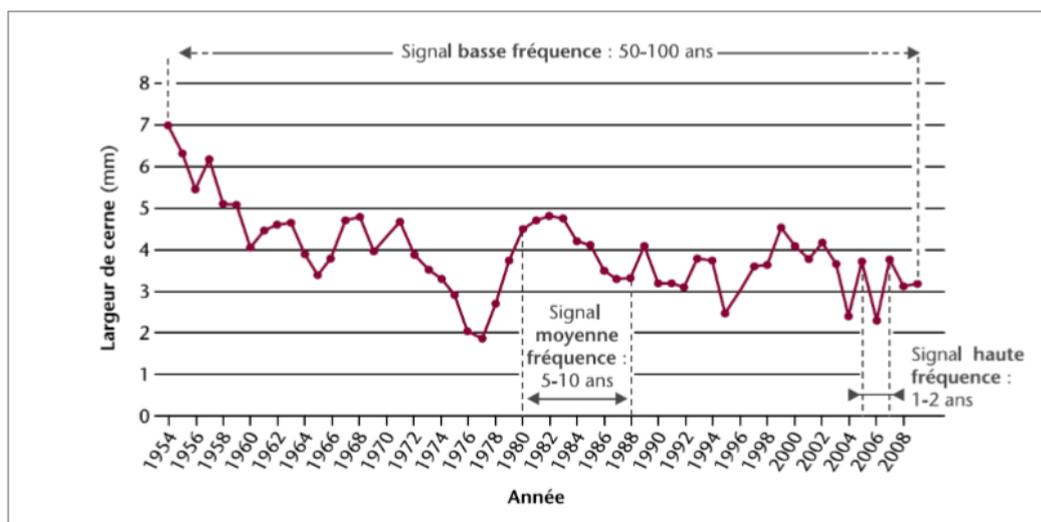


Figure 4 : Signaux de basse, moyenne et haute fréquences de l'accroissement radial d'un arbre (Latte et al., 2012).

Cette jeune discipline (environ 40 ans) est donc particulièrement appréciée et de plus en plus utilisée pour tenter d'évaluer l'impact que les changements globaux auront sur le milieu forestier (Taverniers, 2017 ; Latte et al., 2012). Elle est notamment étudiée afin de mettre en évidence l'influence que certains paramètres environnementaux, comme la disponibilité en eau du sol et les variations climatiques, peuvent avoir sur la croissance des arbres. Cette science permet en quelque sorte d'étudier le passé pour comprendre le présent et prévoir, dans une certaine mesure, le comportement futur de certaines essences (Latte et al., 2012 ; Ridremont et al., 2011).

3. Méthodologie

3.1. Démarche générale

Afin de suivre une trame logique dans la suite de ce travail, il semble judicieux de rappeler l'objectif suivi par cette recherche. L'idée centrale de cette étude est de caractériser les réserves en eau du sol afin de mettre en évidence une possible relation « réserves hydriques-indice de cernes ». Pour ce faire, il a été décidé de travailler avec une approche permettant de modéliser la disponibilité en eau du sol au cours du temps. Avant d'arriver à cette étape, une approche terrain rigoureuse et plusieurs analyses ont été nécessaires pour atteindre un niveau de précision minimum dans l'élaboration des résultats. Le projet a donc été divisé en 4 parties, chacune comprenant une série d'activités à réaliser (Figure 5) :

- Le relevé d'informations générales sur la parcelle ;
- La description spécifique des deux zones d'étude ;
- L'analyse descriptive des paramètres hydriques de ces sites ;
- L'évaluation de la relation « réserves en eau-cernes ».

Le relevé d'informations à l'échelle des parcelles a été effectué sur l'ensemble des sites présélectionnés et a servi de base dans le choix des sites conservés pour la suite de l'étude. Cette première étape de travail était l'une des plus longues en terme d'heures de travail. C'est durant cette période que la phase d'échantillonnage et d'analyses physiques du sol, détaillées dans la suite de ce chapitre, ont été réalisées.

La deuxième phase du processus s'est focalisés sur la description des deux sites d'étude retenus en vue d'une modélisation. Pour ce faire, une deuxième visite de terrain a été réalisée et a permis de préciser l'ensemble des paramètres utiles à l'initiation d'HYDRUS, le programme de modélisation utilisé. Cette phase de terrain est également brièvement décrite dans la suite de la méthodologie et la description des sites à proprement parlé se retrouvera dans la section consacrée aux résultats.

L'analyse descriptive des paramètres hydriques de ces sites comprend à toute la phase d'utilisation du programme HYDRUS ainsi qu'à l'interprétation des résultats bruts obtenus directement à la fin du processus de modélisation. C'est également dans la partie consacrée aux résultats que se retrouveront toutes ces informations.

Enfin, l'évaluation de la relation possible entre les réserves en eau des sols, telles que décrites à l'aide de la modélisation, et les indices de croissance des cernes des tilleuls présents sur ces sites est l'objectif de cette dernière étape. Pour cela, une série d'indices annuels de sécheresse ont d'abord dû être imaginés, calculés et discutés.

Le processus de sélection des sites d'étude ainsi que la description générale de ceux-ci seront les premiers points abordés dans la suite de ce chapitre. Les différentes activités techniques, à savoir, les deux visites de terrain, la phase d'échantillonnage, les analyses physiques du sol et le fonctionnement du logiciel HYDRUS seront également détaillés et expliqués.

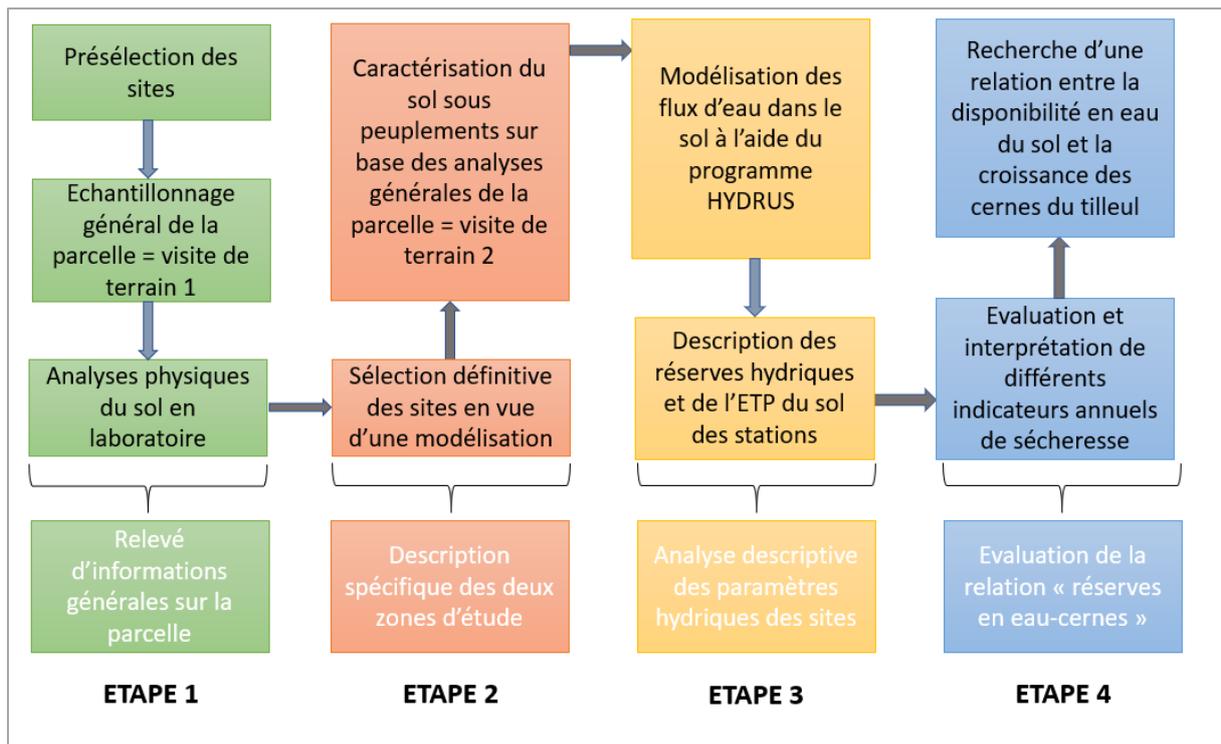


Figure 5 : Schéma détaillant la méthodologie générale suivie lors de la réalisation de ce travail.

3.2. Partie I : Sites d'étude

3.2.1. Processus de sélection des sites

Le Travail de Fin d'Etude réalisé par Philippe Taverniers (2017) a permis de mettre en évidence dix sites présentant un potentiel dendroécologique intéressant pour le tilleul à petites feuilles. Ces derniers, répartis sur l'ensemble de la Wallonie, contenaient des tilleuls dominants et/ou co-dominants. Au sein de ces dix zones d'étude, onze peuplements ont pu être identifiés et échantillonnés lors de ce mémoire.

Une fois ces informations rassemblées, l'opération de sélection des sites a pu commencer et s'est déroulée en deux étapes. L'idée étant, dans un premier temps, d'en choisir quelques-uns afin d'y réaliser un échantillonnage. Sur base des premières observations réalisées sur le terrain et des analyses conduites en laboratoire, seuls deux sites présentant un potentiel de modélisation acceptable seraient alors retenus et caractérisés de manière plus précise.

La présélection a été effectuée en bureau sur base de la liste de Mr Taverniers, afin de conserver uniquement les placettes correspondant aux jeux de données présentant la meilleure qualité d'interdatation. Dès lors, 5 sites ont été écartés de la phase d'échantillonnage. Comme expliqué précédemment, le but étant à terme de ne conserver que 1 ou 2 sites permettant une initialisation correcte du modèle, tout en conservant un haut intérêt dendroécologique. En raison de la peste porcine et de l'interdiction de circuler dans certaines zones des massifs ardennais et gaumais, le site de Musson a également dû être retiré du protocole d'échantillonnage. Ce sont donc les sites situés à Honnelles, Namèche, Chimay, Eupen et Hastière (Figure 6) qui ont été conservés et dont le sol a été échantillonné selon le protocole décrit au point 3.2.1.

Grâce à l'analyse descriptive des sites sur le terrain ainsi que celles réalisées postérieurement en laboratoire, les sites de Namèche et de Hastière ont été sélectionnés. Le site de Chimay a dû être écarté en raison d'un prélèvement d'échantillons insuffisant lié à des contraintes de terrain. Le site d'Honnelles a également été mis de côté à cause d'une qualité d'échantillons insuffisante imputée à une charge caillouteuse trop élevée. Enfin, le site d'Eupen s'est vu abandonné car il semblait plus judicieux de conserver deux sites comparables de par leur localisation au sein d'une même zone climatique. Ces derniers ont donc été visités une seconde fois afin de réaliser une description plus détaillée de leur profil de sol. La synthèse des informations relatives aux analyses et au choix de ces sites est l'objet de la partie 1 de la section consacrée aux résultats. A noter que dans un souci de cohérence, les sites de Namèche et de Hastière seront respectivement rebaptisés Dolomies et Enfer, en référence aux noms employés précédemment dans les publications de Philippe Taverniers et de Nicolas Latte.

3.2.2. Description générale de la zone d'échantillonnage

A l'échelle de la Wallonie, les cinq sites d'étude se retrouvent dans quatre régions bioclimatiques différentes, telles que décrites par Van der Perre et al., en 2015. Cette dispersion (Figure 6) permet de replacer Honnelles au sein de la région des Plaines et Vallées Scaldiennes, Chimay en Fagne-Famenne et Calestienne, Enfer et Dolomies dans la partie Condroz et sillon Sambre-Meuse et enfin Eupen dans la région Ardenne centro-orientale.

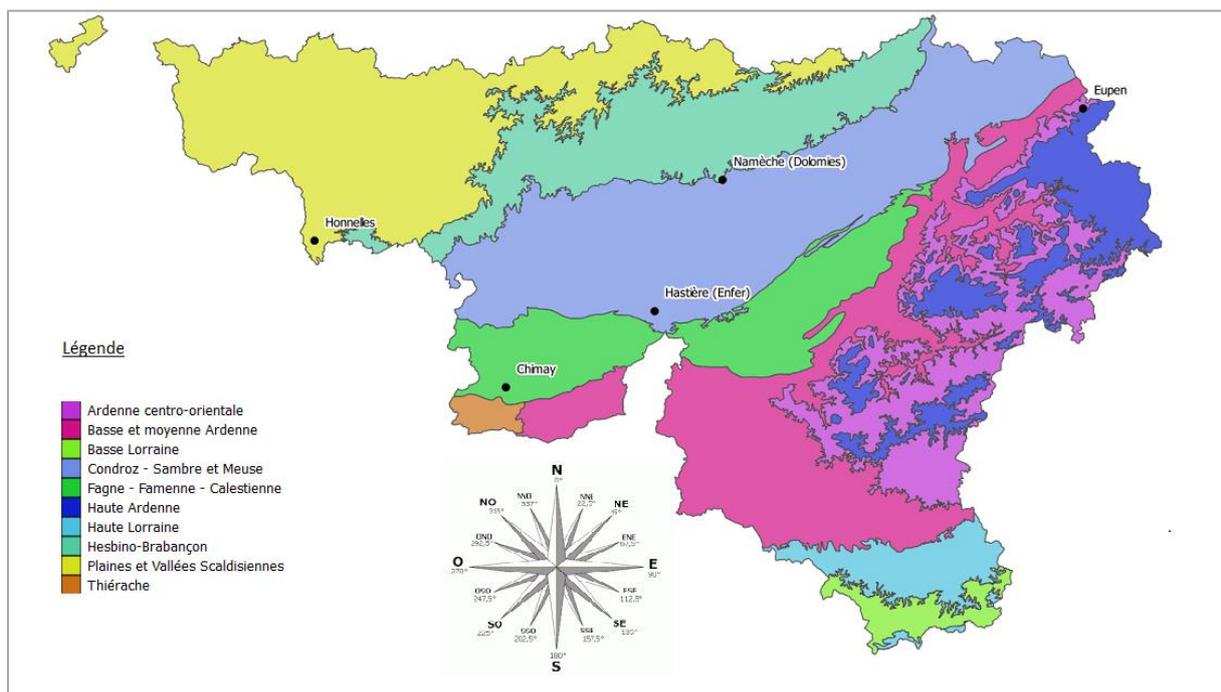


Figure 6 : Localisation des sites d'échantillonnage au sein de la carte des régions bioclimatiques de la Région Wallonne (QGis) - échelle : 1/1000000 (Van der Perre et al., 2015).

Ce découpage de la région wallonne permet de caractériser plusieurs facteurs pertinents concernant l'autécologie des essences forestières comme la longueur moyenne de la saison de végétation (jours), les précipitations moyennes annuelles et celles durant la période de végétation (mm) et la température moyenne annuelle ainsi que celle durant la période de végétation (°C). Le Tableau 1, largement inspiré du travail de Van de Perre et al. (2015), synthétise l'ensemble de ces informations pour les différents sites d'étude.

Tableau 1 : Moyennes et écart-types à la moyenne des indicateurs climatiques des différents sites d'échantillonnage en fonction de leur région bioclimatique (d'après Van de Perre et al., 2015).

	Zone bioclimatique	Longueur moyenne de la saison de végétation (jours)	Précipitations moyennes annuelles (mm)	Température moyenne annuelle (°C)	Précipitations moyennes durant la saison de végétation (mm)	Température moyenne durant la saison de végétation (°C)
Honnelles	Plaines et Vallées Scaldiennes	187 ± 2	859 ± 32	10,4 ± 0,2	411 ± 12	15 ± 0,1
Hastière	Sambre-et-Meuse et Condroz	177 ± 5	937 ± 56	9,6 ± 0,3	450 ± 25	14,9 ± 0,1
Namèche						
Chimay	Fagne, Famenne et Calestienne	174 ± 3	976 ± 50	9,5 ± 0,2	457 ± 16	14,7 ± 0,2
Eupen	Ardenne Centro-orientale	156 ± 2	1136 ± 70	8,1 ± 0,2	502 ± 27	13,9 ± 0,1

Il apparait donc que le site d'Honnelles est caractérisé par une température moyenne annuelle plus élevée et des précipitations moyennes annuelles plus faibles que les moyennes calculées pour l'ensemble du territoire belge entre 1981 et 2010. Ces dernières ont pour valeurs respectives 9.8°C et 925 mm/an. Par opposition, les autres sites d'étude présentent des précipitations moyennes annuelles plus élevées et une température moyenne plus faible que ce qui est généralement observé en Belgique (IRM, 2019).

Les normales de température calculées depuis 1981 et jusque 2010 mettent en évidence le mois de juillet comme étant le mois le plus chaud avec ses 17.8°C de moyenne et le mois de janvier comme étant le plus froid avec ses 2.5°C. La pluviosité varie fortement d'une saison à l'autre en Belgique, elle est abondante durant l'hiver mais faible au printemps. En effet, les précipitations sont de l'ordre d'environ 90 mm/mois en décembre contre moins de 60 mm/mois en avril. A noter que le relief a une grande influence sur ces deux facteurs climatiques. D'une part, les sites possédant une altitude élevée reçoivent généralement des quantités de précipitations plus importantes que ceux situés dans les plaines. D'autre part, la température décroît en moyenne de 0.6°C/100 m d'altitude. Les altitudes des 5 sites d'étude sont respectivement de 70m, 120m, 200m, 240m et 480m pour Honnelles, Namèche (Dolomies), Hastière (Enfer), Chimay et Eupen.

D'un point de vue pédologique, l'ensemble des sites d'échantillonnage est décrit comme étant des sols « limono-caillouteux » (Figure 7). Le drainage est de manière générale favorable, excepté à Eupen où des traces d'hydromorphie ont confirmé sa classification en drainage assez pauvre. Les sites présentent un sol superficiel allant de 10 à 50 cm d'épaisseur avec une charge caillouteuse souvent élevée et augmentant avec la profondeur. La pente varie d'un site à l'autre, allant d'une inclinaison quasiment inexistante (Chimay et Eupen) à une légère pente (Honnelles) pouvant s'accroître (Enfer), voire devenir très forte (Dolomies).

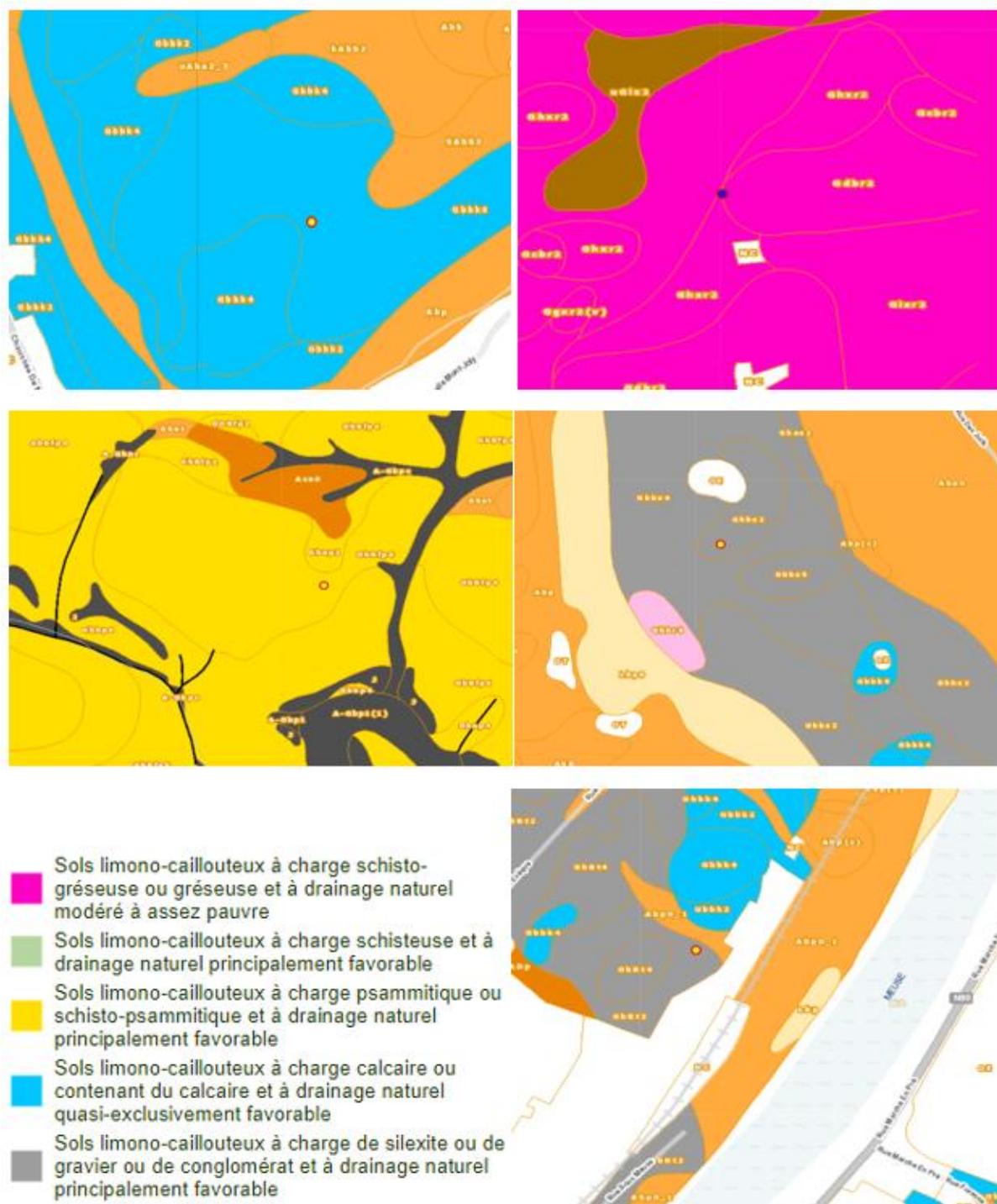


Figure 7 : Localisation des sites d'échantillonnage au sein de la carte des sols de Wallonie – échelle de l'ensemble des cartes : 1/5000 (Géoportail de la Wallonie). En haut à gauche : Chimay. En haut à droite : Eupen. Au milieu à gauche : Enfer. Au milieu à droite : Honnelles. En bas à droite : Dolomies.

3.2. Partie II : Récolte de données de terrain

3.2.1. Protocole d'échantillonnage

Pour chacun des sites décrits précédemment, une même démarche d'échantillonnage a été adoptée lors de la première visite de terrain. Celui-ci a été réalisé afin de faire ressortir les paramètres édaphiques généraux du sol et ainsi de comprendre le fonctionnement hydrique global de la parcelle. Trois types de prélèvements ont été effectués à différentes profondeurs de sol. Tout d'abord, des

échantillons frais ainsi que des échantillons en structure conservée ont été prélevés pour les profondeurs de 0 à 20 cm (E1), 20 à 30 cm (E2) et 30 à 50 cm (E3). Ces derniers ont respectivement été prélevés à l'aide d'une bêche et d'anneaux de 5 cm de diamètre. A noter qu'en raison d'une charge caillouteuse fort importante, l'échantillonnage a été effectué sur base de profondeurs définies et non pas d'horizon car il était difficile de les distinguer.

Ensuite, une fosse a été creusée dans le premier horizon, la terre excavée (entre 6 et 13 Kg) a été ramenée en laboratoire à l'aide de mannes afin d'y être pesée. Une fois celle-ci enlevée, la fosse a été recouverte d'une bâche imperméable et remplie d'eau afin de connaître le volume exact de sol prélevé (entre 6 et 9 L). Etant donné que le terrain était souvent le siège d'une pente légère ou forte, un niveau a été placé avant et après chaque opération sur le bidon afin d'obtenir une lecture du volume la plus précise possible. Ces différentes opérations ont été réalisées à trois endroits de la parcelle afin de capter au maximum la présence d'hétérogénéité sur le lieu d'étude.

3.2.2. Contraintes relevées sur le terrain

Les opérations de prélèvement décrites ci-dessus n'ont pas été réalisées directement au pied des tilleuls à petites feuilles. De manière générale, la présence de racines à cet endroit était fort handicapante pour creuser les fosses nécessaires à l'extraction des échantillons. De plus, le relief était souvent marqué ou accidenté et ne permettait pas de réaliser des prélèvements à une profondeur suffisante.

En effet, pour le site des Dolomies, la pente forte et le sol superficiel sur lesquels se trouvaient les arbres étaient les facteurs limitants. Les prélèvements au sein même du peuplement n'auraient pas permis de sonder le sol en profondeur et donc d'avoir une idée de sa structure. Les prélèvements ont été réalisés sur le plateau surplombant la pente dans laquelle se trouvait le peuplement, et qui, d'après la carte des sols wallons, en possédait les mêmes caractéristiques.

Sur le site d'Enfer, le dénivelé et la faible profondeur de sol étaient également contraignants mais la présence de bouttis de sangliers ainsi que la localisation du peuplement en zone de réserve biologique intégrale n'ont pas permis de réaliser les prélèvements à l'endroit souhaité. L'homogénéité du sol en place a permis d'effectuer l'échantillonnage de l'autre côté du chemin marquant la limite avec la réserve biologique intégrale.

Le site de Chimay avait, quant à lui, été mis à blanc puis remanié afin d'y planter des épicéas. Il a donc fallu réaliser les prélèvements dans une parcelle jouxtant celle précédemment étudiée et contenant le même genre d'associations floristiques. Malheureusement, une fois les 10 premiers centimètres de sol atteints, la charge caillouteuse était très importante et de très gros diamètre. Cela s'est vérifié sur les 40 cm suivants. En raison de cette contrainte technique, seuls deux échantillons en structure conservée et trois échantillons frais ont pu être prélevés.

Les sites localisés à Honnelles et Eupen n'ont posé aucune difficulté d'échantillonnage. Ils étaient faciles d'accès et relativement plats, les arbres précédemment étudiés ont d'ailleurs pu être retrouvés et les prélèvements réalisés à proximité. A noter cependant, que la pierrosité d'Honnelles était loin d'être négligeable mais de diamètre peu élevé, ce qui a permis de prélever les échantillons en structure conservée, néanmoins sans en garantir leur qualité.

3.2.3. Caractérisation du sol sous peuplement

Une seconde visite de terrain a permis de préciser les valeurs réellement observées pour le sol sous peuplement. Cette deuxième sortie s'est opérée après les analyses de la parcelle conduites en laboratoire afin de les confronter à la réalité du site. Pour ce faire, des fosses pédologiques ont été

creusées à plusieurs endroits afin d'estimer la profondeur du sol et d'en évaluer la texture et la charge caillouteuse. Les mesures de pentes ont également été relevées et ont par la suite été comparées à la carte de MNT disponible sur le Géoportail de Wallonie.

Ce relevé de données a ainsi permis d'affiner les informations liées à différentes profondeurs afin de mettre en évidence de réels horizons distincts. Ces horizons, au nombre de trois sur chacun des sites ont été définis sur base d'un postulat :

- L'horizon 1 correspondait à la profondeur de sol excavable sans difficulté. Celle-ci était variable selon le site mais restait très superficielle. La charge caillouteuse présente a été évaluée comme étant inférieure à 50% et a pu être précisément établie sur base des analyses de sol précédemment effectuées.
- L'horizon 2 commençait directement après et s'étendait jusqu'à ce que le prélèvement de la fraction grossière mélangée aux particules de sol soit presque impossible manuellement. La charge caillouteuse présente variait donc le long de ce profil mais a été arbitrairement fixée comme étant > à 50%.
- L'horizon 3, quant à lui, se prolongeait sur une profondeur indéterminée et n'a pu être sondé. Sa charge caillouteuse a été estimée comme étant > à 70%.

3.4. Partie III : Analyses physiques du sol

Les différentes analyses de sol réalisées en laboratoire ont permis d'obtenir les données initiales essentielles à la modélisation que sont la texture, la structure, la densité apparente sèche, la charge caillouteuse ainsi que la perméabilité des différentes profondeurs. Ces analyses ont été réalisées dans l'ordre présenté ci-dessous.

3.3.1. Mesure de la perméabilité

Les échantillons en structure conservée sont stockés dans un frigo à 4°C afin d'éviter toute détérioration de la structure du sol. Ensuite, ils sont placés dans un bac à saturation durant minimum 24h. Une fois saturé, chaque échantillon est placé dans un porte-échantillon et est introduit dans le perméamètre (Figure 8) afin d'évaluer sa perméabilité.

Dans le cas présent, la méthode utilisée est appelée « constant head » c'est-à-dire que le réservoir dans lequel sont plongés les échantillons garde un niveau d'eau constant. Celle-ci circule à l'aide d'une pompe dans un circuit fermé et traverse ces échantillons. Lorsque le système entre en régime permanent, les mesures peuvent commencer et consistent en la lecture du volume ayant traversé l'échantillon de sol (V en [cm³]) en un temps donné (t en [jour]). L'opération est effectuée plusieurs fois jusqu'à l'obtention de trois mesures successives identiques. Ces valeurs, ainsi que la différence de hauteur d'eau entre l'intérieur et l'extérieur de l'échantillon (h en [cm]) sont introduites dans la formule ci-dessous (loi de Darcy), et permettent d'obtenir le coefficient de perméabilité (K en [cm/jour]) :

$$K = \frac{V \cdot L}{A \cdot t \cdot h}$$

Où L et A sont respectivement la longueur (en [cm]) et l'aire de la surface (en [cm²]) de l'échantillon.

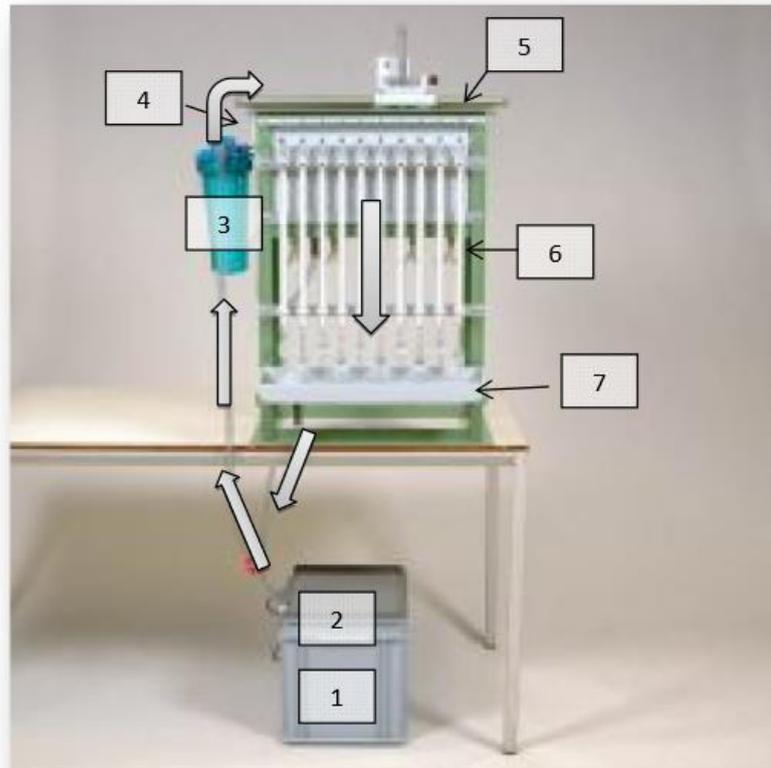


Figure 8 : Le perméamètre : 1) réservoir, 2) pompe, 3) filtre, 4) bac régulateur, 5) bac d'immersion, 6) burettes, 7) bac récolteur. Les flèches symbolisent le circuit de l'eau. (Becquevort, 2013)

En raison d'un sol très pierreux, un joint en silicone a dû être ajouté sur le dessus d'une majorité d'échantillon afin de limiter les chemins préférentiels empruntés par l'eau. Une fois la mesure réalisée, les échantillons ont été placés à l'étuve à 50°C durant une à deux semaines.

3.3.2. Mesure de la charge caillouteuse

Cette analyse a été réalisée sur deux sortes d'échantillons :

- Le volume de sol prélevé dans la fosse du premier horizon ;
- Les échantillons en structure conservée une fois l'analyse de la perméabilité réalisée.

L'un comme l'autre ces échantillons ont été placés à l'étuve à 50°C durant une à deux semaines. Afin de s'assurer de l'assèchement complet du sol, celui-ci a été pesé à intervalle régulier jusqu'à ne plus afficher de différence de masse entre deux mesures. Cette opération a été réalisée à l'aide d'une balance de précision allant jusqu'au gramme.

Afin de connaître le volume et la masse occupés par la charge caillouteuse, cette dernière a dû être séparée du reste du sol. Celui-ci a donc été broyé manuellement puis tamisé à 2 mm, taille limite des particules constituant la fraction fine du sol. Cette opération a permis d'isoler la charge caillouteuse en vue d'estimer son volume. Pour ce faire, un contenant a été taré puis rempli avec de l'eau jusqu'au débordement. La taille du récipient dépendait des échantillons analysés et de la quantité de cailloux présents dans ceux-ci. Le volume d'éléments grossiers de chaque échantillon a été introduit dans ce contenant, le faisant alors déborder de manière proportionnelle au volume qu'il occupait. Cette eau a été récoltée et pesée afin de déterminer le volume occupé par la charge caillouteuse. Le contenant ayant débordé a ensuite été pesé afin de s'assurer que les deux valeurs étaient bien

cohérentes. Cette mesure s'est effectuée 2 fois et le volume final octroyé à la charge caillouteuse correspond à la moyenne des valeurs de ces 2 essais. Le pourcentage de charge caillouteuse a donc été calculé comme étant le rapport entre le volume occupé par les cailloux et le volume total de la fraction solide.

L'évaluation de la charge caillouteuse de E1 pour les deux sites a permis de mettre en évidence un biais dans cette évaluation. Cette profondeur était la seule à avoir vu sa charge caillouteuse évaluée à la fois sur base des volumes prélevés au sein de la fosse, mais également sur base des échantillons en structure conservée. Lorsque les taux ont été comparés, il est vite apparu que la quantité de fraction grossière était moins représentée au sein des échantillons en structure conservée. Par conséquent, les valeurs calculées sur cette base pour E2 et E3 étaient donc sous-estimées. Ceci illustre la difficulté de l'échantillonnage aléatoire dans un site caillouteux. Afin de pallier à ce problème, une deuxième visite des sites Enfer et Dolomies a été organisée avec pour objectif d'évaluer in situ la charge caillouteuse réelle pour ces profondeurs.

3.3.3. Mesure de la densité apparente sèche

La densité apparente sèche correspond au rapport entre la masse sèche d'un sol et du volume occupé par celui-ci. Pour chaque profondeur, trois densités ont été calculées :

- La densité apparente totale du sol ;
- La densité apparente de la fraction grossière ;
- La densité apparente de la fraction fine.

Afin de déterminer les masses respectives des deux fractions, chacune des parties a été pesée séparément après le broyage, permettant ainsi de connaître la masse des particules fines et la masse des cailloux. Le volume total du sol et celui des cailloux étant connus, le volume occupé par la fraction fine a pu être déduit. Une fois toutes ces variables acquises, il a suffi de diviser les trois masses décrites ci-dessus par leur volume respectif. Sur base de ces résultats, une moyenne a été calculée pour chaque densité correspondant aux trois profondeurs des sites.

3.3.4. Analyse granulométrique

Cette analyse a été réalisée par le laboratoire provincial de la Hulpe et a permis de définir le pourcentage de limon, de sable et d'argile présents dans chacun des échantillons. Sur base de ces résultats, une moyenne a été calculée pour chaque profondeur et pour chaque site. C'est cette dernière qui sera considérée comme étant la composition granulométrique réelle des différents sols.

3.5. Partie IV : Modélisation

3.5.1. Choix du modèle

Une fois la caractérisation du sol des sites établie, il a fallu choisir le programme qui modéliserait les flux d'eau dans le sol. Deux programmes étaient envisageables à ce stade : les outils HYDRUS-1D et BILJOU (mis en place par l'INRA).

Le principal problème lié à la seconde proposition était que l'une des variables d'entrée demandée correspondait précisément à l'un des éléments de recherche de ce travail : la réserve en eau utile. De plus, ce modèle requérait un nombre élevé d'informations sur le tillon qui ne sont pas disponibles à l'heure actuelle (dates de débournement et de chute des feuilles des peuplements, fraction des racines fines dans chaque couche de sol). S'il est vrai que ces données auraient pu être déduites ou extrapolées depuis la littérature, aucune valeur précise n'aurait pu être mesurée sur le terrain de manière spécifique pour les deux sites d'étude. Le risque en employant ces informations

génériques ne reflétant pas la réalité, était de créer des biais supplémentaires induisant des erreurs additionnelles dans les résultats. Suite à cette constatation, il a été décidé d'étudier le « sol nu » de chacune des stations afin d'obtenir les résultats les plus fiables possibles concernant les échanges au sein du sol. Ceci impliquait de ne pas tenir compte de la couverture végétale présente au-dessus, ni d'aucun autre élément du bilan hydrique général de la forêt. C'est donc ici la réserve en eau absolue, uniquement dépendante des caractéristiques hydriques du sol, qui a été modélisée.

Pour répondre à cette question, le programme de modélisation HYDRUS-1D a donc été sélectionné. Cet outil avait l'avantage d'être employé au sein de la Faculté depuis plusieurs années et paraissait donc fiable.

3.5.2. Fonctionnement du programme

Bien que pouvant remplir d'autres fonctions, HYDRUS a été utilisé dans le cas présent pour modéliser les flux d'eau dans le sol. Afin de permettre au logiciel de travailler correctement, les limites du système ainsi que différentes variables d'entrée ont dû être définies. La première initiation du modèle sera expliquée de manière détaillée, les modifications réalisées par la suite ne seront, quant à elles, que mentionnées car elles seront expliquées lors du développement des résultats.

La première information à fournir était la limite de profondeur totale du sol ainsi que celle des différents horizons. Dans un premier temps, la profondeur de 200 cm a été arbitrairement retenue. Ce choix a été influencé par la littérature et notamment par l'une des recherches de Nathalie Bréda dans laquelle elle spécifie que « la profondeur prospectée par des arbres forestiers adultes est souvent d'au moins 2m ». Dans le cas présent le sol sous les peuplements était très superficiel et fortement empierré ce qui ne permettait pas de le sonder en profondeur et donnait l'impression d'un sol très peu profond. Cependant, afin de ne pas limiter de manière trop forte la profondeur atteignable par les racines, il a été décidé d'extrapoler ce qui était visible à la profondeur minimale et cohérente pour un arbre. Trois horizons ont été distingués au sein de chacun des sites, il apparaîtra grâce aux analyses de texture réalisées que ceux-ci diffèrent surtout par leur charge caillouteuse. Les deux premiers horizons ont pu être caractérisés de manière plus approfondie mais le troisième n'a pu être qu'extrapolé sur base des observations faites sur le terrain et en laboratoire.

La durée de cette modélisation a été déterminée par les contraintes liées à l'accessibilité des données météorologiques. Ces dernières sont issues des stations météorologiques de Hastière et de Namèche respectivement pour le site d'Enfer et des Dolomies, garantissant ainsi une fiabilité élevée des données d'entrée. Ces fichiers comprenaient les relevés journaliers des précipitations (en [mm]), de la température maximale et minimale enregistrées (en [°C]), du rayonnement solaire (en [ly]), de l'humidité relative (en [-]) et de la vitesse du vent (en [m/s]) à 10 mètres de hauteur depuis 1961. Ces variables ont parfois dû être adaptées afin de correspondre au système requis pour le modèle². Afin de s'affranchir de l'influence des valeurs initiales choisies pour lancer le modèle, celui-ci a d'abord été « chauffé » durant une année fictive. Celui-ci a donc travaillé pour une durée de 21579 jours, même si les résultats n'ont porté que sur les 21184 derniers jours.

Le modèle classique de Van Genuchten (1980), proposé par défaut pour la courbe de rétention en eau du sol, a été conservé afin de modéliser les données introduites, elles-mêmes relatives à la fraction fine. La simulation s'est déroulée à pression atmosphérique et a tenu compte du ruissellement dans le but de représenter le plus justement possible les conditions rencontrées sur le terrain. Les flux d'eau ont été étudiés pour des potentiels hydriques allant de 0 à -16000 Pa. Les autres paramètres

² L'ensemble des fichiers « .IN » pour les deux stations n'a malheureusement pas pu être joint car il était beaucoup trop long et volumineux. Un extrait de ces fichiers est cependant disponible en annexe.

étaient ceux proposés par défaut par l'interface. Les valeurs obtenues pour les fractions fines des deux sites ont été encodées dans l'interface « Roseta » permettant ainsi d'obtenir les paramètres initiaux des flux d'eau dans le sol. Cette interface est en réalité une fonction de pédotransfert permettant d'estimer les paramètres de van Genuchten des sols étudiés³.

Afin de connaître le taux volumétrique d'eau de manière précise au cours du temps dans chaque horizon, différents « nœuds d'observation » ont été placés à des endroits stratégiques au sein du profil de sol. Ceux-ci ont été placés en début, milieu et fin de chaque horizon ainsi qu'à l'interface entre deux horizons différents. Sur base d'un fichier de sortie reprenant les valeurs de ces taux de manière journalière pour chacun des points d'observations, une évaluation des réserves en eau des stations au cours du temps a été effectuée. Un autre fichier reprenant les valeurs journalières de l'évapotranspiration du sol a permis d'affiner cette estimation des réserves en eau, en intégrant ces valeurs dans le bilan. Enfin, les courbes de pF générées ont permis de déterminer les réserves en eau maximales ainsi que les quantités d'eau présentes à la capacité au champ et au point de flétrissement ; point de départ pour la création de nombreux indices permettant de mettre en évidence une sécheresse passagère ou de longue durée.

3.5.3. Limites du modèle

Comme toute modélisation, le programme HYDRUS ne tient pas compte de tous les paramètres rencontrés sur le terrain. Il faut bien garder à l'esprit que ce n'est qu'une extrapolation des données observées et qu'une partie des caractéristiques intrinsèques de la parcelle n'apparaissent pas dans cette estimation. Tout d'abord, le programme fonctionnant sur base d'une seule dimension, les données relatives à la pente ne sont pas prises en compte. Or, dans ce cas précis, les peuplements se trouvent sur une forte pente ce qui implique que les apports d'eau latéraux n'apparaîtront pas dans cette extrapolation.

La charge caillouteuse qui est également un facteur prépondérant dans les sols forestiers ne peut être intégrée directement dans ce modèle. Une parade a cependant été trouvée afin de permettre au logiciel d'intégrer ce facteur. En effet, les paramètres initiaux permettant de déterminer les propriétés hydrauliques du sol ont été pondérés en fonction de la charge caillouteuse présente.

³ Les valeurs initiales obtenues sont reprises aux points 4.1.1 et 4.1.2.

4. Résultats

4.1. Analyse descriptive des zones d'étude

4.1.1. Dolomies

La récolte de données sur le terrain et son analyse en laboratoire ont permis de caractériser la parcelle et de la diviser en deux parties :

- Le plateau avant la forte pente sur lequel les premières analyses de sol ont été réalisées ;
- La pente présentant une inclinaison de 50 % et sur laquelle le peuplement de tilleuls est visible.

La description précise du sol sous peuplement a été faite par comparaison entre les valeurs récoltées sur le plateau du site étudié. C'est pourquoi, même si cette zone n'est pas directement utilisée pour la partie modélisation, elle sera malgré tout brièvement décrite.

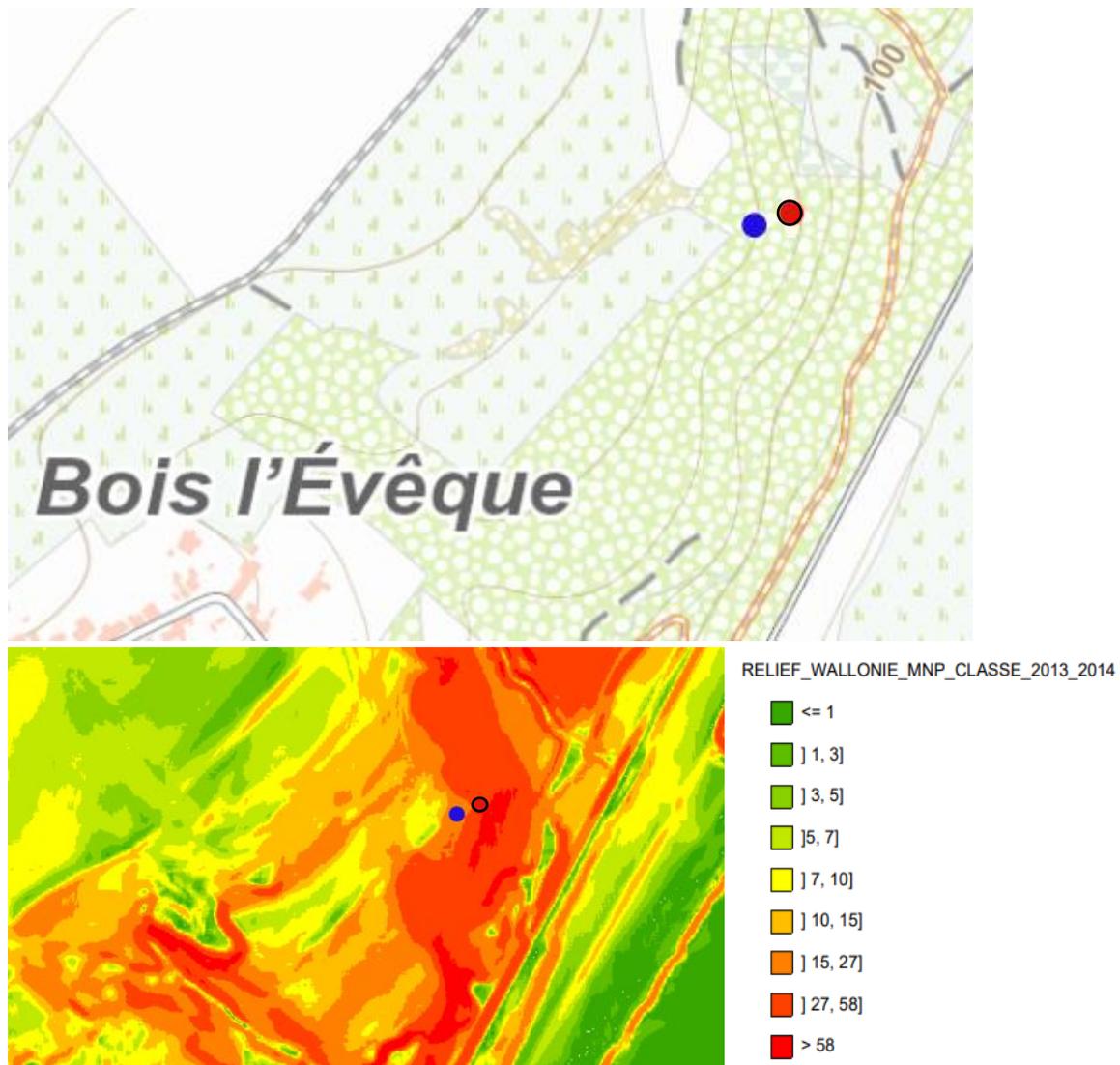


Figure 9 : Localisation des zones "plateau" (point bleu) et "pente" (point rouge entouré d'un cercle noir) du site des Dolomies sur la carte IGN (au-dessus) et sur le Modèle Numérique des Pentes 2013-2014 classifié (en-dessous) - échelle : 1/5000.

a) *Le plateau*

Sur ce dernier, une pente de 25% a été relevée sur le terrain. Cette valeur est confirmée par la carte du relief (Modèle Numérique des Pentes 2013-2014 classifié), disponible sur le Géoportail de la Wallonie et indiquant une valeur comprise entre 15 et 27 % (Figure 9). La litière à cet endroit était abondante et comprenait à la fois des feuilles de la saison de végétation précédente mais également des éléments plus fragmentés, l'humus était donc de type moder. Le peuplement visible sur cette partie de la parcelle était assez mélangé. La strate arborée était dominée par des chênes et des hêtres mais le sous-étage montrait une plus grande diversité. Elle était composée de charmes (*Carpinus betulus*), de noisetiers (*Corylus avellana*), d'érables (*Acer sp.*), de bouleaux (*Betula sp.*) et de saules blancs (*Salix alba*). Quelques tilleuls étaient également visibles mais de manière plus dispersée.

Le profil de sol permet de distinguer un premier horizon d'une couleur assez noire indiquant une présence de matière organique sur 10-15 cm. La charge caillouteuse n'était pas très élevée et la texture était grumeleuse. Ensuite, un faible horizon de 5 cm permettait une transition vers un horizon contenant un charge caillouteuse supérieure à 50%. Ce dernier était d'une couleur beaucoup plus orangée et semble se prolonger au-delà des 50 cm sondés.

b) *La pente*

Le peuplement de tilleuls était situé sur une pente plus forte, évaluée à 50% sur le terrain et comprise entre 27 et 58% si la carte du relief est prise comme référence (Figure 9). Ceux-ci sont issus d'un peuplement naturel et sont âgés de 50-70 ans. La circonférence moyenne évaluée en 2016 par Philippe Taverniers était de 63 cm mais était fortement variable d'un individu à l'autre (50 à 140 cm). L'humus présent est comparable à celui retrouvé précédemment mais pour une épaisseur plus faible (< 1cm). De nombreuses zones du sol étaient également occupées par de la roche-affleurante influençant alors le profil de sol rencontré.

Les horizons possédaient une texture et une structure comparables à celles rencontrées sur le plateau mais bénéficiaient d'une moindre profondeur et d'une charge caillouteuse plus élevée. En effet, l'horizon 1 ne faisait que 6 cm de profondeur pour cette partie de la parcelle et débouchait directement sur un deuxième horizon semblant présenter les mêmes caractéristiques que sur le plateau, si ce n'est que la démarcation entre ceux-ci était moins progressive. Le sondage a pu se poursuivre sur une profondeur supplémentaire de 20 cm mais n'a pu s'effectuer plus bas en raison d'une charge caillouteuse trop importante correspondant au début du troisième horizon. Deux variantes étaient cependant observables à cet endroit :

- Les zones surplombées par de la roche ne présentaient pas de matière organique et donc le sondage mettait directement en évidence l'horizon 2 sur une quinzaine de centimètres ;
- Par opposition, certaines zones sondées ne possédaient pas de deuxième horizon et présentaient un premier horizon plus concentré en matière organique s'arrêtant après 15 cm sur de la roche.

c) *Conclusions retenues pour la modélisation*

Les deux variantes relevées sur le terrain, de par leur faible présence sur la zone d'étude, n'ont pas été modélisées. C'est donc bien la succession d'horizons majoritairement retrouvée sur la pente qui a permis de fixer les limites de profondeur du modèle à savoir, un horizon 1 (H1) de 6 cm, un horizon 2 (H2) de 20 cm et un horizon 3 de 174 cm (Figure 10). La profondeur de ce dernier a été obtenue en soustrayant les valeurs additionnées des deux premiers horizons par rapport à la valeur limite choisie

au départ (200cm). Lorsque la modélisation a été réalisée pour les profondeurs de 100 cm et de 50 cm, cet horizon a pris respectivement les valeurs de 74 cm et 24 cm.

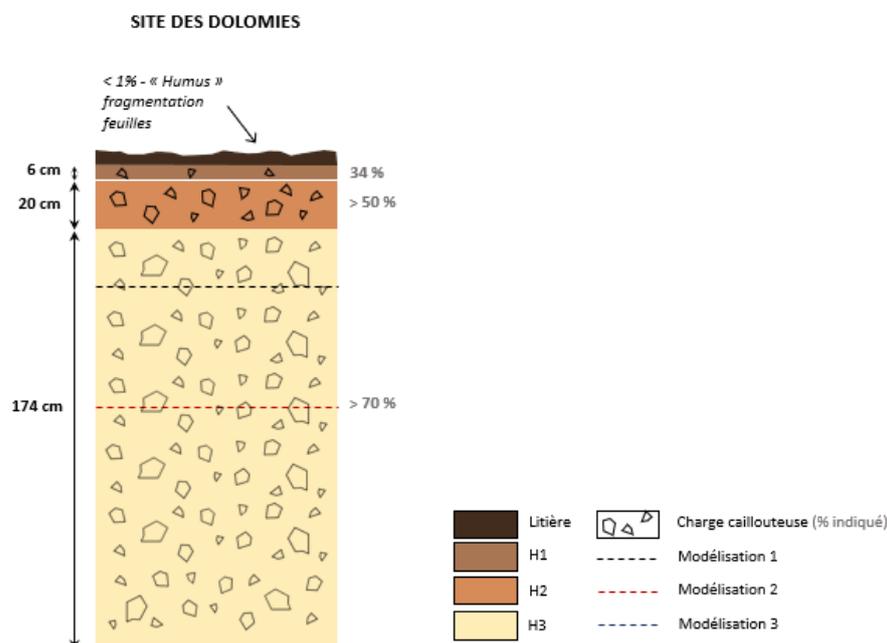


Figure 10 : Schéma représentant le profil de sol du site des Dolomies. Les pointillés correspondent aux différentes profondeurs modélisées (50 cm (noir), 100 cm (rouge) et 200cm (bleu)).

L'impression relevée sur le terrain, selon laquelle le sol était fortement semblable du point de vue de sa texture le long de son profil de sol s'est vérifiée grâce aux analyses de granulométrie effectuée par le laboratoire provincial de la Hulpe. Le Tableau 2 reprend la moyenne de ces analyses et permet de caractériser l'entièreté du sol sondé comme étant du limon fin. Ce résultat est d'ailleurs confirmé par les valeurs très proches prises par les densités apparentes de cette même fraction fine calculée en laboratoire. Les horizons semblent donc différer principalement par la charge caillouteuse qu'ils contiennent.

Tableau 2 : Synthèse reprenant l'ensemble des données de texture et de structure du sol obtenues sous peuplement pour le site des Dolomies.

Synthèse des données de texture et de charge caillouteuse du sol sous peuplement pour le site des Dolomies							
	% Argile	% Limon	% Sable	Texture	Charge caillouteuse (Labo)	Charge caillouteuse (Bac)	Charge caillouteuse (Terrain)
H1	19,6	61,6	18,8	Limon fin	22%	34%	/
H2	24,7	61,5	13,9	Limon fin	19%	/	51%
H3	24,7	61,5	13,9	Limon fin	/	/	71%

Afin de représenter au mieux la réalité du terrain, la charge caillouteuse a été évaluée de différentes manières. Comme expliqué précédemment, le taux de la charge caillouteuse relevé à l'aide des échantillons en structure conservée a rapidement été écarté. La charge caillouteuse de l'horizon 1 obtenue à partir de la fosse pédologique a pour sa part été conservée car semblait correspondre à ce qui était observable in situ. Les valeurs de charge caillouteuse pour les horizons 2 et 3 ont par contre été fixées arbitrairement en considérant que l'horizon 2 comprenait toute la profondeur de sol possédant une charge > à 50% et > à 70 % pour l'horizon 3.

Par curiosité, les densités apparentes sèches du sol ont été calculées sur base des échantillons disponibles en laboratoire puis comparées aux valeurs obtenues si la charge caillouteuse évaluée sur le terrain était prise comme référence (Tableau 3). Il apparaît donc que la méthode de la fosse pédologique employée pour caractériser l'horizon 1 était plutôt représentative de la réalité. Les valeurs très différentes obtenues pour les deux autres horizons apparaissent simplement comme une confirmation de ce qui a déjà été conclu précédemment.

Tableau 3 : Synthèse reprenant l'ensemble des densités apparentes calculées pour le sol sous peuplement du site des Dolomies.

Synthèse densités apparentes du site des Dolomies				
	Densité Fraction fine	Densité charge caillouteuse	Densité totale (Labo)	Densité totale (Terrain)
H1	1,12	1,89	1,36	1,38
H2	1,11		1,26	1,50
H3				1,66

Le dernier tableau ci-dessous (Tableau 4), reprend l'ensemble des paramètres hydriques du sol ayant permis l'initiation du programme HYDRUS. Les paramètres « sans charge caillouteuse » correspondent aux valeurs proposées par la fonction de pédotransfert *Roseta* lorsque les données de moyenne de texture et de densité apparente sèche de la fraction fine ont été intégrées. Les autres paramètres ont été pondérés en fonction de la charge caillouteuse de chaque horizon et ont servi de base pour l'ensemble de la modélisation effectuée par la suite.

Tableau 4 : Tableau reprenant l'ensemble des paramètres hydriques initiaux du sol des Dolomies pour le logiciel HYDRUS.

Flow parameters des Dolomies						
Avec charge caillouteuse						
	theta r [-]	theta s [-]	Alpha [1/cm]	n [-]	Ks [cm/day]	l [-]
H1	0,049566	0,318318	0,003102	1,6875	45,0648	0,5
H2	0,036799	0,236327	0,002303	1,6166	33,4572	0,5
H3	0,024244	0,146972	0,001682	1,6166	16,6431	0,5
Sans charge caillouteuse						
H1	0,0751	0,4823	0,0047	1,6875	68,28	0,5
H2	0,0836	0,5068	0,0058	1,6166	57,39	0,5
H3						

4.1.2. Enfer

La situation du peuplement de tilleuls étudié à Hastière se trouve dans une situation comparable à celui des Dolomies. La parcelle est divisée également en deux parties :

- Le plateau de l'autre côté du chemin situé hors de la zone de réserve biologique intégrale, sur lequel les analyses granulométriques ont été réalisées ;
- La pente sur laquelle se retrouve le peuplement, d'abord de faible inclinaison mais s'accroissant rapidement dès les premiers mètres.

Pour les mêmes raisons que celles énoncées pour le site des Dolomies, la zone du plateau sera également brièvement décrite ci-après.

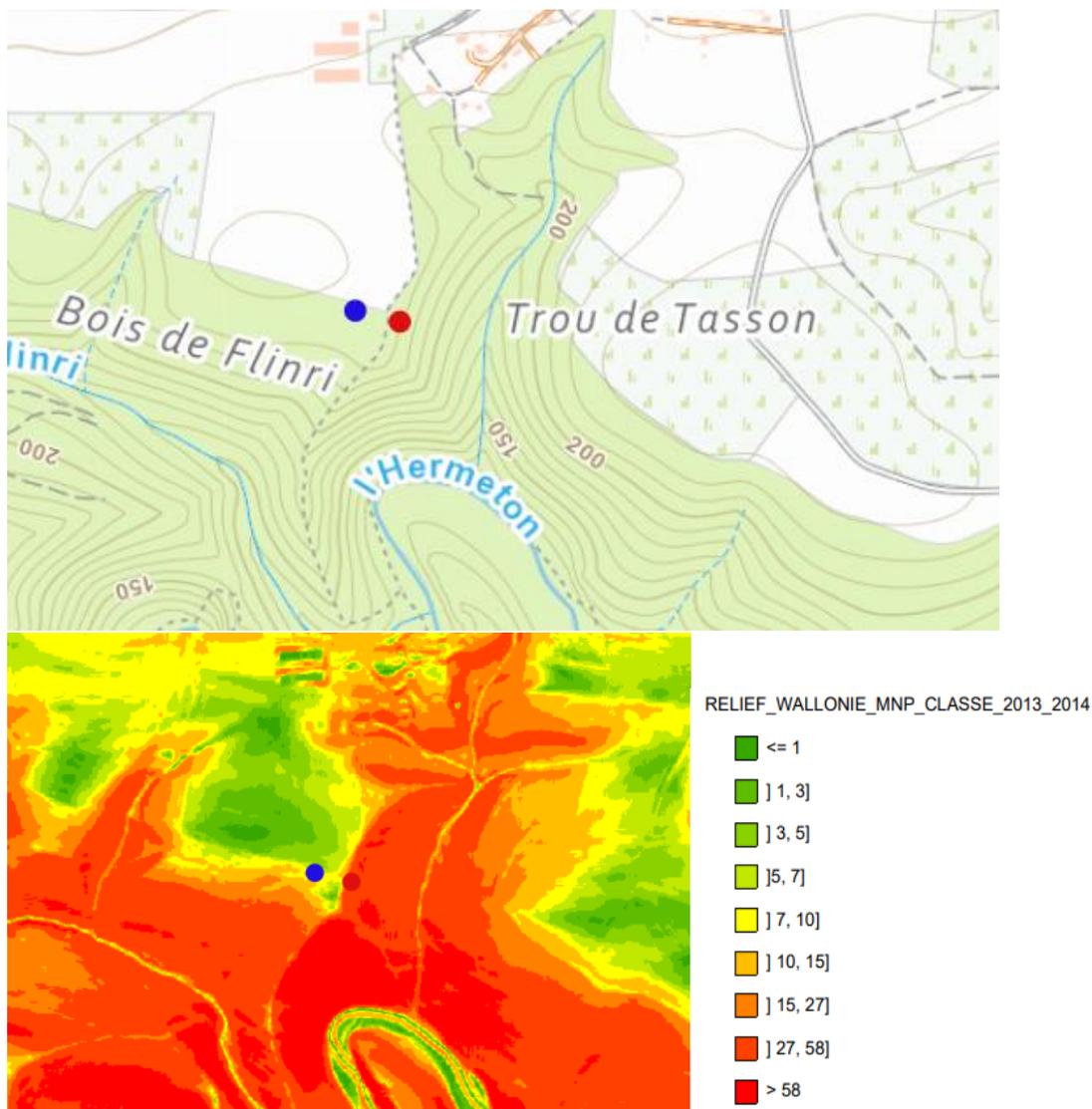


Figure 11 : Localisation des zones "plateau" (en bleu) et "pente" (en rouge) du site d'Enfer sur la carte IGN (au-dessus) et sur le Modèle Numérique des Pentes 2013-2014 classifié (en-dessous) - échelle : 1/10000.

a) Le plateau

Décrit par une faible pente évaluée à 5 % sur le terrain et reprise dans la catégorie 7-10% par le Modèle Numérique des Pentes 2013-2014 classifié (Figure 11), cette partie de la parcelle s'est révélée très pratique pour les prélèvements de sol. Une très faible couche de litière était présente à cet endroit et principalement constituée de feuilles fragmentées, l'humus était considéré comme étant de type mésomull. Le peuplement visible sur cette zone était plutôt régulier et fortement ouvert. La strate dominante comportait majoritairement des chênes et quelques hêtres et le sous-étage était très limité et peu mélangé, offrant ainsi un terrain dégagé pour les ronces qui colonisaient le sol.

Le profil de sol met donc en évidence deux horizons distincts. L'horizon 1 s'étend sur une profondeur de 20 cm environ et est chargé en matière organique. De couleur noire, il comprend une charge caillouteuse inférieure à 50%. Le deuxième horizon apparaît dès les centimètres suivants et continue jusqu'à plus de 50 cm. Cet horizon, de couleur jaunâtre comprend une charge caillouteuse supérieure à 50 %.

b) La pente

Le peuplement de tilleul était situé entre le début et le milieu de la pente. Si cette dernière démarre doucement avec une inclinaison de 9%, elle atteint rapidement les 35% à la fin du peuplement (valeurs à nouveau confirmées par la Figure 11). Ce dernier, lui aussi présent naturellement, était plus âgé que celui rencontré à Namèche mais possédait cependant une circonférence moyenne de 91 cm. La disparité de croissance entre les individus était également moins marquée avec des valeurs de circonférence allant de 70 à 100 cm. Contrairement au site des Dolomies, la roche n'était que rarement affleurante ce qui n'empêchait pas le sol d'être fortement superficiel.

Les horizons rencontrés possédaient la même texture et se succédaient dans le même ordre que ceux identifiés sur le plateau. Le premier sondage réalisé en haut de pente était complètement comparable à ceux réalisés sur le plateau et correspond au début du peuplement étudié. L'horizon 1 s'étendait sur les 20 premiers centimètres de sol et comprenait une charge caillouteuse élevée mais inférieure à 50%. Ensuite, le deuxième horizon était directement apparent sur 30 cm, de couleur jaunâtre caractéristique et possédant une charge caillouteuse supérieure à 50% composée d'éléments au diamètre élevé. Le sondage effectué en milieu de pente, et donc à la fin du peuplement de tilleuls, révèle un sol beaucoup plus superficiel, débouchant rapidement sur l'horizon C.

c) Conclusions retenues pour la modélisation

En raison d'un sol trop superficiel en milieu de pente, ce seront donc les données relatives au « haut de la pente » et donc au début du peuplement qui serviront pour la modélisation. Le profil de sol s'est vu définir pour trois horizons distincts, un horizon 1 (H1) de 20 cm, un horizon 2 (H2) de 30 cm et un horizon 3 de 150 cm. A nouveau, la profondeur de ce dernier a été obtenue par soustraction à partir de la valeur limite choisie au départ (200cm). Lorsque la modélisation a été réalisée pour une profondeur de 100 cm, cet horizon a pris la valeur de 50 cm. Pour la dernière profondeur choisie (50 cm), seuls les deux premiers horizons ont été pris en compte.

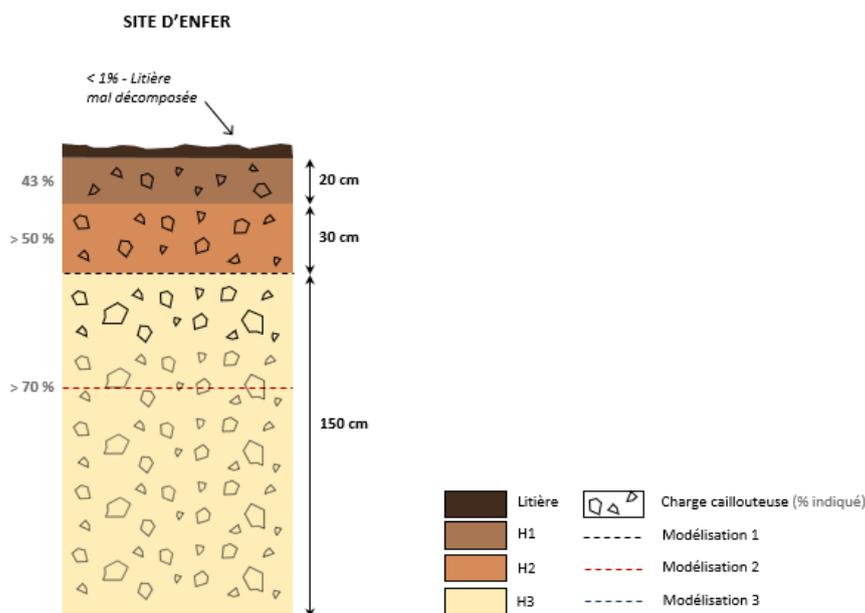


Figure 12 : Schéma représentant le profil de sol du site d'Enfer. Les pointillés correspondent aux différentes profondeurs modélisées (50 cm (noir), 100 cm (rouge) et 200cm (bleu)).

Les mêmes conclusions d'homogénéité de texture le long du profil de sol ont pu être tirées pour ce site. Le Tableau 5 reprend la moyenne de ces analyses et permet de caractériser l'entièreté du sol sondé comme étant du limon fin. Les valeurs très proches obtenues pour les densités apparentes de cette même fraction fine confirment cette conclusion (Tableau 6). Les horizons semblent donc différer principalement par la charge caillouteuse qu'ils contiennent.

Tableau 5 : Synthèse reprenant l'ensemble des données de texture et de structure du sol obtenues sous peuplement pour le site d'Enfer.

Synthèse des données de texture et de charge caillouteuse du sol sous peuplement pour le site d'Enfer							
	% Argile	% Limon	% Sable	Texture	Charge caillouteuse (Labo)	Charge caillouteuse (Bac)	Charge caillouteuse (Terrain)
H1	18	60	22	Limon fin	25%	43%	/
H2	19	63	17	Limon fin	26%	/	51%
H3	19	63	17	Limon fin	/	/	71%

Les charges caillouteuses ont été évaluées selon le même principe que celui expliqué pour le site des Dolomies. C'est donc le taux de cailloux calculé sur base des fosses pédologiques qui sera conservé pour l'horizon 1. Les valeurs de charge caillouteuse pour les horizons 2 et 3 ont été fixées arbitrairement selon le même procédé, considérant que l'horizon 2 comprenait toute la profondeur de sol possédant une charge > à 50% et > à 70 % pour l'horizon 3.

Les densités apparentes sèches ont été comparées dans la continuité de ce qui a été effectué pour le site de Namèche (Tableau 6). Les mêmes conclusions concernant la fosse pédologique et les échantillons en structure conservée ont été vérifiées. A noter cependant que la densité apparente sèche de la fraction fine est plus faible dans le cas d'Enfer (0,96-0,97 contre 1,11-1,12).

Tableau 6 : Synthèse reprenant l'ensemble des densités apparentes calculées pour le sol sous peuplement du site d'Enfer.

Synthèse densités apparentes du site d'Enfer				
	Densité Fraction fine	Densité charge caillouteuse	Densité totale (Labo)	Densité totale (Terrain)
H1	0,96	1,73	1,23	1,27
H2	0,97		1,37	1,36
H3				1,51

Le dernier tableau ci-dessous (Tableau 7), reprend l'ensemble des paramètres hydriques du sol ayant permis l'initiation du programme HYDRUS. Ceux-ci ont également été calculés à l'aide de *Roseta* puis pondérés en fonction de la charge caillouteuse de chaque horizon.

Tableau 7 : Tableau reprenant l'ensemble des paramètres hydriques initiaux du sol d'Enfer pour le logiciel HYDRUS.

Flow parameters d'Enfer						
Avec charge caillouteuse						
	theta r [-]	theta s [-]	Alpha [1/cm]	n [-]	Ks [cm/day]	l [-]
H1	0,043776	0,297426	0,002508	1,7034	86,6343	0,5
H2	0,039347	0,260092	0,002303	1,6863	65,9295	0,5
H3	0,023287	0,153932	0,001363	1,6863	39,0195	0,5
Sans charge caillouteuse						
H1	0,0768	0,5218	0,0044	1,7034	151,99	0,5
H2	0,0803	0,5308	0,0047	1,6863	134,55	0,5
H3						

4.2. Production de variables hydriques

Ces premiers résultats issus de la modélisation hydrique vont d'abord permettre de caractériser et de comparer les sites sur leur capacité à stocker de l'eau et à la rendre accessible aux végétaux. Le deuxième objectif suivi est la production d'indices de sécheresse qui seront, dans le point suivant, mis en relation avec l'indice de croissance annuel des cernes du tilleul.

Les courbes de pF des deux sites seront d'abord analysées et comparées. Cette étape permettra d'évaluer les paramètres hydriques de chacun des horizons tout en mettant en évidence la différence de rétention en eau entre un sol caillouteux ou non. L'évolution du taux volumétrique en eau du sol sera à son tour abordée aux endroits clés du profil de sol afin de bien comprendre son fonctionnement au cours d'une année. Ensuite, la réserve en eau utile maximale ainsi que les quantités d'eau présentes dans le sol à différents potentiels hydriques seront calculées pour chaque site aux trois profondeurs (50 cm, 100 cm, 200 cm).

Les données brutes fournies par le modèle HYDRUS permettront le calcul des indices annuels relatifs à la sécheresse. La démarche de réflexion a d'abord été imaginée pour une profondeur de 200 cm, choix initial discuté précédemment. Cependant, comme cette profondeur accorde une importance très élevée à l'horizon 3, le moins bien caractérisé, il a paru important de vérifier que ce dernier n'influencerait pas trop les résultats. Il se pourrait, par exemple, que la quantité d'eau présente dans cet horizon ne varie presque pas au cours du temps et finisse par « lisser » exagérément les résultats et masquer la sensibilité du sol face aux conditions climatiques. Afin de mesurer l'influence du choix de la profondeur sur les résultats obtenus, l'ensemble des paramètres ont été recalculés pour les profondeurs 100 cm et 50 cm.

4.2.1. Courbes de pF

Les figures ci-dessous (Figures 13 et 14) illustrent le rôle que joue la charge caillouteuse dans la capacité du sol à stocker de l'eau. En effet, que ce soit pour le site des Dolomies ou pour celui d'Enfer, la capacité du sol à retenir de l'eau accessible pour les plantes est plus élevée pour le sol ne contenant que de la fraction fine.

Afin de clarifier cette affirmation, un exemple va être décrit sur base des résultats obtenus pour l'horizon 1 d'Enfer. Sur la première figure le taux volumétrique en eau du sol (θ) à la capacité au champ ($\log(|h|) = 2,5$) affiche environ 37% pour la fraction fine alors qu'il n'atteint que 25% lorsque la charge caillouteuse est prise en compte. Les valeurs pour ces deux graphes au point de flétrissement ($\log(|h|) = 4,2$) valent respectivement 10% et 6% pour ce même site. Ceci permet d'approximer une quantité accessible de 27g d'eau/100g de sol dans la fraction fine et de 19g d'eau/100g de sol lorsqu'il y a présence d'éléments grossiers. Avec le même raisonnement, une quantité d'eau de 24g/100g de sol et de 20g/100g de sol peuvent être attribuées à l'horizon 1 des Dolomies.

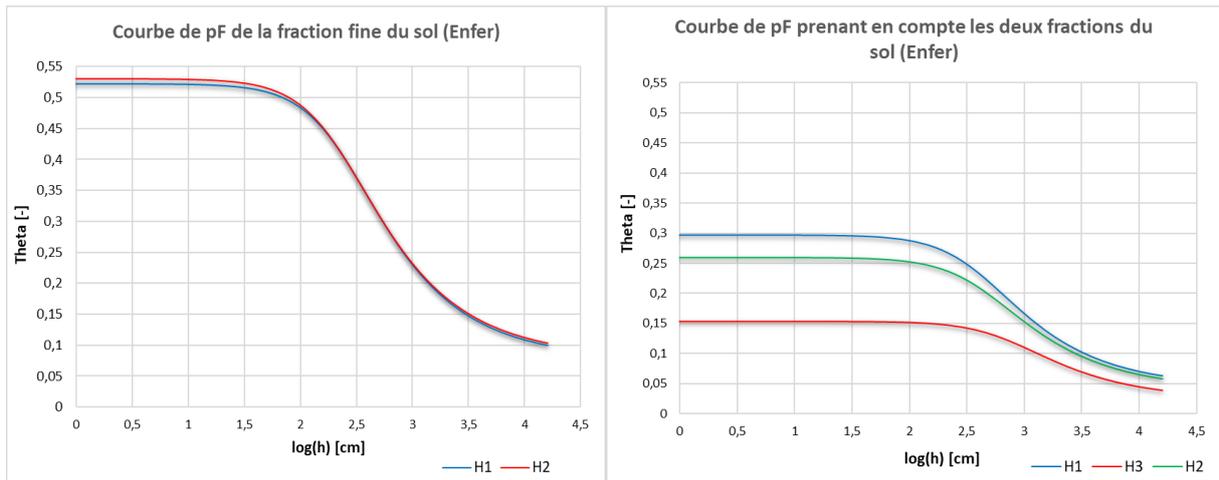


Figure 13 : Comparaison entre les courbes de pF du site Enfer.

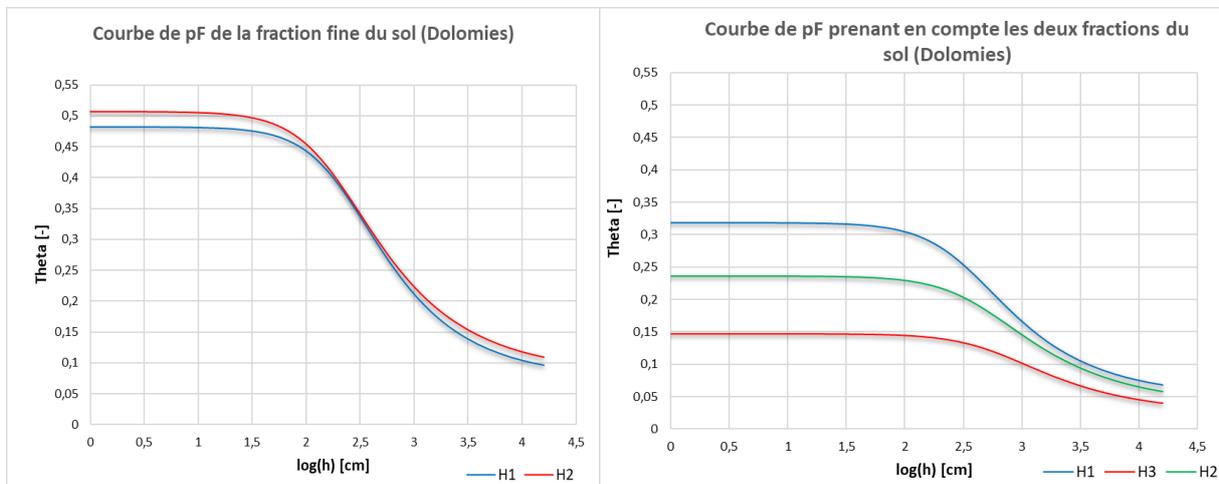


Figure 14 : Comparaison entre les courbes de pF du site des Dolomies.

L'influence de la charge caillouteuse est observable pour les deux sites et implique une diminution presque équivalente de leur capacité à stocker de l'eau bien que les valeurs pour le site d'Enfer soient légèrement supérieures. Cette analyse semble cohérente étant donné que les deux sites sont fort semblables en terme de composition granulométrique du sol (Tableaux 2 et 5 de la section 4.1.3). Il est intéressant de noter que seuls deux horizons sont repris dans la courbe de pF de la fraction fine contre trois pour l'autre courbe. Ce résultat est tout à fait normal car les horizons 2 et 3 ont en réalité la même composition texturale et ne diffèrent que par leur fraction grossière. Les courbes de la fraction fine sont également fort proches pour les mêmes raisons : la densité apparente sèche et la composition granulométrique ne sont que très peu dissemblables d'un horizon à l'autre au sein d'un même site. En conclusion, il est visible que le facteur influençant le plus le comportement de stockage des trois horizons pour les deux sites d'étude est la quantité d'éléments grossiers présente dans chacun d'eux.

4.2.2. Taux volumétrique en eau du sol

La Figure 16 met en évidence l'évolution journalière du taux volumétrique en eau du sol durant l'année 1961 pour les deux sites étudiés. Chacun des graphes correspond à un des trois horizons, tels

que décrits lors de la caractérisation des sites. Les trois courbes qu'il représente font référence aux nœuds d'observation placés au début, au milieu et à la fin de chaque horizon (Figure 15).

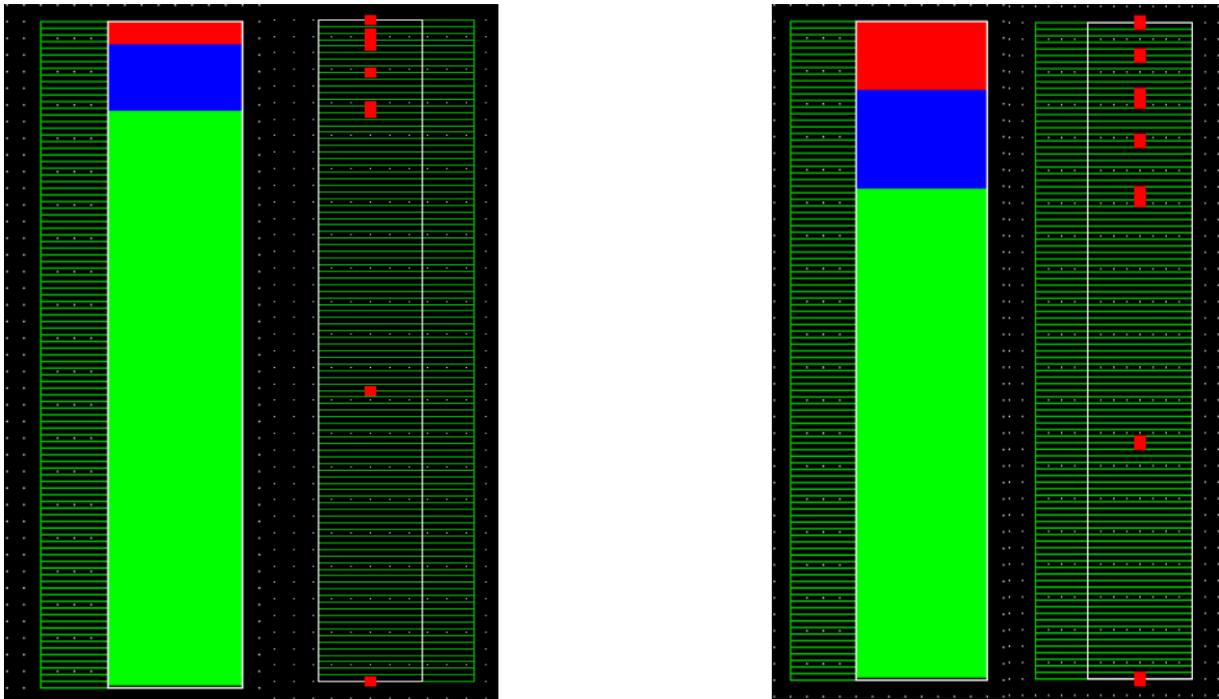


Figure 15 : Représentation des horizons (H1 en rouge, H2 en bleu et H3 en vert) au sein des profils de sol des Dolomies (à gauche) et d'Enfer (à droite) ainsi que des nœuds d'observations (carrés rouges) étudiés.

Les deux horizons 1 (Graphes supérieurs de la Figure 16) affichent de grandes variations pour leur taux volumétrique en eau, tant au cours de l'année qu'au sein d'une même journée. Le début de cet horizon, qui correspond en réalité à la surface du sol, montre de nombreux jours très secs durant la majorité de la saison de végétation. Ce déficit hydrique démarre plus tôt dans l'année pour le site d'Enfer et atteint des valeurs légèrement plus basses et, ce, de manière plus fréquente que le site des Dolomies.

Le sol situé à Hastière, montre un comportement constant tout au long de son profil. Les variations journalières sont visibles à toutes les profondeurs lorsqu'elles ont lieu mais avec une intensité variable. La profondeur influence la quantité d'eau retenue ; elle est plus faible dans l'horizon 3 mais cet écart de valeurs est moins marqué entre l'intérieur de l'horizon 1 et l'horizon 2. Il est intéressant de remarquer que l'horizon 3, pourtant plus profond, montre de faibles variations de son theta entre le début (51 cm) et la fin de son profil (200 cm) durant une même journée, contrairement aux deux premiers horizons (en particulier l'horizon 1). Cette affirmation est surtout vérifiée durant la saison de végétation où l'humidité du sol est globalement plus faible par rapport au reste de l'année.

Le comportement du second site mène globalement aux mêmes conclusions, excepté pour son troisième horizon. L'humidité du sol est bien moins constante entre le début (27 cm) et la fin (200 cm) de celui-ci. Dans ce cas, la remarque est valable pour l'entièreté de l'année et non pas uniquement pour la période plus sèche observable sur le graphique.

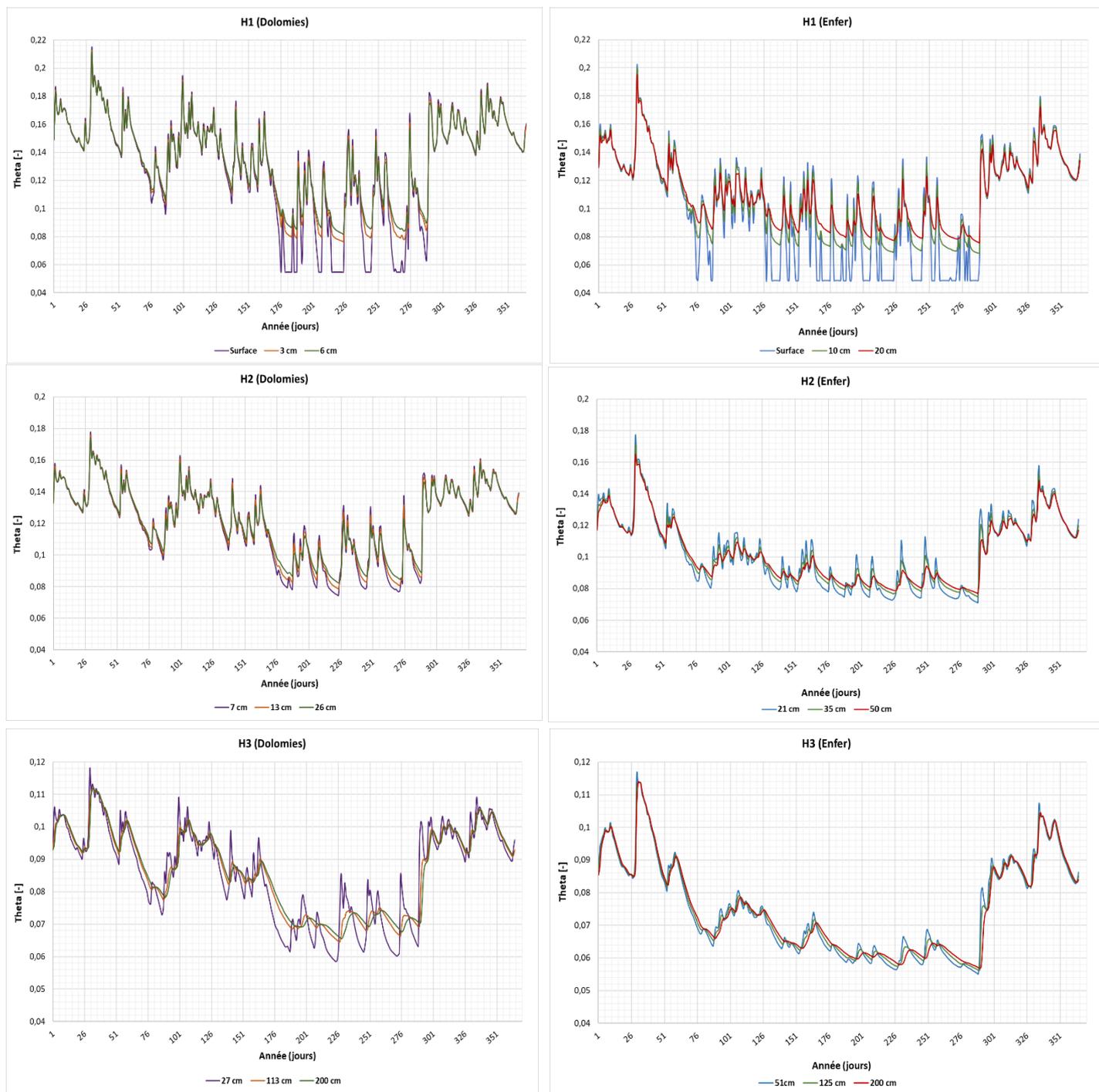


Figure 16 : Evolution journalière du taux volumétrique en eau du sol (Theta) en fonction de la profondeur (au début, au milieu et à la fin de chaque horizon) pour les deux sites d'étude durant l'année 1961. – A gauche : Dolomies. – A droite : Enfer

De manière générale, les deux sites affichent un taux d'humidité plus faible durant les mois d'été et plus élevé durant l'hiver, situation attendue et directement liée au climat belge. Le site d'Enfer semble souffrir de taux d'humidité plus bas dès le mois de mars et cette tendance se prolonge jusqu'à l'automne, impliquant une faible humectation du sol durant l'entièreté de la saison de végétation. L'année 1961 est une année tout à fait normale d'un point de vue météorologique pour le site localisé à Hastière mais montre peut-être une situation légèrement plus favorable que la norme pour la situation de Namèche. Les conclusions tirées peuvent raisonnablement être considérées comme

constantes d'une année à l'autre pour peu que celle-ci ne subisse pas un évènement climatique exceptionnel.

4.2.3. Evaluation des réserves en eau du sol

Afin de caractériser au mieux le sol des deux sites d'étude, les quantités d'eau maximales pouvant être attendues à différents potentiels hydriques ont été calculées et sont reprises dans le tableau de synthèse (Tableau 8). Ces valeurs, rappelons-le, doivent être vues comme des hauteurs de lames d'eau, exprimées en mm, et évaluées pour une certaine profondeur de sol. Cette première variable ne tient pas compte de l'accessibilité de l'eau par la végétation et met simplement en lumière la capacité de rétention en eau du sol pour ces potentiels de manière absolue. Les quantités d'eau présentes dans le sol ont donc été estimées aux trois profondeurs pour la capacité au champ (-350 hPa), et pour le point de flétrissement (-15000 hPa). Afin d'obtenir des valeurs intermédiaires, les quantités d'eau restantes lorsque le tiers (~ -5000 hPa), la moitié (~ -7500 hPa) et les deux tiers (~ -10000 hPa) de la réserve utile en eau du sol sont vides ont été estimées. Elles serviront de base de comparaison pour la suite des résultats et permettront d'évaluer si les valeurs annuelles ou journalières rencontrées sur les deux sites représentent une quantité d'eau suffisante pour la survie du Tilleul.

La première observation permet de confirmer que les stocks en eau augmentent bien avec la profondeur de sol sondé. Cela signifie que plus le sol sur lequel se trouve le tilleul à petites feuilles est profond, plus la quantité qu'il est capable d'atteindre est élevée pour peu qu'il possède des racines dans les différentes strates du sol. Ainsi pour le site d'Enfer, la quantité d'eau présente dans 200 cm de sol est environ 3 fois supérieure à celle trouvée dans 50 cm de sol et 1,7 fois supérieure à la quantité présente dans 100 cm. Le deuxième site a des ratios presque équivalents et possède environ 3,3 fois plus d'eau dans 200 cm de sol que dans 50 cm et est environ 1,9 fois supérieur que dans les 100 premiers cm de sol. Une dernière observation permet de remarquer que la quantité d'eau présente au point de flétrissement, et donc inaccessible pour les végétaux, est loin d'être négligeable. En effet, elle représente en moyenne 37% de la quantité d'eau stockée à la capacité au champ pour le site d'Enfer et environ 34% pour celui des Dolomies.

Tableau 8 : Synthèse des quantités d'eau présentes (exprimées en mm de hauteur de lame d'eau) à différents potentiels hydriques caractéristiques à 200 cm, 100 cm et 50 cm de profondeur pour les sites d'Enfer et des Dolomies.

	Quantité d'eau présente dans le sol [mm]					
	Enfer			Dolomies		
	200 cm	100 cm	50 cm	200 cm	100 cm	50 cm
Capacité au champ	320	181	112	321	172	98
1/3 de RU vide	124	68	40	135	71	39
1/2 de RU vide	108	59	35	118	62	34
2/3 de RU vides	105	56	32	106	56	31
Point de flétrissement	88	49	30	95	51	29

Un second tableau (Tableau 9) se base sur les valeurs calculées et reprises dans le Tableau 8 afin de donner une appréciation de la réserve en eau utile maximale (RUM) et mobilisable par les végétaux. Une première réserve en eau a été calculée en soustrayant les quantités d'eau présentes au point de flétrissement de celles évaluées à la capacité au champ. La seconde réserve utile a été obtenue par la même méthode, mais en prenant la quantité d'eau présente lorsque la force de succion des végétaux atteint les 10 000 hPa (c'est-à-dire lorsque les 2/3 de la réserve en eau utile sont vides). En effet, même si une certaine quantité d'eau est toujours mobilisable à ce moment, la situation reste

inconfortable pour l'arbre car il doit développer une grande force pour n'accéder qu'à une faible quantité d'eau.

Les résultats obtenus dans ce tableau s'inscrivent dans la continuité des valeurs calculées précédemment. En effet, la RUM augmente avec la profondeur pour les deux sites. Les réserves calculées pour le site d'Enfer sont généralement légèrement supérieures à celles des Dolomies mais restent tout de même dans une gamme de valeurs très proche. Il est intéressant de noter que l'eau présente dans les 2/3 de la réserve ou dans sa totalité ne diffère presque pas. Alors que la force exercée par les végétaux augmente considérablement entre ces deux niveaux de stockage, la quantité d'eau supplémentaire mobilisée n'est de l'ordre que de quelques millimètres.

A titre indicatif, ces valeurs de RUM ont été comparées à des réserves en eau estimées dans d'autres publications. Les quantités d'eau ici obtenues semblent indiquer une situation moins favorable pour la profondeur de 200 cm que celle habituellement rencontrée pour des sols de type Gbbr possédant une charge caillouteuse > à 50 % (Himpens et al., 2017). Cependant, la tendance s'inverse lorsque les quantités d'eau sont évaluées pour les profondeurs 50 cm et 100 cm. Elles affichent alors plus de deux fois la quantité d'eau généralement rencontrée. L'une des explications plausibles serait que les sols présentant ce genre de charge caillouteuse, et étudiés lors de cette recherche, étaient situés en Ardenne et ne possédaient donc pas la même composition granulométrique que ceux d'Enfer et des Dolomies. Lorsque la quantité d'eau présente à la profondeur 100 cm est comparée à ce qui est habituellement retenu par un sol limoneux forestier (ce qui correspond à la granulométrie des sites présentement étudiés dans ce travail), les valeurs sont sensiblement plus proches. Cela étant, même si les réserves utiles à 200 cm sont plus faibles que la norme, elles restent cependant confortables pour le tilleul. Ridremont et al., (2012) confirme que toute réserve utile supérieure à 200 mm n'est absolument pas contraignante pour les essences. Rappelons que dans cette analyse ce sont bien les réserves utiles idéales qui sont calculées, dans le cas où le taux d'humidité du sol serait maximal pour l'ensemble du profil sondé. Cette situation n'est nullement rencontrée tout au long de l'année mais indique que le potentiel de rétention en eau du sol est tout à fait confortable pour le tilleul, bien qu'il dépende évidemment des conditions climatiques rencontrées.

Tableau 9 : Synthèse des réserves utiles maximales d'eau (RUM), exprimées en mm, avec comme seuil inférieur respectivement le point de flétrissement et les 2/3 de la réserve utile vides pour les deux sites d'étude à trois profondeurs différentes.

	Réserve Utile Maximale [mm]			
	Point de flétrissement		2/3 de la RU vides	
	Enfer	Dolomies	Enfer	Dolomies
200 cm	232	226	215	215
100 cm	132	121	125	116
50 cm	82	69	80	67

4.2.4. Evaluation de la réserve utile au cours du temps

La Figure 17 permet de mettre en relation les quantités d'eau présentes dans le sol (en mm) et les précipitations cumulées (en mm) pour chaque année au cours de la période étudiée. La valeur annuelle choisie pour exprimer cette évolution de « stock » est la valeur médiane de cette réserve hydrique totale afin de limiter l'influence des éléments extrêmes pouvant se produire sur une année. Cette première approche ne tient pas compte de ce qui est accessible ou non pour les plantes. Elle prouve simplement que les stocks d'eau dans le sol sont directement influencés par la quantité de

précipitations enregistrée chaque année. En effet, il apparait très clairement pour les deux sites que les réserves d'eau du sol suivent le même schéma évolutif que celui des précipitations.

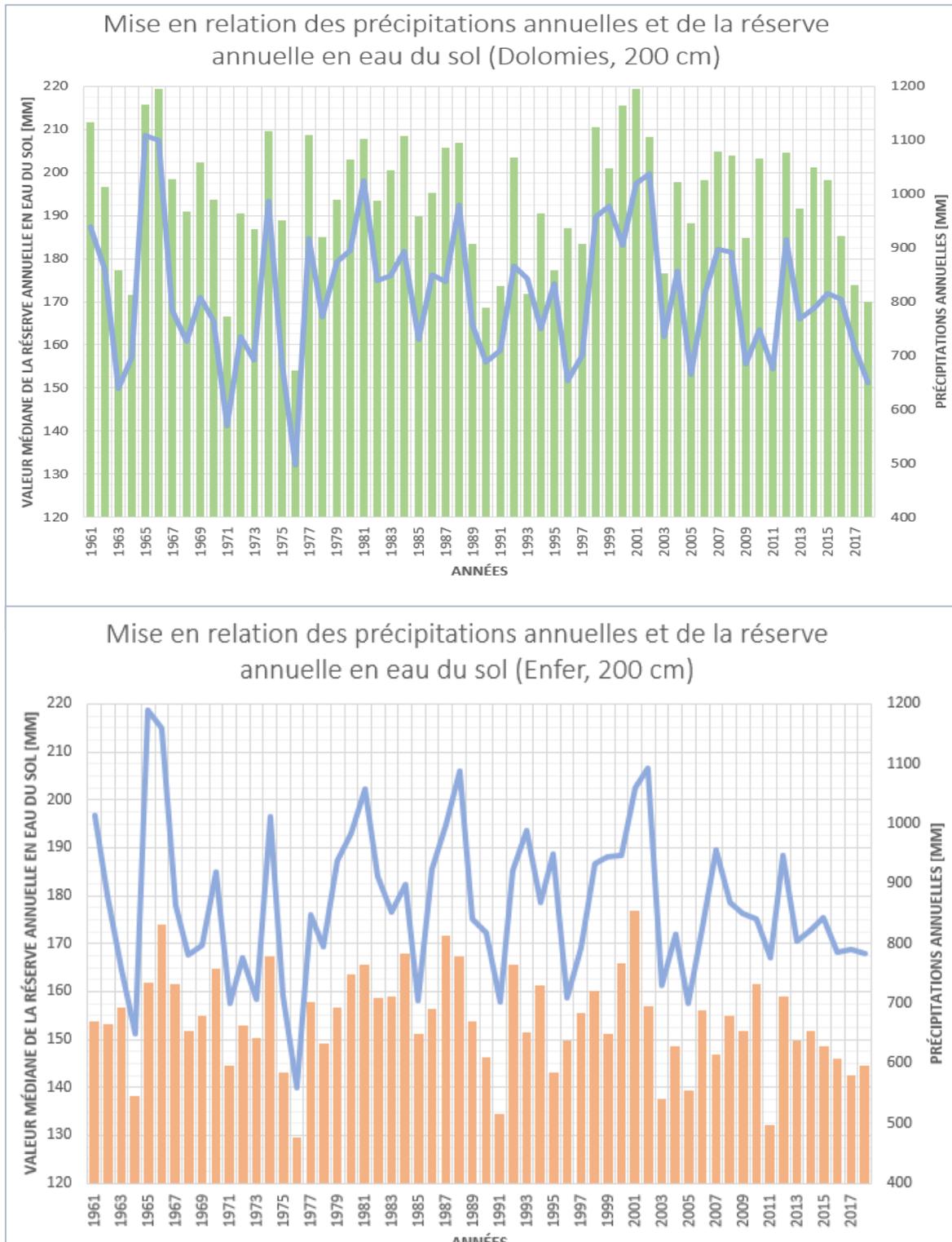


Figure 17 : Graphiques comparant la valeur médiane des réserves annuelles en eau du sol sur 200 cm de profondeur et les précipitations associées au cours du temps entre les sites d'Enfer (en-dessous) et des Dolomies (au-dessus).

Cette première analyse générale permet de comparer les sites sur base de la quantité d'eau qu'ils reçoivent et de la manière dont ils la stockent. Le site des Dolomies perçoit en moyenne des précipitations annuelles plus faibles que celles enregistrées à Hastière (environ 50 mm de moins). Cependant, en terme de stocks, la quantité d'eau retenue par ce même site est en moyenne de 40 mm supérieure à celle présente dans le sol du site d'Enfer.

Il est intéressant de remarquer que certaines années voient leur stock d'eau particulièrement remplis (années positives) alors que d'autres sont marquées par une quantité d'eau très faible (années négatives). Les années concernées sont globalement assez proches d'un site à l'autre, bien que ceux-ci ne ressentent pas l'événement avec la même intensité. Les minima les plus importants relevés pour ces deux sites sont les années communes 1976 et 2011 tandis que les années les plus favorables communes aux deux sites sont 1966 et 2001.

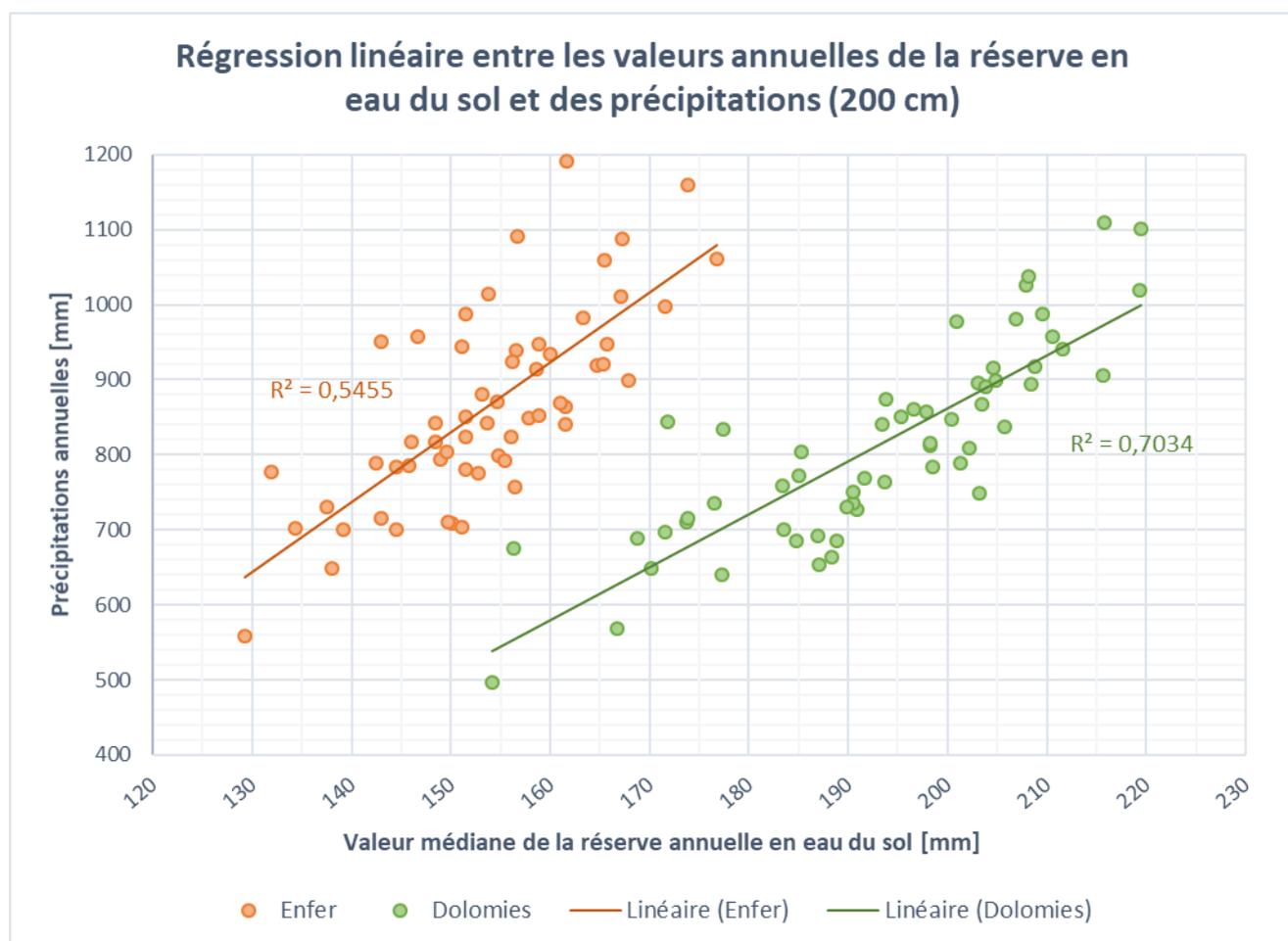


Figure 18 : Représentation de la régression linéaire et du coefficient de détermination obtenus entre les valeurs médianes annuelles de la réserve en eau du sol et les précipitations annuelles cumulées pour les deux sites étudiés.

La Figure 18 permet de préciser cette relation décrite dans les précédents paragraphes. La régression effectuée montre une meilleure correspondance linéaire pour les valeurs relatives au site des Dolomies que pour celles du site d'Enfer. Les coefficients de détermination restent tout de même très élevés dans un cas comme dans l'autre. Cette interprétation est à garder à l'esprit pour la suite des conclusions, car elle indique déjà le fait que les précipitations ont un impact plus déterminant dans l'approvisionnement de la réserve en eau du sol situé à Namèche par rapport à la localité de Hastière.

4.2.5. Indices de sécheresse

Afin d'évaluer l'importance des stress hydriques enregistrés chaque année, différents indices le décrivant ont été produits. Ceux-ci ont été imaginés pour chaque année en fonction de chaque site et ont été testés pour chaque profondeur.

Tout d'abord, un nombre total de jours de sécheresse a été calculé annuellement. Plusieurs seuils de sécheresse ont été pris en compte et ont mené à des indices différents qui ont soit abouti, soit été abandonnés. Les quantités d'eau calculées au point de flétrissement, au 2/3 de la réserve en eau, pour le 10^e et 1^{er} percentile ont servi de limite caractéristique induisant une sécheresse. Les indices ont donc simplement été calculés sur base du nombre de jours où la réserve totale en eau du sol passait en-dessous de ce niveau. Une fois cette information connue, il a semblé judicieux de préciser combien de jours sur ce total concernaient la période s'étalant de mars à juillet ainsi que pour chacun de ces mois pris séparément. Le choix de ce laps de temps est tiré de la littérature car il semble que ce soit durant ces mois que le tilleul soit le plus sensible à un manque d'eau (Taverniers, 2017).

La première création d'indices reprise ci-dessus a permis de faire une sélection et de ne conserver que les seuils de sécheresse intéressants pour la suite. En effet, comme cela sera présenté dès le point suivant, certains indices n'ont mené à aucun résultat et ont donc été écartés pour la suite des évaluations. Sur cette base, la durée de la plus longue sécheresse recensée chaque année a uniquement été évaluée pour les seuils jugés intéressants.

Un dernier indicateur de sécheresse, très souvent employé dans les articles scientifiques rédigés par l'INRA a été généré. Il a pour objectif de calculer une valeur relative de la réserve en eau du sol par rapport à la réserve en eau maximale. L'idée était dans le cas présent d'évaluer la réserve relative en eau journalière afin de mettre en évidence le nombre de jours où cette valeur était comprise entre 0 et 0,4. Le 0 indiquant alors que le sol avait atteint le point de flétrissement alors que 0,4 est la valeur relative pour laquelle l'eau n'est plus disponible dans les macropores du sol. La plante devra donc développer des efforts de succion importants pour pouvoir extraire de l'eau et sera donc en situation d'inconfort. L'intérêt de travailler en valeur relative est que cet indicateur permet de comparer des sols de profondeurs différentes sans discrimination.

a) Nombre total de jours de sécheresse par année

- **Point de flétrissement**

Ce premier seuil n'a pas permis d'obtenir de résultat concluant pour les deux sites étudiés. La réserve journalière totale du sol n'est jamais passée en-dessous de cette valeur critique pour quelque profondeur que ce soit.

Si cet indicateur ne semble pas adapté pour mettre en évidence un stress hydrique il permet tout de même de poser certaines questions. En effet, il semble bien qu'une quantité d'eau théoriquement disponible pour la plante soit présente dans le sol mais que celle-ci ne soit malgré tout pas exploitée. Deux hypothèses peuvent expliquer ce constat :

- L'eau est bien présente dans le sol et à un potentiel hydrique atteignable mais le tilleul ne parvient pas à l'utiliser (densité racinaire trop faible, charge caillouteuse trop importante) ;
- Le tilleul est indifférent à cette quantité d'eau car il n'est à aucun moment en situation de stress hydrique.

La suite des résultats permettra de préciser ces hypothèses même si elles ne pourront pas être confirmées ou démenties dans leur intégralité. L'indifférence du tilleul pourra notamment être

confirmée ou infirmée en fonction de l'analyse cernes-réserve hydrique en fonction du niveau de corrélation atteint.

- 2/3 de la Réserve Utile

Comme pour le seuil précédent, cet indice n'est pas exploitable comme résultat. Seul le site d'Enfer voit l'année 1976 afficher une vingtaine de jours où la réserve en eau est inférieure à la quantité d'eau calculée pour ce potentiel. Cette observation, même si elle est intéressante, ne permet pas de conserver cet indicateur pour la suite de l'analyse, ni de dégager la moindre tendance.

Les mêmes conclusions peuvent être obtenues dans le cas du point de flétrissement. Ces deux valeurs ne semblent pas suffisamment discriminantes pour faire ressortir une tendance au sein de chacun des sites. Ces résultats ont influencé le choix de s'intéresser à des indices plus « statistiques » dans la suite de la recherche et non plus axés sur la littérature.

- 10^e percentile

Sur base des constatations tirées des deux indices précédents, un troisième seuil a été imaginé. Dans ce cas-ci, l'idée était de trouver une caractéristique discriminante entre les années étudiées sans se baser sur une valeur spécifique de la littérature. La valeur du 10^e percentile a permis d'obtenir des résultats exploitables et d'être conservée dans la suite de l'analyse.

Les deux graphes (Figure 19) montrent une très faible influence de la profondeur sur le nombre total de jours de sécheresse⁴ observé annuellement. En effet, les années présentent des tracés similaires pour chaque profondeur bien que ceux-ci varient légèrement en terme de jours. Dans la suite des résultats, seuls les graphiques reprenant la profondeur de 200 cm seront discutés car l'étude du comportement du sol à des profondeurs plus faibles mènera aux mêmes conclusions.

L'allure des courbes du site d'Enfer pour ce même graphe affiche une certaine tendance. Tout d'abord, depuis 1992, toutes les années ont enregistré au moins un jour sec. S'il est vrai, qu'entre les années 1992 et 2007, le nombre de jours était très fluctuant d'une année à l'autre ; ce nombre de jours tend à augmenter et à se stabiliser depuis cette date, outre les années 2012 et 2013 qui sont plus basses que la moyenne obtenue sur cette période de temps. Cette observation est moins marquée sur le site des Dolomies qui enregistre encore une année sans sécheresse en 2008. Cependant par la suite, le nombre de jours de sécheresse tend également à augmenter et plus aucune année sans jour de sécheresse ne sera enregistrée. Cet événement était pourtant très fréquent avant 1992.

⁴ Etant donné que la réserve totale en eau du sol ne passe à aucun moment sous la valeur du point de flétrissement, l'utilisation de la notion de « sécheresse » est sans doute exagérée. Ici, c'est surtout la différence d'humidité du sol qui est mis en évidence. Il faudrait certainement parler dans le cas présent de nombre de jours « plus secs » et non pas de sécheresse. Cependant, dans un souci de cohérence et afin de ne pas alourdir le texte, la notion de « sécheresse » sera malgré tout employée dans la suite de ce travail même si elle ne désigne pas réellement le phénomène en lui-même

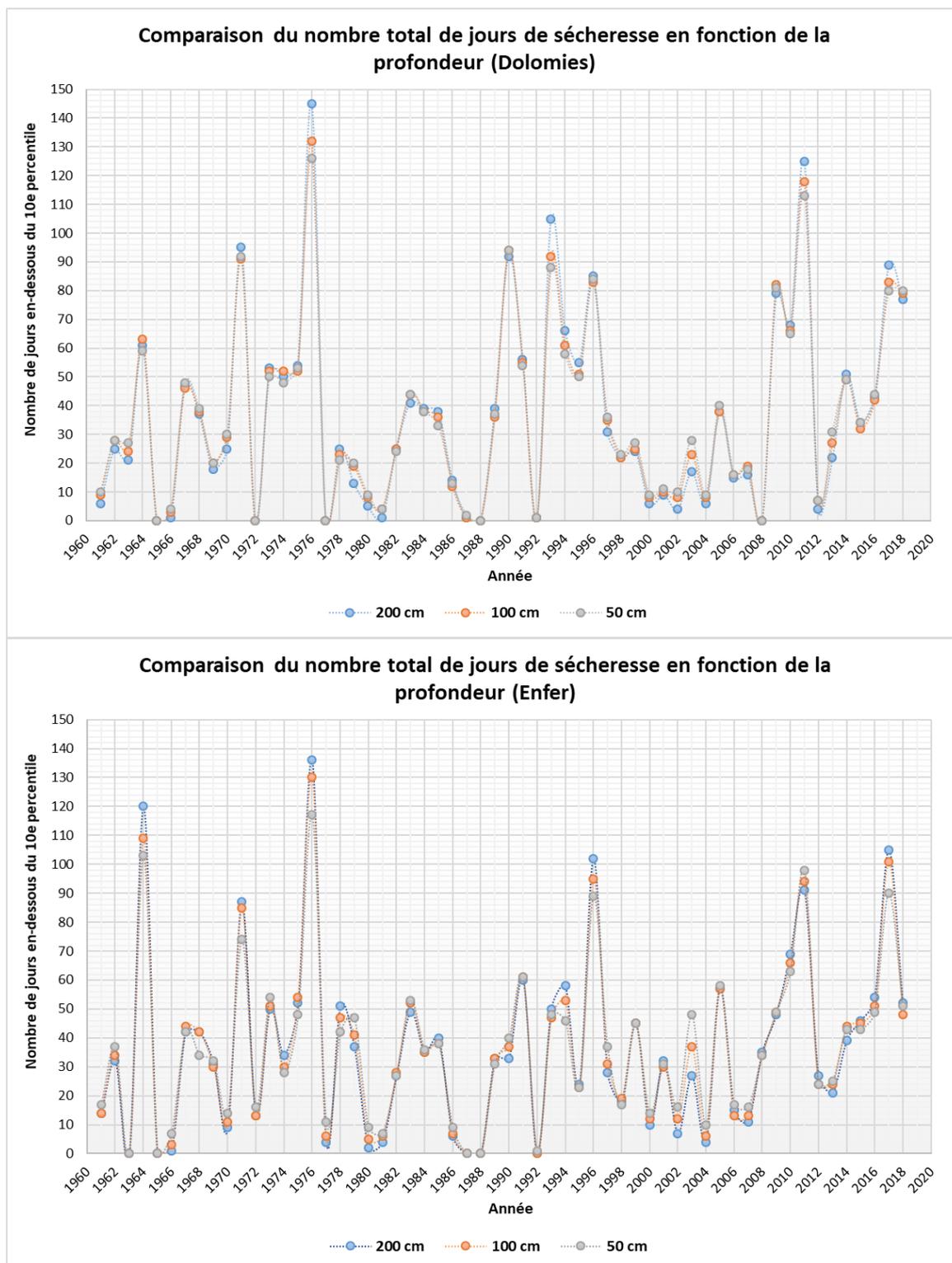


Figure 19 : Graphiques permettant de comparer le nombre total de jours en-dessous du seuil de sécheresse (10e percentile) pour les trois profondeurs étudiées. Au-dessus : Dolomies. En-dessous : Enfer.

L'évolution du nombre total de jours de sécheresse au cours du temps pour chacun des sites est présentée à la Figure 20. L'année 1976 semble mettre les deux sites d'accord, ils atteignent alors le nombre le plus élevé de jours de stress hydrique de la période de temps étudié. Les années 1965 et 1988 sont, quant à elles, les années durant lesquelles le sol n'a pas semblé enregistré de déficit en eau. Il est intéressant de noter que ces années plus favorables ne correspondent pas aux années décrites comme telles par la valeur médiane (Figure 17). Les années n'affichant pas de maximum, mais sèches malgré tout, ne sont pas toujours les mêmes sur les deux sites. De plus, le nombre de jours considéré comme « sec » n'est pas non plus comparable pour une même année entre ces deux sites.

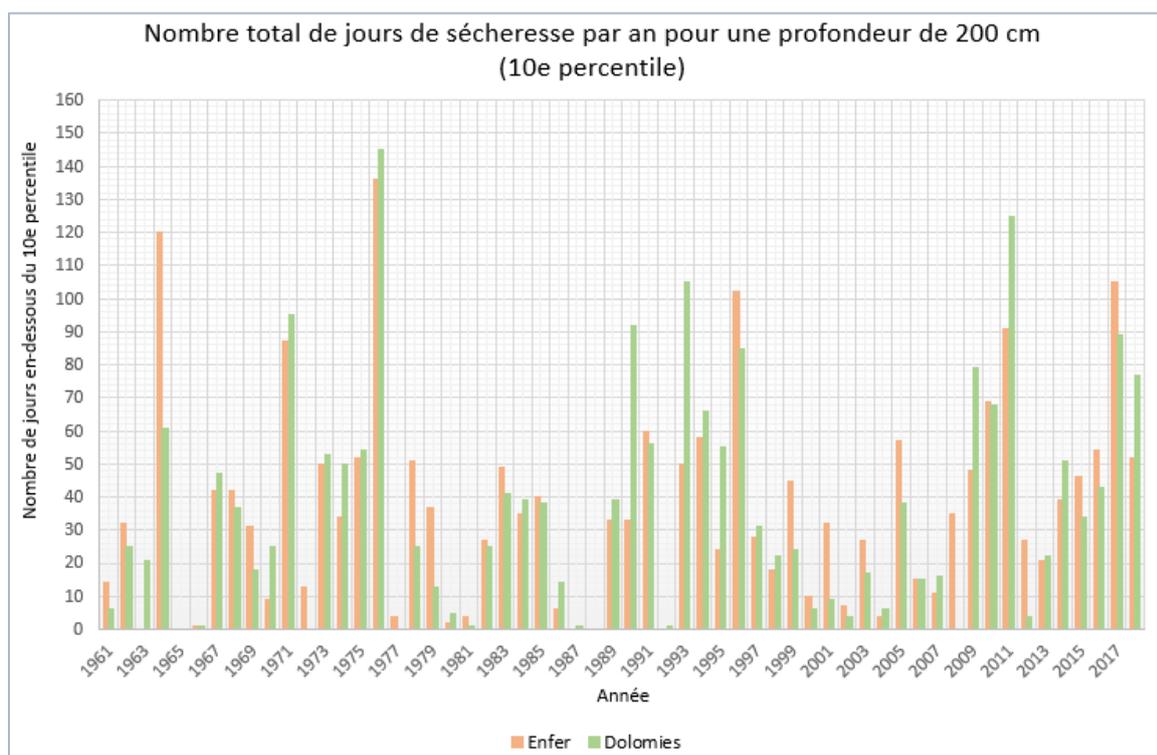


Figure 20 : Evolution au cours de temps du nombre de jours en déficit hydrique sur base de la valeur seuil "10e percentile" pour les deux sites étudiés.

Comme annoncé, la dernière analyse traitée dans cette section s'est focalisée sur la répartition des jours de sécheresse au sein de la période s'étendant de mars à juillet (Figure 21). La principale information ressortant pour les deux sites est que ce nombre de jours correspond systématiquement à une fraction du total de jours enregistrés. Plusieurs situations d'inconfort ont eu lieu sur l'ensemble de l'année et n'apparaissent donc pas uniquement durant cette « période sensible » pour le tilleul. A nouveau, le nombre de jours enregistrés pour les deux sites n'est pas équivalent pour une même année. Le nombre de jours en fonction du mois est également très variable d'une année à l'autre, mais il apparait clairement que le mois de mars n'enregistre un stress hydrique qu'en cas de rares occasions.

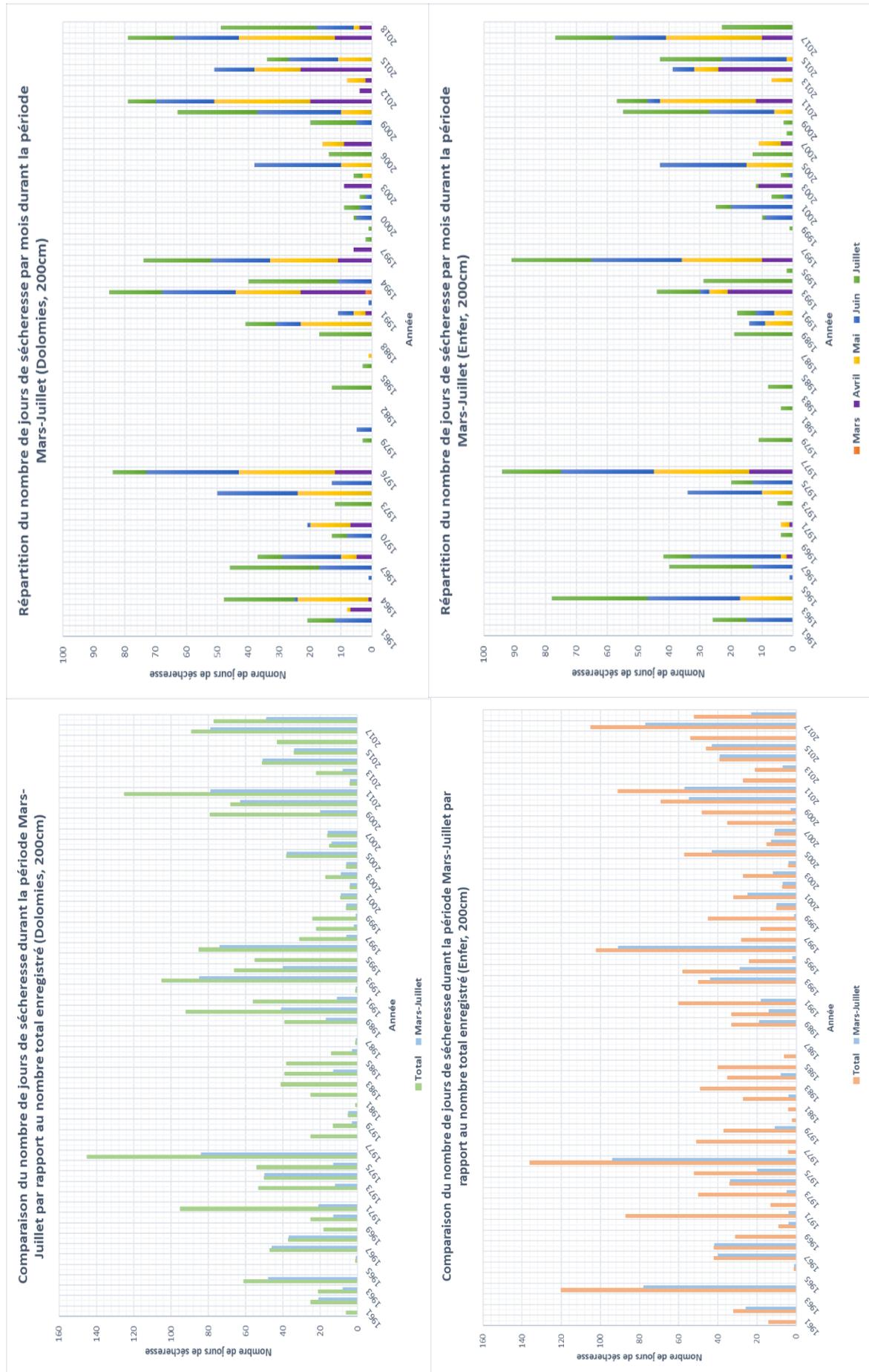


Figure 21 : Gauche : Graphiques comparant le nombre total de jours de sécheresse annuel et celui durant la période allant de mars à juillet. - Droite : Répartition des jours de sécheresse durant les mois de mars à juillet.

- 1^{er} percentile

Afin de compléter l'analyse « plus statistique » du jeu de données, le seuil de sécheresse a été abaissé jusqu'au 1^{er} percentile. Ce choix étant beaucoup plus discriminant pour les années, la Figure 22 représentant la sécheresse annuelle de cet indice ne pointe que peu d'années présentant un stress. Cela étant, certaines années permettent de ressortir et de confirmer certaines informations déjà captées précédemment. De plus, en diminuant le nombre d'année comportant des jours « secs », cet indice permet peut-être de mieux exprimer la réelle situation de déficit hydrique vécue par le tilleul.

L'année 1976 est sans contestation possible l'année la plus sèche enregistrée pour ces deux sites. Le nombre de jours de détresse culmine à 50 jours et 47 jours respectivement pour la localisation de Hastière et de Namèche. Cette valeur maximale est remarquable puisque les maxima suivants enregistrés pour ces mêmes sites sont de l'ordre de 38 et 29 jours.

Le fait que des années sèches soient variables d'un site à l'autre est d'autant plus marqué dans le cas présent, notons spécialement l'année 1964, très stressante pour le site d'Enfer alors que les Dolomies n'enregistrent même pas un jour en condition inconfortable.

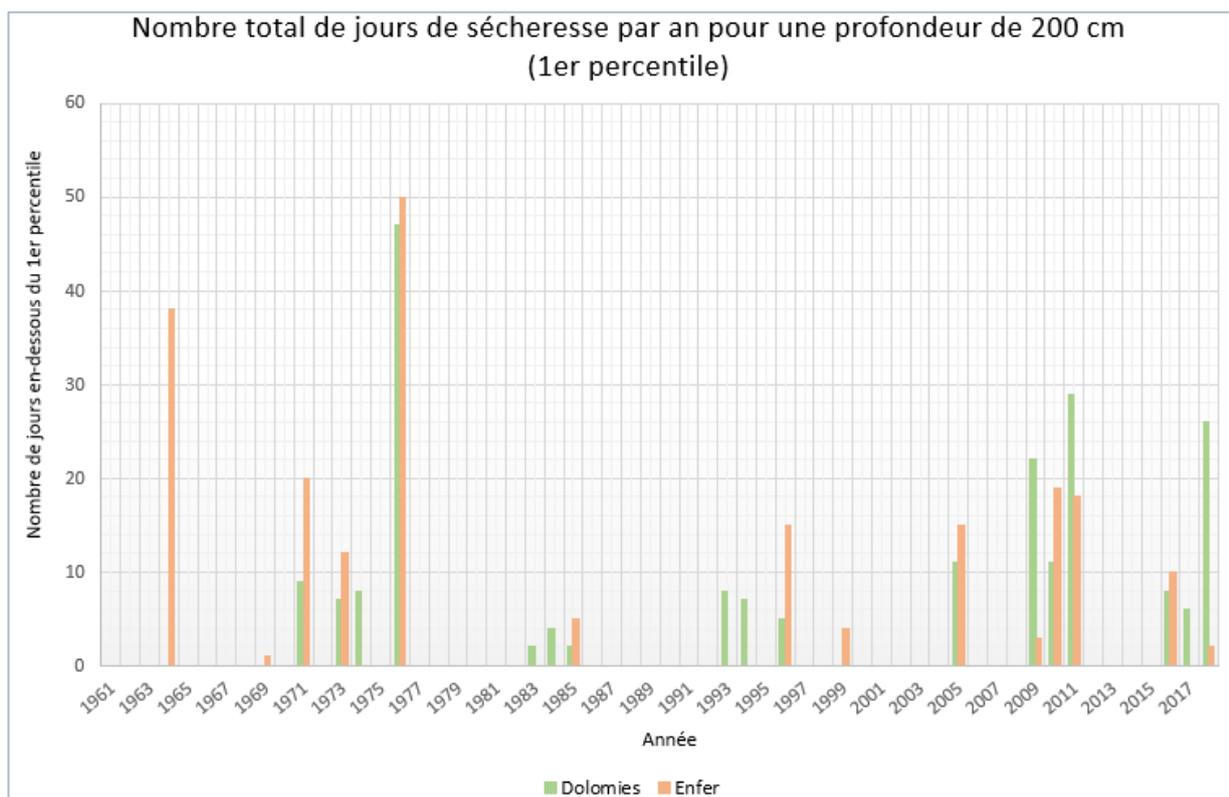


Figure 22 : Evolution au cours de temps du nombre de jours en déficit hydrique sur base de la valeur seuil "1er percentile" pour les deux sites étudiés.

b) Nombre de jours de sécheresse cumulés

Les premiers indices calculés ci-dessus ont montré qu'un certain nombre de jours secs était observable au cours du temps mais ne donnait aucune information concernant la durée de celle-ci. Afin de combler cette lacune, la sécheresse comprenant le plus de jours à la suite a été identifiée pour chacun des sites pour chaque année. Cet indice a été évalué pour chaque profondeur mais seuls les résultats relatifs à 200 cm de profondeur seront à nouveau discutés (Figure 23). Cette démarche n'a

été entreprise que pour le seuil de sécheresse permettant de comparer le plus grand nombre d'années entre elles, à savoir le 10^e percentile.

Les valeurs obtenues pour cet indicateur sont plus basses que celles montrées par l'indice précédemment analysé pour le même seuil de sécheresse. Cette information démontre ainsi que le nombre total de jours de sécheresse correspond en réalité à plusieurs sécheresses plus ou moins longues entrecoupées de jours confortables pour le tilleul.

Les mêmes observations que celles précédemment émises pour l'année 1976 peuvent être à nouveau tirées dans ce cas-ci. Assez logiquement les années 1965 et 1988 n'obtiennent pas de valeur pour leur longueur de sécheresse étant donné qu'aucun jour n'a été enregistré pour elles lors du décompte total. La variabilité de longueur de sécheresse entre les sites pour la même année se retrouve à nouveau visible sur ce graphique.

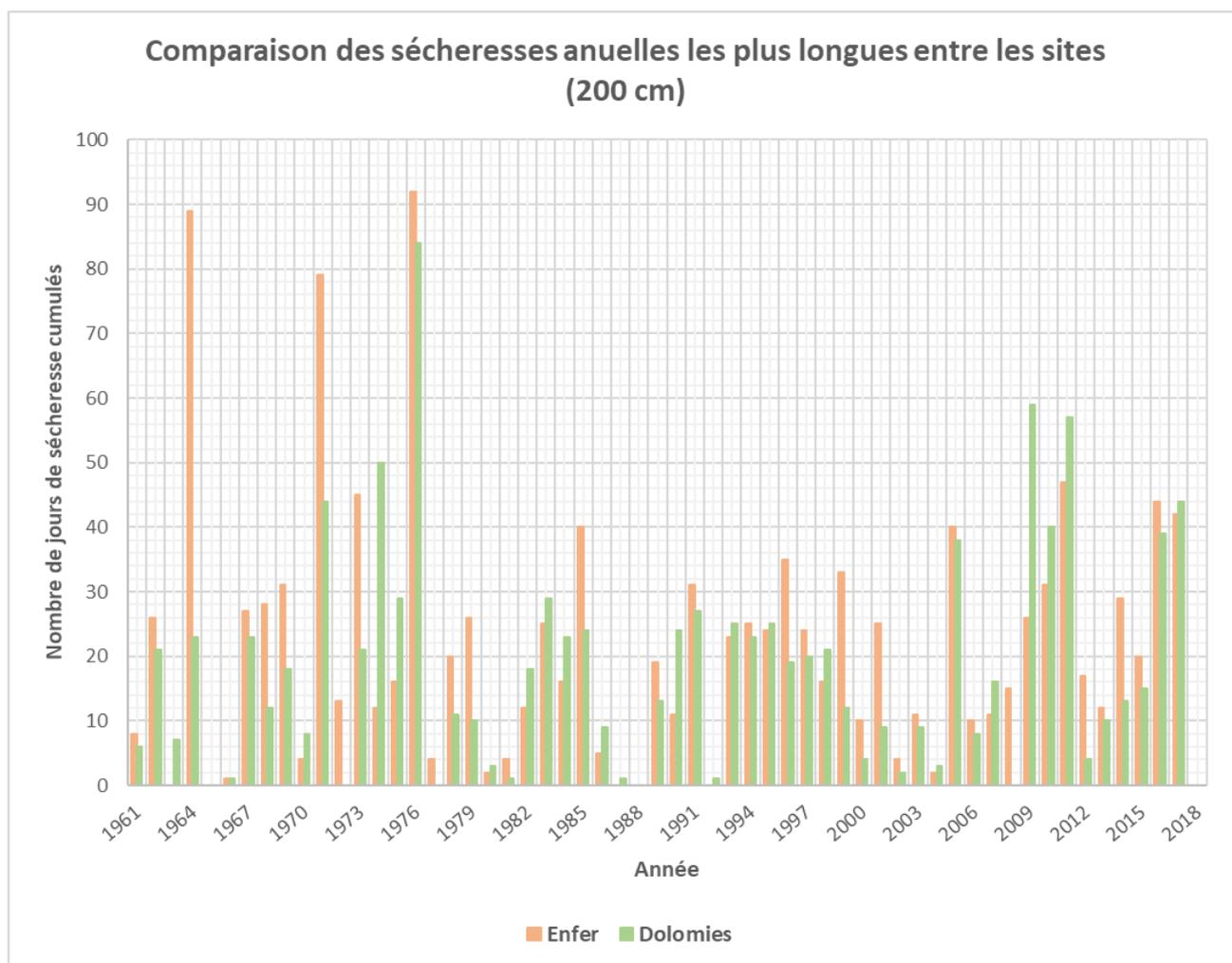


Figure 23 : Comparaison des durées annuelles de sécheresse les plus longues sur base de la valeur seuil "10e percentile" pour les deux sites étudiés.

c) Réserve en eau relative

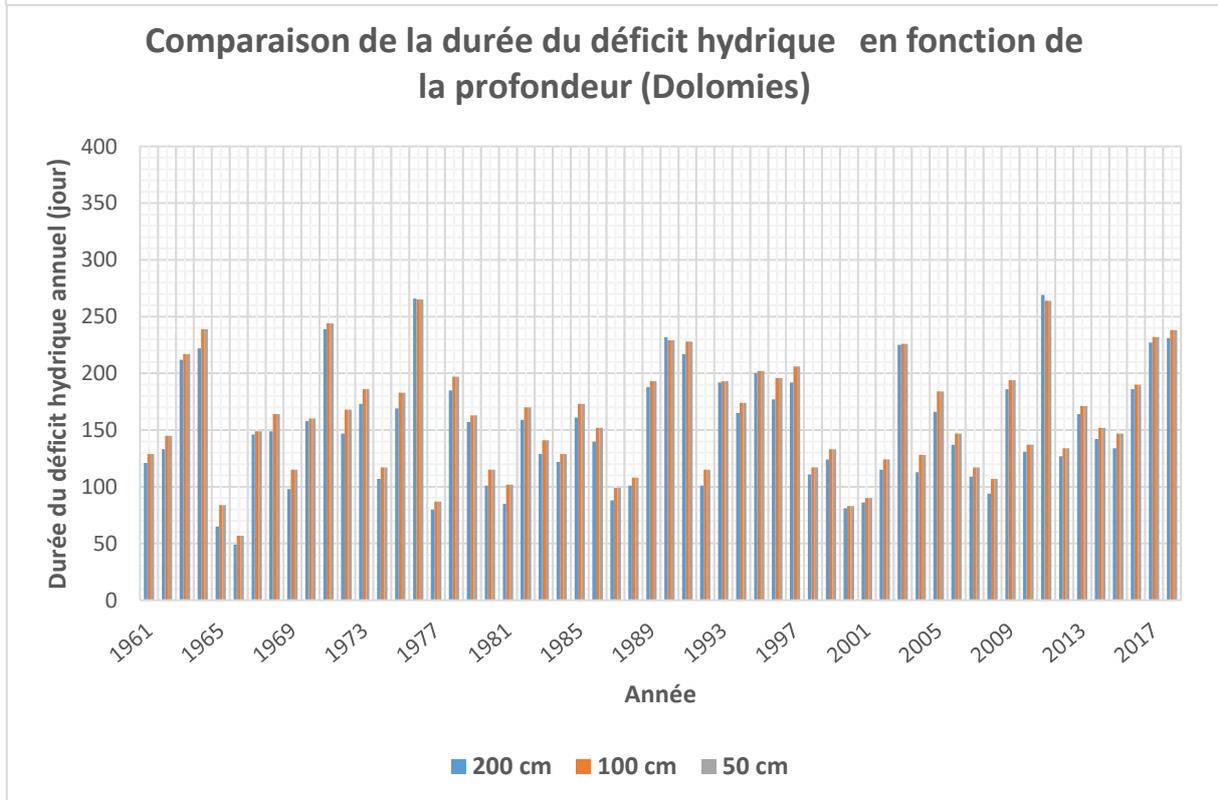
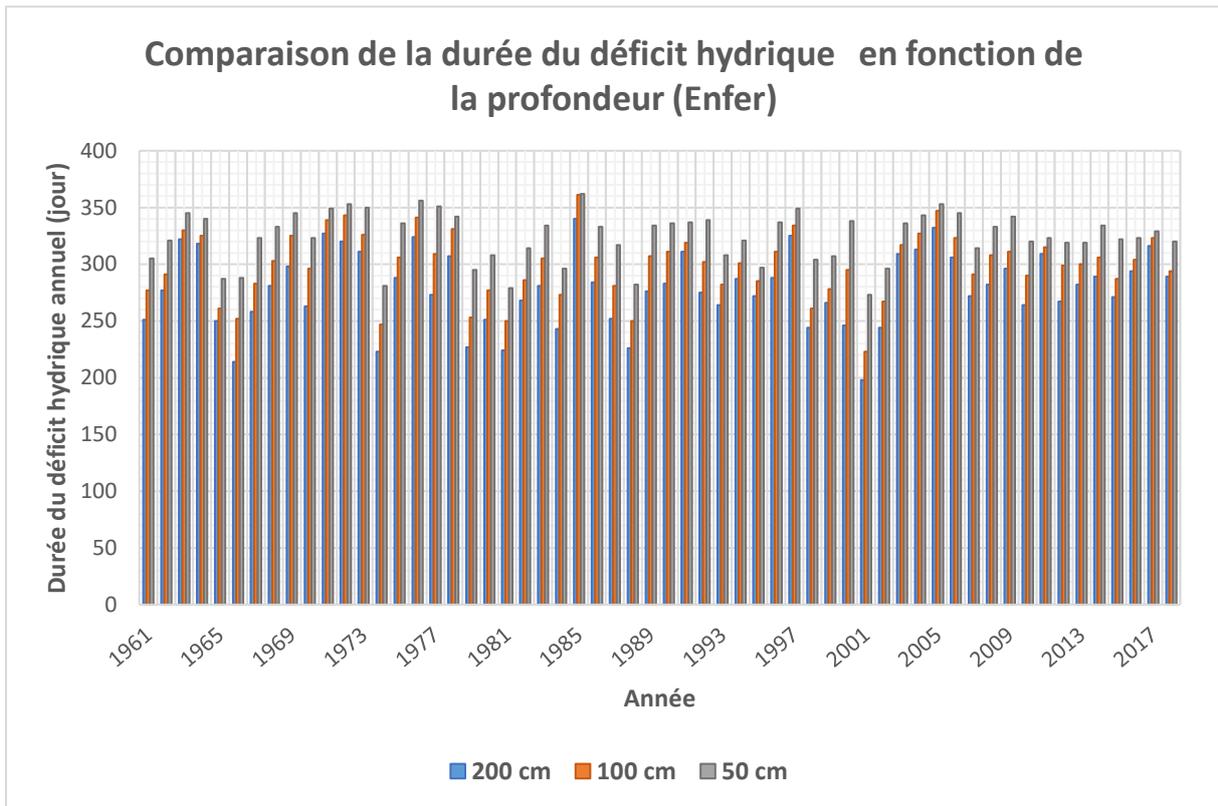


Figure 24 : Comparaison de la durée du déficit hydrique enregistré par les sols des deux sites, étudiée pour différentes profondeurs.

Le dernier indice ici calculé, offre des observations bien différentes de celles assez constantes et redondantes obtenues avec les indicateurs axés sur les percentiles. Comme expliqué lors de la présentation des indices, il s'agit d'évaluer la réserve en eau relative (RER) et de la confronter à la valeur seuil de 0,4 (Figure 24).

Tout d'abord et de manière assez surprenante, le site d'Enfer affiche de grosses variations de jours entre les trois profondeurs sondées. Or, de par son côté relatif, cet indice n'est en réalité pas discriminé par ce paramètre. Cette différence obtenue trouve donc son explication ailleurs et permet certainement aux variations de texture et de charge caillouteuse relevées dans chaque horizon de s'exprimer. En effet, rappelons que pour le cas du site de Hastière, seuls les horizons 1 et 2 sont modélisés lorsque les 50 premiers cm de sol sont pris en compte, ce qui peut certainement expliquer les grandes démarcations visibles sur le graphe. Cette conclusion semblerait alors indiquer que la sécheresse est plus marquée lorsque le sol comprend une plus faible charge caillouteuse. Le site des Dolomies, par contre, ne montre pas d'aussi grandes variations entre les trois profondeurs sondées. Cette observation est peut-être liée au côté plus superficiel du sol de ce site, qui, même lorsqu'il est modélisé à plus faible profondeur, comporte encore la moitié de son profil en horizon 3.

Le nombre de journées en situation d'inconfort ($< 0,4$) pour le site d'Enfer est interpellant. Il est compris entre 200 et 360 jours ce qui semble fortement surestimé. Les valeurs atteintes dans le cas du site des Dolomies, bien qu'élévées, semblent plus acceptables et sont comprises entre 50 et 250 jours, excepté pour les années exceptionnelles déjà relevées par les autres indicateurs. Cet indice, même s'il permet de faire ressortir une tendance et de pointer les années anormales, semble surestimer la durée du stress hydrique.

Par pure curiosité scientifique, la réserve en eau relative journalière a été observée pour trois années différentes. Les années 1965, 1976 et 2001 respectivement évaluées par les indicateurs précédents comme étant bien fournie en eau, sèche et normale ont ainsi pu être comparées (Figure 25).

Il est intéressant de voir que l'année 1965 (premier graphique de la Figure 25) était présentée précédemment comme favorable car ne comptant aucune journée en stress. Pourtant, cette année semble présenter un nombre de jours d'inconfort lorsque la réserve relative en eau journalière est analysée plus précisément. Ce nombre de jours est même fort élevé pour le site d'Enfer. Cependant les minimas atteints par les deux sites sont plus élevés que ceux rencontrés lors des deux autres années. Ceci expliquerait certainement pourquoi cet inconfort n'a pas été perçu par les indices percentiles trop discriminants. Les maximas sont également très élevés en comparaison de ce qui est observé sur les autres courbes.

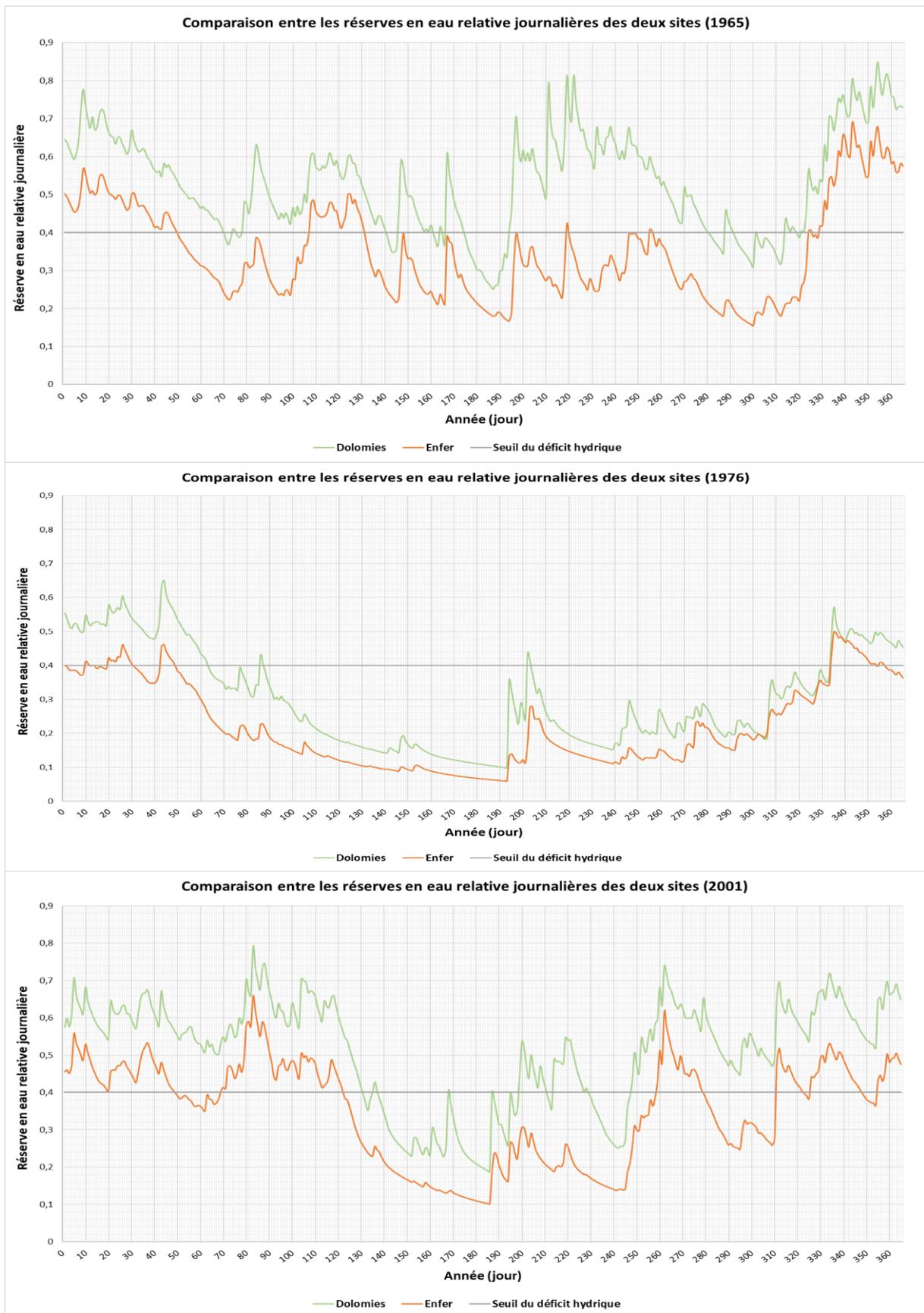


Figure 25 : Graphiques reprenant les réserves en eau relative journalières pour les années 1965, 1976 et 2001 des sites étudiés.

L'évolution de la RER durant l'année 1976 (deuxième graphique de la Figure 25) est dans la continuité de ce qui est apparu pour les autres indices. Les valeurs maximales atteintes sont très basses et fortement proches de la limite fixée à 0,4. Les maxima sont très loin de la quantité d'eau disponible à la capacité au champ. Par opposition, le point de flétrissement est presque approché par le site d'Enfer qui atteint des records du point de vue de ses minima. Une longue période de sécheresse sans interruption y débute très tôt et se termine bien après la saison de végétation. La situation du site des Dolomies est légèrement meilleure mais reste très inconfortable.

Enfin l'année 2001 (troisième graphique de la Figure 25) considérée comme neutre, est le siège de courtes périodes d'inconfort pour la localité de Namèche entrecoupées de situations plus favorables. A Hastière par contre, cette année considérée comme « normale » subit une longue période sèche. Il semble que la neutralité de cette année perçue par les analyses de départ vienne plutôt du fait qu'elle enregistre à la fois de maxima élevés et des minima faibles.

4.3. Mise en relation avec les indices de cerne

La dernière partie des résultats aura pour but de montrer la relation, si elle existe, entre la réserve hydrique du sol et la croissance du tilleul à petites feuilles. Cette opération va s'effectuer en trois étapes et pour la période de temps s'étendant de 1961 à 2016.

Pour commencer, le niveau de corrélation des indicateurs de sécheresse produits précédemment et de l'indice de cerne va être évalué. Bien évidemment, seuls les indicateurs ayant donné lieu à des résultats seront ainsi décrits, et ce pour chacun des sites ainsi que pour les trois profondeurs choisies.

Ensuite, d'autres paramètres reflétant le comportement du sol seront générés et mis en relation avec la croissance du tilleul. Les quantités d'eau maximale et minimale observées sur l'année et durant les mois de mars à juillet seront calculées de manière systématique pour les deux sites et les mêmes profondeurs.

Enfin, quelques indices présentant une corrélation satisfaisante seront présentés sous forme graphique. Cette approche permettra d'obtenir un rendu plus visuel entre lesdits indicateurs et l'indice de cerne.

4.3.1. Niveau de corrélation

a) *Variables hydriques*

Le tableau ci-dessous (Tableau 10) reprend le taux de corrélation associé à chacune des variables hydriques pertinentes calculées au point précédent. Ces indices obtiennent tous un coefficient négatif lorsqu'ils sont mis en relation avec la croissance radiale du tilleul. Ce signe, attendu, indique que lorsque le nombre de jours considérés comme « secs » augmente, la croissance du tilleul aura tendance à diminuer. Les données du site d'Enfer pour le mois de mars sont absentes car aucun jour de sécheresse n'avait été enregistré pour ce mois durant les 57 années étudiées. A noter que les valeurs plus faibles obtenues pour ce même mois sur le site des Dolomies et pour les mois d'avril s'expliquent par le nombre peu élevé de jours secs enregistrés sur cette période.

De manière générale, les taux de corrélations calculés pour l'ensemble de ces paramètres sont très importants. Cette constatation sera discutée par la suite et des nuances seront apportées à ces résultats. Pour terminer, il semble que l'indice RER calculé pour le site d'Enfer ne permette pas de mesurer l'impact que la réserve en eau du sol entraîne sur le développement du tilleul. Cette observation est encourageante et confirme l'impression évoquée plus haut selon laquelle cet indice surévaluait l'intensité du stress hydrique.

Tableau 10 : Tableau de synthèse reprenant l'ensemble des valeurs des coefficients de corrélation (r) entre les variables hydriques produites et l'indice de cerne du tilleul à petites feuilles.

		Niveau de corrélation des indices de sécheresse					
		Enfer			Dolomies		
		50 cm	100 cm	200 cm	50 cm	100 cm	200 cm
1er percentile (Nbre total jours)	Annuel	-0,50	-0,51	-0,51	-0,55	-0,54	-0,53
10e percentile (Nbre total jours)	Annuel	-0,43	-0,42	-0,43	-0,58	-0,59	-0,52
	Mars-Juillet	-0,59	-0,60	-0,60	-0,68	-0,68	-0,68
	Mars	/	/	/	-0,08	-0,08	-0,06
	Avril	-0,06	-0,06	-0,07	-0,23	-0,24	-0,25
	Mai	-0,59	-0,59	-0,58	-0,56	-0,54	-0,54
	Juin	-0,54	-0,55	-0,56	-0,61	-0,60	-0,61
10e percentile (Nbre jours cumulés)	Annuel	-0,33	-0,36	-0,33	-0,54	-0,51	-0,68
RER (Nbre jours total)	Annuel	-0,16	-0,18	-0,19	-0,29	-0,32	-0,33

b) Extremas

Le deuxième set de variables analysées est centré sur les valeurs extrêmes obtenues à différents moments de l'année. Les niveaux de corrélation calculés et repris dans le tableau ci-après (Tableau 11) arborent tous un signe positif. A nouveau, ce résultat était attendu et prouve bien que lorsque la quantité d'eau maximale ou minimale du sol augmente, la croissance radiale du tilleul augmente également. Cela étant, le maximum annuel de la réserve en eau du sol ne semble pas avoir un grand impact sur le développement de l'arbre. Globalement, le site d'Enfer semble réagir plus fort aux extrema enregistrés que le site des Dolomies. Les mois compris entre mai et juillet offrent la meilleure corrélation possible pour ces deux sites.

Tableau 11 : Tableau de synthèse reprenant l'ensemble des valeurs des coefficients de corrélation (r) entre les extrema de la réserve en eau et l'indice de cerne du tilleul à petites feuilles.

		Niveau de corrélation des extrema de la RE					
		Enfer			Dolomies		
		50 cm	100 cm	200 cm	50 cm	100 cm	200 cm
Minimum de la réserve en eau	Annuel	0,32	0,32	0,32	0,58	0,59	0,59
	Mars	0,22	0,23	0,23	0,13	0,13	0,17
	Avril	0,21	0,23	0,25	0,11	0,12	0,28
	Mai	0,43	0,45	0,46	0,29	0,31	0,37
	Juin	0,52	0,54	0,55	0,46	0,47	0,39
	Juillet	0,45	0,46	0,46	0,54	0,56	0,40
Maximum de la réserve en eau	Annuel	0,02	0,02	0,03	0,08	0,08	0,08
	Mars	0,23	0,22	0,18	0,28	0,29	0,19
	Avril	0,27	0,28	0,29	0,30	0,29	0,13
	Mai	0,55	0,54	0,53	0,33	0,34	0,42
	Juin	0,34	0,36	0,37	0,23	0,24	0,44
	Juillet	0,35	0,37	0,39	0,35	0,36	0,50

c) Représentation graphique

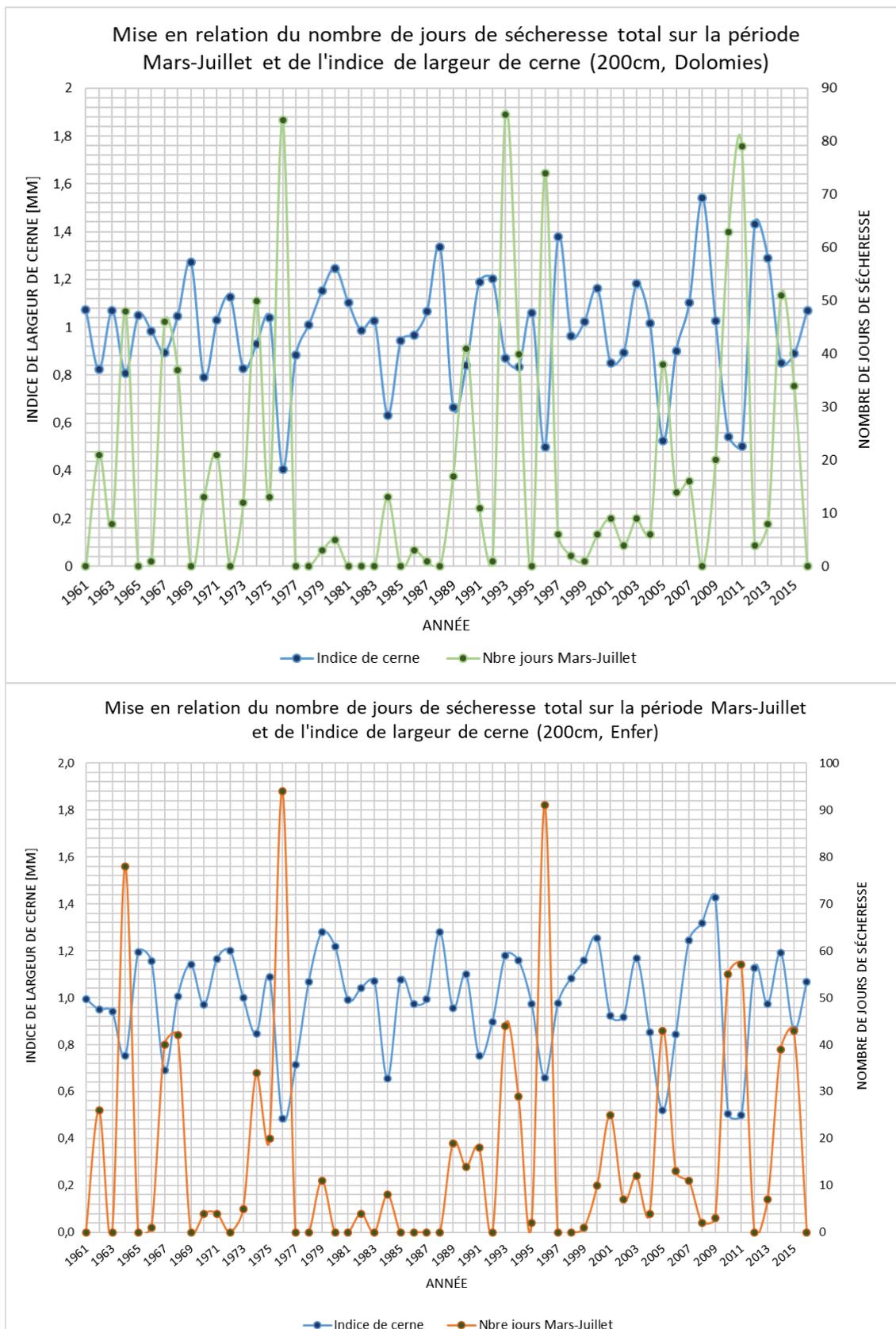


Figure 26 : Représentation graphique de la mise en relation des indices de largeur de cerne des sites Dolomies (au-dessus) et Enfer (en-dessous) avec le nombre total de jours de sécheresse rencontrés durant la période Mars-Juillet pour une profondeur de 200 cm.

La représentation graphique (Figure 26) correspond à la mise en relation des indices de largeur de cerne des sites Dolomies (au-dessus) et d'Enfer (en-dessous) avec le nombre total de jours de sécheresse rencontrés durant la période allant de mars à juillet pour une profondeur de 200 cm. Comme cela sera discuté par la suite, cet indicateur est celui qui montre le meilleur niveau de corrélation au près des deux localisations étudiées. Le site de Namèche est celui qui offre la plus belle correspondance de courbes ; les minimas d'un des indices sont toujours parfaitement alignés avec les maximas de l'autre, belle illustration de la corrélation négative qui les lie. Le même genre d'interprétation peut être menée auprès du site de Hastière mais la correspondance entre les extrêmes, bien que présente, est moins bien visible.

La Figure 27 permet d'illustrer une des corrélations positives évaluées dans la deuxième partie des résultats. C'est ici le minimum atteint par la réserve en eau durant l'année et évalué sur une profondeur de 200 cm qui est mis en avant. Cet indice est celui qui présentait la meilleure corrélation positive pour le sol des Dolomies comme cela est visible sur le premier graphe de la figure en question. Ce site est celui qui a le mieux réagi à l'évaluation de l'impact des extrema des stocks d'eau sur la croissance du tilleul. La correspondance des minima des deux courbes est moins parfaite que ce qui apparaissait sur la Figure 24 mais reste malgré tout satisfaisante. Le site d'Enfer, visible sur le deuxième graphe, offre une relation moins corrélée et est donc moins impacté par les valeurs extrêmes minimales décelées durant l'année. Les années particulièrement sèches sont par contre observables sur les deux courbes et sont le siège d'un minimum dans les deux cas.

Il est intéressant de remarquer que pour ces deux figures les échelles employées ne sont pas identiques pour les deux sites. La comparaison de ceux-ci n'est en réalité pas l'objet de ces représentations graphiques. En effet, cette dernière section tente d'illustrer le mieux possible les relations qui lient les indicateurs choisis et l'indice de la largeur de cerne. L'échelle utilisée a donc été adaptée à chacune d'elles afin de les rendre les plus lisibles possible.

La représentation graphique des deux indices a été complétée par une analyse de leur régression linéaire. Les coefficients de détermination obtenus pour les sites des Dolomies sont à nouveau plus élevés que ceux du site d'Enfer. La pente des droites de régression permet de rendre encore plus visuelles les relations qui lient ces deux indices à la croissance radiale du tilleul, l'un ayant une influence positive (le minimum de la réserve en eau annuelle) et l'autre négative (le nombre de jours de sécheresse durant la période mars-juillet). Les r^2 affichés confirment bien que l'indice relatif au nombre total de jours de sécheresse explique mieux la relation linéaire qui le lierait à l'indice de largeur de cerne.

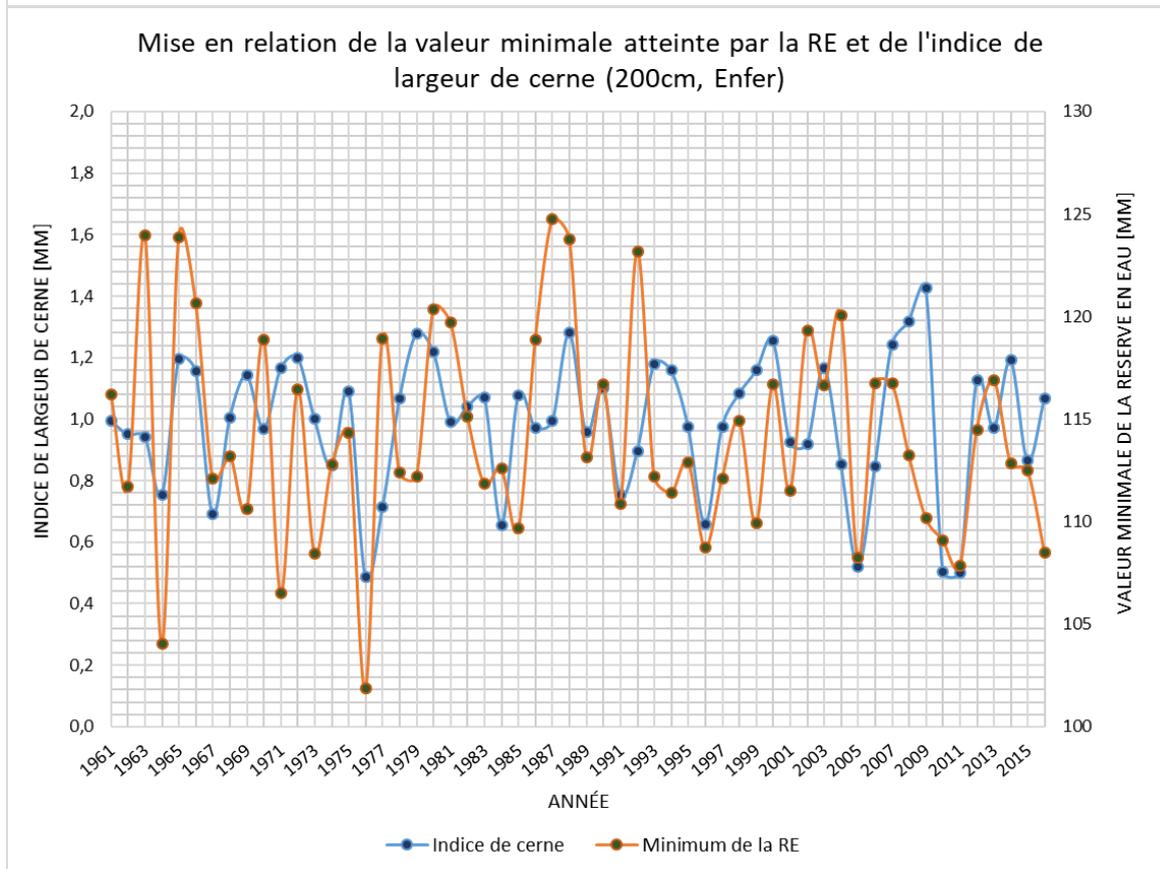
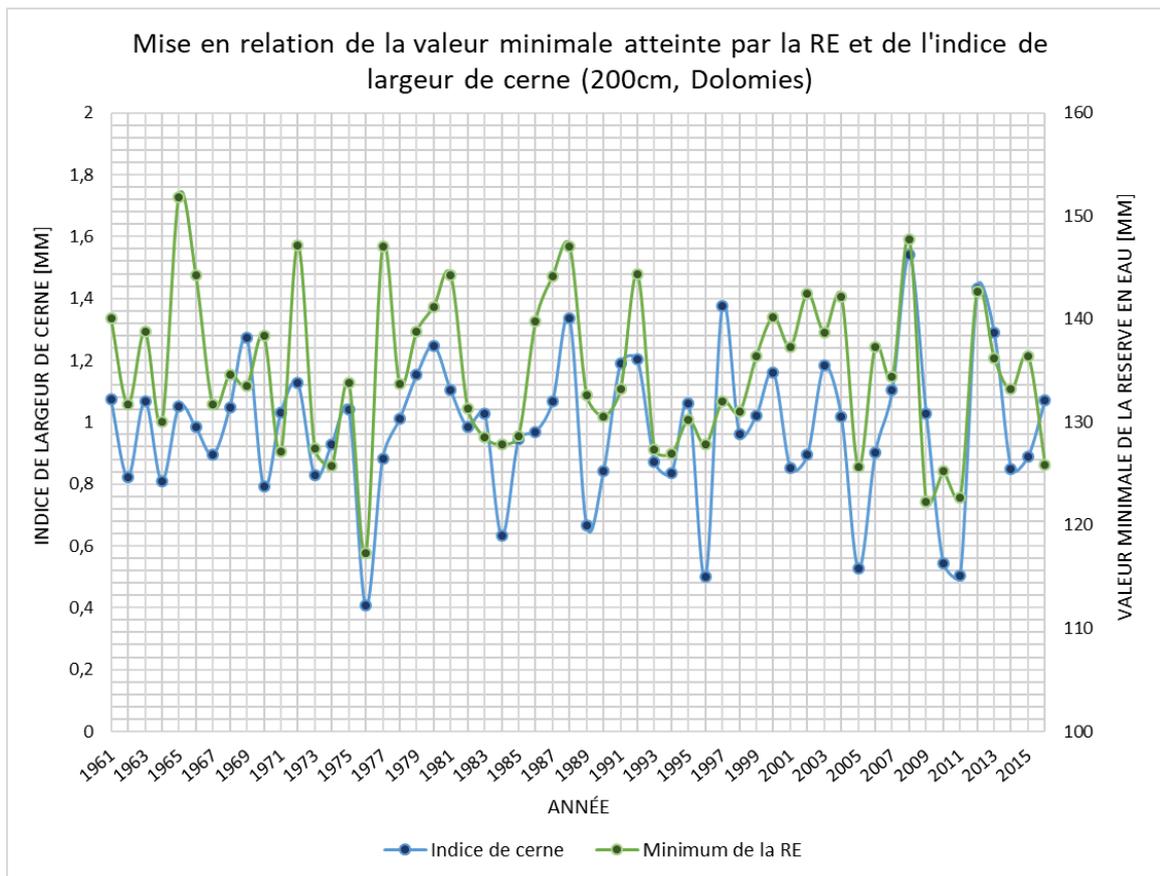


Figure 27 : Représentation graphique de la mise en relation des indices de largeur de cerne des sites Dolomies (au-dessus) et Enfer (en-dessous) avec la valeur minimale atteinte par la réserve hydrique sur une profondeur de 200 cm durant l'année.

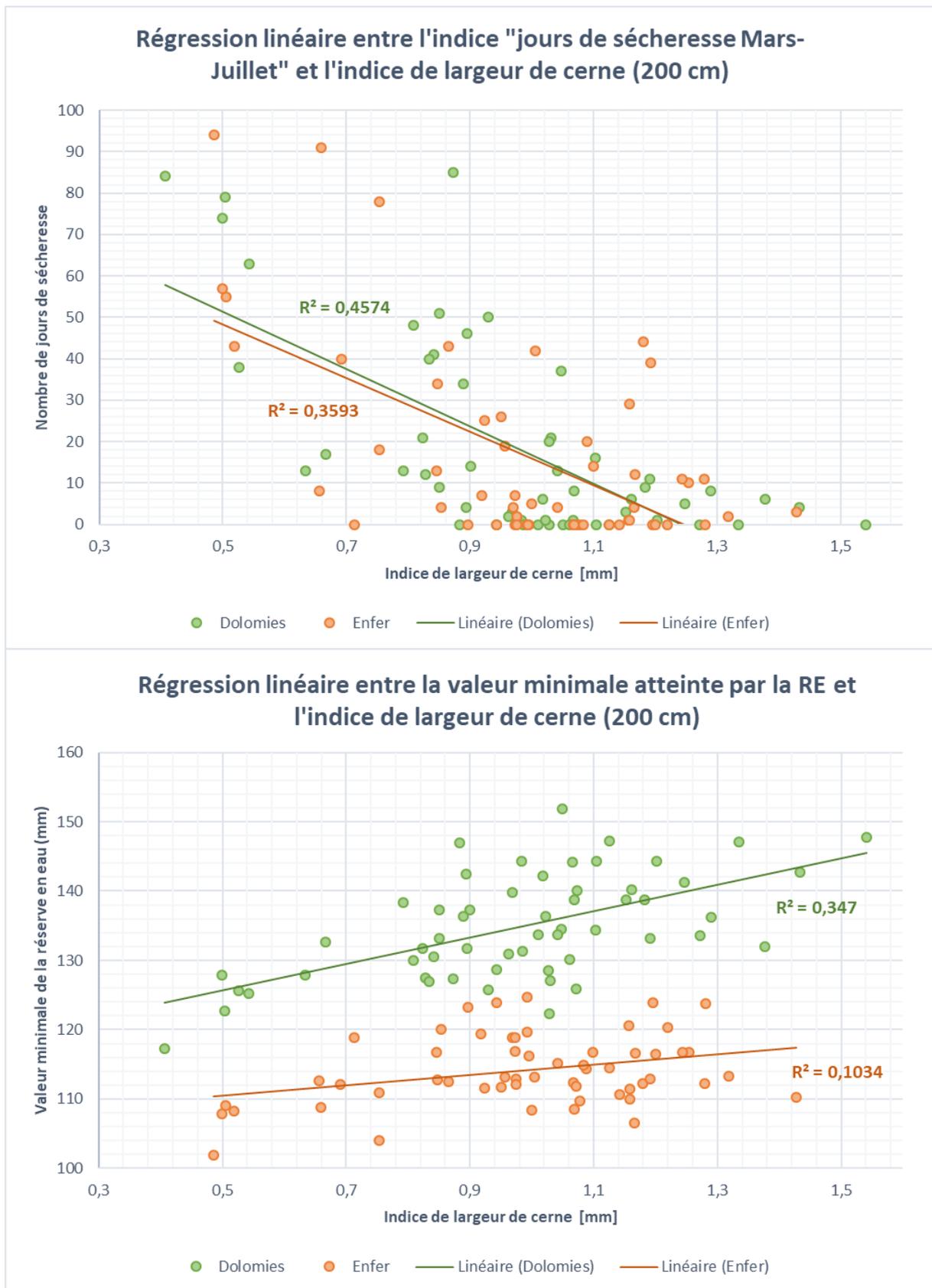


Figure 28 : Représentation des régressions linéaires et des coefficients de détermination obtenus entre les deux indices de sécheresse choisis et l'indice de largeur de cerne pour les deux sites étudiés.

5. Discussion

5.1. Choix de départ et leurs implications

En raison de l'intérêt porté sur le tilleul à petites feuilles depuis quelques années et de son potentiel d'adaptation élevé face au changement climatique, cette essence semblait être le meilleur choix possible pour réaliser cette analyse. Cependant, s'il est vrai que cette essence est au cœur de l'actualité forestière et pourrait être un atout providentiel vis-à-vis des conditions à venir, elle est actuellement très peu décrite et peu présente dans les forêts wallonnes. Ces deux aspects sont apparus comme secondaires lors du choix de la thématique de ce travail, et pourtant se sont avérés très contraignants pour mener à bien ce projet.

La faible distribution du tilleul en Wallonie a fortement limité le choix des sites échantillonnés. Ceux-ci étaient d'ailleurs loin d'être idéaux pour effectuer des prélèvements de par leur côté accidenté et leur faible profondeur. De plus, l'entière des sols sous peuplement retenus était de type « limono-caillouteux » et possédait une forte charge caillouteuse. Cette uniformité des substrats rencontrés n'a pas permis de réaliser une sélection idéale mais plutôt d'opérer un choix par élimination. L'absence d'information précise concernant certains facteurs biologiques a également restreint la possibilité d'utilisation des modèles existants. Il aurait pourtant été intéressant de confronter les résultats obtenus à l'aide du logiciel HYDRUS, plutôt employé en agriculture, avec ceux proposés par l'outil BILJOU, plus adapté aux sols forestiers.

Un choix plus raisonnable concernant l'essence envisagée, à savoir le hêtre, aurait sans doute permis de lever les contraintes citées précédemment. C'est en effet l'espèce climacique par excellence en Wallonie, très bien décrite dans la littérature aussi bien au niveau biologique que dendroécologique. De plus, de par sa large présence au sein du massif forestier, il aurait certainement été possible de trouver quelques sites avec une pente faible et un sol profond possédant une charge caillouteuse limitée. Le sondage aurait alors pu se réaliser au sein même du peuplement (situation idéale), ce qui aurait diminué le nombre d'informations extrapolées. Les analyses réalisées au laboratoire auraient directement pu être utilisées en l'état, sans passer par une phase de pondération. En effet, toutes ces données auraient permis de confronter les deux modèles mais également de mieux caractériser le sol sur une profondeur plus grande et ainsi de diminuer le nombre d'hypothèses émises lors de la modélisation.

5.2. Analyse critique de la méthodologie

5.2.1. Récolte des données

Avec du recul, il semble que certaines parties de la phase de terrain et des analyses conduites en laboratoire auraient pu être réalisées différemment. Plusieurs propositions en vue d'améliorer la qualité des échantillons prélevés vont être proposées. A signaler que les pistes ci-après n'ont pu être testées et ne garantissent en rien une meilleure qualité finale.

L'échantillonnage en tant que tel a été initialement conçu en vue de tenir compte de l'hétérogénéité de la parcelle d'étude. Pour ce faire, trois répétitions à trois profondeurs identiques réalisées sur chaque site semblaient tout à fait suffisantes. Toutefois, en raison de la forte présence de fraction grossière, le nombre d'échantillons prélevés aurait peut-être dû être augmenté. En effet, ce nombre aurait sans doute été suffisant pour un sol faiblement caillouteux et très homogène mais insuffisant pour un sol forestier plus hétérogène. Il est vrai que ce nombre restreint de prélèvements semble avoir malgré tout capté la texture générale de la zone d'étude mais n'a pas permis d'évaluer la charge caillouteuse de manière suffisamment précise.

Comme déjà évoqué plus d'une fois, la plus grande source d'incertitude dans ce travail est l'évaluation de la charge caillouteuse au sein des différents horizons. Le fait d'augmenter la prise d'échantillons pour l'horizon 1 aurait certainement permis de mieux la décrire dès lors que le taux d'éléments grossiers était moins élevé que dans les deux autres horizons. Pour ces derniers, le problème d'évaluation reste entier car le prélèvement d'échantillons était physiquement trop difficile à réaliser. Une piste de solution est évoquée dans Tetegan, 2011. Durant sa thèse, cette auteure a validé une méthode d'estimation de la pierrosité à l'aide d'un outil géophysique : la résistivité électrique⁵. Cette méthode pourrait peut-être s'avérer plus précise et permettrait d'éviter de fixer des valeurs arbitraires comme ce fût le cas dans ce travail. Cela étant, le sol accidenté et pentu des zones d'étude n'aurait peut-être rendu possible cette analyse ; ce problème s'étant déjà posé lors d'autres études réalisées dans le même type de milieu.

L'évaluation de la perméabilité du sol à l'aide d'un perméamètre n'a finalement pas apporté les résultats espérés. La qualité intrinsèque des échantillons n'a malheureusement pas mené à des résultats concluants et ceux-ci n'ont pu être utilisés pour la phase de modélisation. En effet, la plupart des échantillons en structure conservée ont été fortement altérés lors de la mise à saturation. Cette dégradation est vraisemblablement due à la trop forte charge caillouteuse et au nombre de racines présentes au sein de ceux-ci. Le joint en silicone placé pour limiter les chemins préférentiels empruntés par l'eau n'a pas amélioré la situation de manière efficace car les échantillons devaient alors être écartés de toute manipulation pendant 48h, le temps que celui-ci sèche. Ce délai a entraîné une dépression de leur qualité encore plus forte en raison d'une reprise d'activités biologiques au sein de ces sols. Une possibilité aurait été de recréer des échantillons ne contenant que la fraction fine des différentes profondeurs et de pondérer le coefficient de perméabilité obtenu par la charge caillouteuse. Cette solution aurait permis d'initier le programme avec des valeurs plus proches de la réalité et ainsi de s'affranchir de l'utilisation de la fonction de pédotransfert calibrée pour des sols américains.

Il est évident que la confection d'une large fosse pédologique au sein même des peuplements aurait permis de lever un certain nombre d'incertitudes et aurait évité de créer un nombre très élevé d'hypothèses pour la suite du travail. De plus, le profil racinaire du tilleul aurait pu être analysé de manière spécifique et aurait mené à une meilleure interprétation des résultats obtenus après la modélisation. Malheureusement, les contraintes techniques liées à la réalisation de ce travail n'ont pas permis de procéder de cette manière.

5.2.2. Modélisation

La partie technique liée à l'utilisation du modèle en tant que tel n'a posé aucune difficulté bien qu'elle ait nécessité une phase d'apprentissage obligatoire afin de maîtriser le fonctionnement de l'outil HYDRUS. La discussion dans ce cas-ci sera plus orientée sur les limites du programme en lui-même ainsi que sur son initiation. Ces dernières sont fortement corrélées aux contraintes relevées précédemment tant en raison du choix de l'essence que de la qualité des données employées.

Il est utile de rappeler dans cette analyse critique que le modèle choisi ne tient compte ni de la pente, ni de la charge caillouteuse, éléments très présents sur les sols forestiers par opposition aux

⁵ Tetegan, 2011 explique que « par simple comparaison visuelle des cartes de résistivité et de cartes des sols, une bonne correspondance entre les zones caillouteuses et celles où le signal de résistivité était élevé a pu être observé ». Le modèle développé dans le cadre de cette thèse a porté sur l'étude de l'écart des valeurs de résistivité mesurées par rapport aux valeurs du signal moyen. L'observation d'une forte corrélation entre l'écart-type du bruit du signal de la résistivité électrique et la pierrosité du sol a permis de valider cette méthode pour les sols présentant une charge supérieure à 15%.

sols agricoles. L'impact de cette pente est loin d'être négligeable et se marque à différents niveaux. Les apports latéraux des flux d'eau ne sont certes pas perçus, mais le risque est également lié à la surévaluation du stock d'eau présent dans le sol car le ruissellement et le drainage mesurés sont fortement négligés. A noter que le second choix de modèle envisagé au départ n'aurait pas permis de lever ces deux contraintes.

D'autres biais liés à la production des paramètres hydriques initiaux sont également observables. Tout d'abord, la pondération manuelle opérée afin d'intégrer la charge caillouteuse est une simplification évidente de la réalité. En effet, celle-ci sous-entend que les cailloux ne jouent aucun rôle de rétention de l'eau dans le sol. Or plusieurs publications (Tetegan, 2011) ont mis en évidence que cette hypothèse était beaucoup trop radicale et que la charge caillouteuse permettait de retenir une partie de l'eau et de la rendre accessible pour les plantes. Ensuite, la création elle-même des valeurs de départ est basée sur une fonction calibrée pour les sols agricoles américains, éloignés par la force des choses des sols sous peuplements étudiés dans le cas présent.

Enfin, les limites choisies pour définir la zone modélisée auraient pu être assouplies. Etant donné l'augmentation graduelle de la charge caillouteuse le long des profils de sol réalisés, un nombre plus élevé d'horizons aurait pu être envisagé. Cette méthode aurait peut-être mis en évidence de manière plus claire l'augmentation de la charge caillouteuse avec la profondeur et donc la diminution de la rétention en eau qui y serait associée.

5.3. Discussion générale des résultats

Avant toute chose, il semble judicieux de rappeler que les résultats obtenus doivent être considérés avec un regard critique. Il est vrai que l'évaluation effectuée à l'aide d'un outil de modélisation en elle-même est intéressante car cette approche est innovante dans le milieu forestier. Cependant, en raison du nombre de biais et de simplifications initiales largement discutés précédemment, les valeurs spécifiques prises par les variables sont à regarder dans leur ensemble et doivent être interprétées comme reflétant une tendance et non pas une vérité absolue. Il faut également garder à l'esprit que les réserves en eau calculées sont à considérer comme « idéales » dans les conditions imposées car aucun flux sortant du bilan hydrique ne leur a été soustrait. Ce sont donc bien les caractéristiques intrinsèques du sol mis en relation avec les conditions climatiques qui sont ici présentées.

5.3.1. Variables hydriques

L'observation la plus fondamentale apportée par cette analyse générale est pour le moins surprenante. Il semble que dans les conditions étudiées, les sols des sites ne présentent à aucun moment un taux d'humidité qui devrait inquiéter le tilleul car ceux-ci sont toujours supérieurs au potentiel hydrique de -10 000 Pa, excepté pour l'année 1976. L'étude ici décrite permet donc d'expliquer la réaction du tilleul face à un sol « plus ou moins sec » mais n'atteignant pourtant jamais le stade critique du point de flétrissement. Cependant, l'analyse de la réserve en eau relative tend à prouver que cette situation, bien que semblant confortable au vu des valeurs atteintes par les stocks d'eau dans le sol, soit en réalité stressante pour l'arbre en question. Il apparaît donc que l'eau disponible est bien suffisante pour assurer la survie de l'arbre (pour autant qu'il puisse l'atteindre) mais impacte malgré tout son développement⁶. Cette supposition est d'ailleurs vérifiée par l'analyse des corrélations liant les réserves hydriques des sites et l'indice de cerne.

⁶ L'association fréquemment réalisée entre les mycorhizes et le tilleul devrait lui permettre de diminuer encore le risque de ne pouvoir extraire de l'eau présente dans le sol et inaccessible théoriquement.

La capacité des sites à retenir l'eau est également intéressante à comparer. Etant donné les précipitations plus élevées enregistrées à Hastière et sa profondeur de sol plus confortable, il aurait semblé logique que le site d'Enfer offre une situation moins stressante pour le tilleul. C'est pourtant la situation inverse qui est démontrée par les différentes figures de la partie résultats. C'est finalement l'influence de la composition granulométrique en elle-même qui est ainsi expliquée. Il est donc plus favorable pour une végétation de croître sur un sol moins profond mais possédant de meilleures propriétés de rétention en eau. Cette vérité est acceptable dans le cas où la flore étudiée est capable de développer un enracinement suffisant pour que le côté superficiel du sol et la charge caillouteuse en place ne soient pas des obstacles trop importants pour lui permettre d'extraire de l'eau. Cette description correspond heureusement aux performances d'ancrage du tilleul par son enracinement profond et efficace.

La fréquence à laquelle des événements inconfortables sont enregistrés est en augmentation depuis les années 2000. L'interprétation conjuguée des Figures 19 et 22 prouve que non seulement le nombre moyen de jours d'inconfort est supérieur à la tendance démontrée précédemment mais qu'en plus, ces situations sont bien plus rapprochées que par le passé. Ce fait est en réalité observable pour les deux sites mais ne concerne pas forcément les mêmes années. En effet, une année « neutre » pour l'un peut apparaître comme contraignante pour l'autre. Cette augmentation de fréquence est assez préoccupante et, si elle se maintient dans le futur, pourrait entraîner des problèmes de récupération pour l'arbre qui se trouverait en situation de stress de manière répétée et devrait limiter sa croissance afin d'assurer sa survie. La profondeur et la texture des premiers centimètres de sol joueraient alors un rôle prépondérant car ce sont bien les réserves d'eau en place dans les premiers horizons qui sont déterminantes lorsque le stress hydrique prend fin. Cet argument est déjà partiellement visible dans la Figure 20 pour le site des Dolomies qui montre un nombre très élevé de jour de détresse, comparé à sa moyenne générale pour les années 2017 et 2018. Les précipitations ont été particulièrement basses à Namèche durant cette période de temps, ce qui a certainement empêché les réserves des premiers horizons de se réalimenter.

5.3.2. Relation réserve hydrique-cernes

Il est certain que les résultats obtenus au terme de ce travail sont encourageants et montrent une relation forte et significative entre la réserve en eau du sol totale et l'accroissement radial annuel du tilleul. Il a cependant été rappelé en introduction que les valeurs observées doivent être considérées comme idéales, voire « trop parfaites » et que c'est ici la tendance dans son ensemble qui est envisagée. Cependant, il ne paraît pas trop osé d'affirmer que les corrélations obtenues indiquent clairement que la réserve hydrique a un impact important sur le développement de l'arbre ; en expliquant à elle seule un quart de la variation annuelle de la largeur de cerne.

Le tableau reprenant l'ensemble des corrélations des premières variables hydriques calculées (Tableau 10) montre que le nombre total de jours de détresse a un impact réel sur la croissance de l'arbre et ce, quel que soit le moment où ce déficit intervient. Lorsque ce paramètre est centré sur la période allant de mars à juillet, la relation cerne-eau est encore plus visible. Il semble qu'au sein de cette période ce soient les mois de mai, juin et juillet qui aient d'ailleurs la plus large influence. L'importance accordée à cette période s'explique tout à fait d'un point de vue biologique. A ce moment de l'année, la saison de végétation bat son plein et le houppier est en plein développement chez le tilleul, impliquant une nette élévation de la demande en eau. De plus, Nicolas Latte (données non publiées, 2019) a pu mettre en évidence que cette période était cruciale pour le tilleul en termes de température. Le mois de mai aura tendance à favoriser la croissance du tilleul si les températures qu'il enregistre sont élevées alors que les mois de juin et juillet auront une influence négative si les températures ressenties sont trop élevées.

Les trois meilleures variables explicatives pour le site d'Enfer sont donc le nombre de jours total de sécheresse enregistrés durant la période sensible pour le tilleul mais également le nombre de jours du mois de mai et de juin pris séparément. Les autres facteurs (outre le mois d'avril et le mois de mars) jouent également un rôle dans le développement du tilleul mais légèrement moins important. Lorsque l'étude se centre sur les résultats annuels seuls, c'est le choix du 1^{er} percentile comme seuil qui explique le mieux la relation cernes-eau à Hastière. La RER n'est que très peu corrélée à l'indice de croissance du tilleul. Il semble donc que pour ce site, présentant un comportement général plus sec, ce soit bien les facteurs les plus discriminants et donc mettant vraiment en avant des situations plus exceptionnelles qui expliquent le mieux les résultats obtenus.

Le site des Dolomies obtient de manière générale des niveaux de corrélation plus élevés que le site précédent. Les jours calculés sur l'ensemble de l'année montrent une bonne relation, quel que soit le seuil de sécheresse sélectionné même si, à nouveau, la RER obtient un score plus bas. Le nombre de jours cumulés de sécheresse semble être bien plus contraignant pour ce site, certainement en raison de la faible profondeur de sol de l'horizon 1 comme expliqué précédemment. Le seuil du 10^e percentile semble tout à fait ajusté à la situation hydrique du site d'étude vraisemblablement en raison du fait qu'il soit plus frais de manière générale.

Le deuxième tableau de synthèse (Tableau 11) reprend, quant à lui, les niveaux de corrélations testés pour les extrema de la réserve en eau rencontrés à différents moments de l'année. Cette analyse s'est voulue innovante car jusqu'à présent seules les valeurs moyennes des besoins en eau avaient été citées dans de précédentes publications.

L'analyse annuelle montre que le maximum atteint au cours de l'année n'est pas significatif dans la croissance du tilleul pour les deux sites. Ceci semble logique car les résultats obtenus tendent à montrer que ce maximum est compris entre les réserves en eau à la capacité au champ et celles du premier tiers. Or cette situation est très confortable pour le tilleul ; la valeur prise par cet indice n'a alors que peu d'impact sur sa croissance car l'eau se trouve de toute manière à des potentiels hydrique très accessibles. La valeur minimale annuelle semble avoir une influence sur la croissance du tilleul même si les valeurs obtenues sont très différentes d'un site à l'autre. La croissance des tilleuls sur le site d'Enfer est moins bien expliquée (Figure 27 - Graphe inférieur) par cette valeur alors que les résultats obtenus pour le site des Dolomies (Figure 27 – Graphe supérieur) sont dans le même ordre de grandeurs que les paramètres calculés précédemment.

Si les extrema sont évalués mensuellement, alors des tendances intéressantes apparaissent à nouveau. Les mois de juin et juillet sont plus affectés par un niveau d'eau fort bas. Le mois de mai indique lui aussi le même genre de relation pour le site d'Enfer mais pas pour celui des Dolomies. Le maximum d'eau atteint durant le mois de mai joue un rôle important pour toutes les profondeurs du site localisé à Hastière. Les mois de juin et de juillet ont également un impact mais dans une moindre mesure. Le site des Dolomies montre des variations de corrélation importantes en fonction de la profondeur sondée, ce qui n'est pas le cas pour l'autre site d'étude. Lorsque l'analyse porte sur l'ensemble du profil de sol, les mois de mars et avril n'offrent qu'un faible niveau de corrélation alors que celui est très élevé pour les mois de mai à juillet. Les profondeurs de 50 cm et 100 cm semblent plus indifférentes à la valeur prise par le maximum et obtiennent des corrélations qui varient de 0,23 à 0,36.

En conclusion, l'indice impactant le plus la croissance est indéniablement le nombre de jours de sécheresse rencontrés durant la période s'étendant de mars à juillet, bien que ce soient en réalité les jours enregistrés de mai à juillet qui sont traduits par ce résultat, pour un site comme pour l'autre. Cette relation est d'ailleurs très explicite lorsqu'elle est observée sur les deux graphiques de la Figure

26. Ce résultat est dans la continuité des valeurs obtenues par Philippe Taverniers (2017) et Nicolas Latte (2019, données non publiées) qui semblaient indiquer que les précipitations reçues par le tilleul durant cette période étaient critiques pour son développement radial. Afin de compléter ces observations, il aurait été intéressant de réaliser une analyse multivariée avec les résultats obtenus dans ce travail sur l'humidité du sol et les variables climatiques les plus explicatives relevées par ces deux auteurs. Ceci permettrait d'intégrer l'ensemble des facteurs écologiques qui influencent la croissance du tilleul et d'identifier leurs contributions respectives aux différences de croissance du tilleul, ou encore, les interactions climat-sol. Cependant ce travail a mis en évidence que les valeurs extrêmes perçues par l'écosystème forestier avaient un impact sur la croissance du tilleul au même titre que la moyenne enregistrée à différents moments critiques.

5.3.3. Perspectives

Ce travail de recherche est une première approche de l'évaluation des réserves en eau du milieu forestier par modélisation. La fraction du massif wallon sondée est bien évidemment infime mais les résultats sont positifs et tendent à démontrer que cette méthode gagnerait à être développée dans le futur. Outre l'intérêt scientifique lié au concept en lui-même, cette analyse a permis de mettre en lumière de nombreux biais et difficultés liés au monde forestier. Ces limites ayant été révélées, elles pourront maintenant être prises en compte en amont, lors du processus de réflexion et probablement levées dans de prochaines publications. Une confrontation entre les différents modèles hydriques existants permettrait déjà d'affiner le niveau de précision des résultats obtenus afin qu'ils reflètent au mieux la complexité des écosystèmes forestiers.

Cette étude était focalisée sur les situations stressantes liées à la sécheresse mais l'approche employée aurait tout à fait pu être déclinée afin de mener à une discussion sur des paramètres plus favorables. La caractérisation globale de la réserve hydrique du sol pourrait mener à une analyse plus large et ainsi être comparée aux besoins en eau réels de différentes essences afin d'affiner encore le fichier écologique des essences.

Cette thématique actuelle a un bel avenir devant elle et cette démarche de modélisation pourrait même être étendue et intégrée, afin de réaliser le bilan hydrique complet de la forêt et d'évaluer ainsi la réserve en eau réelle des sols sous peuplements. Ce projet ambitieux semble par ailleurs trop complexe pour pouvoir servir de sujet de recherche lors d'un futur mémoire mais paraîtrait tout à fait adapté pour un projet de thèse future.

6. Conclusion générale

De manière générale, les quantités d'eau retenues par le sol au cours de la période étudiée ne sont pas trop inquiétantes pour la survie de cette essence. Cela étant, l'année 1976 a tout de même atteint une période critique de 20 jours durant laquelle seule l'eau retenue à des potentiels hydriques inférieurs à -10 000 hPa était accessible pour le tilleul. Cette situation ne s'est pas avérée mortelle pour le tilleul mais a cependant eu des conséquences sur son développement. Si ce genre d'événements caniculaires venaient à se répéter de manière plus fréquente à l'avenir, des répercussions bien plus fortes risqueraient de se manifester. Dans ce cas précis, la qualité du sol sur les premiers centimètres aurait une influence bien plus marquée et serait salutaire pour que le tilleul surmonte ces stress répétés. Son association fréquente avec les mycorhizes lui deviendrait alors cruciale durant les périodes de sécheresse elles-mêmes.

La présente étude a permis de confirmer les suppositions émises par Taverniers (2017) selon lesquelles les réserves en eau du sol accessibles entre les mois de mai à juillet jouaient un rôle essentiel dans le développement et les stratégies de survie du tilleul à petites feuilles. Les recherches effectuées ont également démontré que ces mois étaient sensibles aux valeurs maximales et minimales enregistrées durant cette période.

Au terme de cette analyse, l'intérêt d'intégrer de manière efficace le tilleul au sein des forêts wallonnes semble sonner comme une évidence. Cette essence est sans aucun doute fortement prometteuse pour l'avenir et offre encore une grande diversité d'opportunités pour la recherche. Une approche plus globale sur le fonctionnement biologique de cet arbre et sur la manière dont il exploite les réserves d'eau mises à sa disposition devrait s'avérer tout à fait pertinente.

Pour terminer, l'analyse générale des réserves en eau des sols du milieu forestier doit rester un sujet de préoccupation central à l'avenir car il est certain qu'une telle information pourrait s'avérer précieuse pour la période de changements qui s'annonce. La modélisation s'avéra sans aucun doute un atout indispensable pour répondre à cette demande. Si elle nécessite encore quelques ajustements pour correspondre aux réalités du terrain, cette méthode d'appréciation des ressources mériterait d'être utilisée de manière plus régulière afin d'affiner les connaissances sur les différentes stations forestières présentes en Wallonie. Ceci dans un but d'adapter aux mieux les plantations futures et ainsi de prévenir des crises sanitaires en plaçant les essences indigènes dans les conditions les moins stressantes possibles.

7. Bibliographie

- Aasamaa, K.; Söber, A.; Hartung, W.; Niinemets, Ü. Drought acclimation of two deciduous tree species of different layers in a temperate forest canopy. *Trees* 2004, 18, 93–101.
- Anderson, G.J. The pollination biology of *Tilia*. *Am. J. Bot.* 1976, 63, 1203–1212.
- Attorre, F.; Alfò, M.; de Sanctis, M.; Francesconi, F.; Valenti, R.; Vitale, M.; Bruno, F. Evaluating the effects of climate change on tree species abundance and distribution in the Italian peninsula. *Appl. Veg. Sci.* 2011, 14, 242–255.
- Baize D., 2000. Guide des analyses en pédologie : choix, expression, présentation, interprétation. 2e éd. Paris: INRA.
- Baize D. & Jabiol B., 1995. Guide pour la description des sols. Paris: INRA.
- Barengo, N. ; Rudow, A. ; Schwab, P. Projet Favoriser les Essences Rares : Tilleul à Petites Feuilles (*Tilia Cordata* Mill.) et Tilleul à Grandes Feuilles (*Tilia Platyphyllos* Scop.) ; OFEFP—Direction fédérale des forêts et EPFZ—Chaire de sylviculture : Zurich, Switzerland, 2001 ; pp. 1–8.
- Becker M., Nieminen T. M. et Gérémy F., 1994. Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France – the role of climate and atmospheric CO₂. *Annals of Forest Science.* 51(5), 477–492.
- Boulaine, J., 1982. Remarks on some fundamental concepts of soil science. I. Pedon, profile and soil. II. Horizons. III. Spatial soil variability. *Cahiers ORSTOM, Pédologie*, 19 (I) : 29-41.
- Bradshaw, R.H.W.; Holmqvist, B.H.; Cowling, S.A.; Sykes, M.T. The effects of climate change on the distribution and management of *Picea abies* in southern Scandinavia. *Can. J. For. Res.* 2000, 30, 1992–1998.
- Bréda N., Lefevre Y., Badeau V. (2002) Réservoir en eau des sols forestiers tempérés : spécificité et difficultés d'évaluation. *La Houille Blanche*, 3-2002, Forêts et Eau, 25-40
- Bréda N, Zapater M, Barlet C, Lefevre Y, Granier A (2008) Une pompe biologique performante : contribution des racines fines des arbres forestiers dans le dessèchement des couches argileuses du sol lors d'épisodes de sécheresse. In: SEC2008-Volume 1, International Symposium Drought and construction, Magnan J. P., Cojean R., Cui Y.J eds, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Marne-La-Vallée, 103-111.
- Browse, P.D.A.M. Hardy, *Woody Plants from Seed*; Grower Books: London, UK, 1979; p. 163.
- Chmielewski, F.-M.; Rötzer, T. Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agric. For. Meteorol.* 2001, 108, 101–112.
- Coutadeur C., Cousin I. & Nicoullaud B., 2000. Influence de la phase caillouteuse sur la réserve en eau des sols. *Étude Gestion Sols*, 7(3), 191-205.
- Cistyakova, A.A. Bolsoj ziznennyj cikl *Tilia cordata* Mill. [High life cycle of *Tilia cordata* Mill.]. *Mosk. Obsc. Ispyt. Prir. Otd. Biol.* 1979, 84, 85–98.
- Cistyakova, A.A. Biologičeskije osobennosti vegetativnogo vozobnovienia osnovnych porod v širokolistvennyh lesach [Biological features of vegetative reproduction of basic rocks in deciduous forests]. *Lesovedenie* 1982, 2, 11–17.

- De Jaegere T., Hein S. et Claessens H., 2016. A Review of the Characteristics of Small-Leaved Lime (*Tilia cordata* Mill.) and Their Implications for Silviculture in a Changing Climate. *Forests*. 7(3), 56; doi:10.3390/f7030056 (Page consultée le 10/06/2019).
- Delahaye L., Claessens H., Losseau J., Cordier S., Herman M., Lisein J., Chandelier A. et Vincke C., 2016. Entre valorisation, conservation et dépérissement : la gestion de nos chênaies à la croisée des chemins. *Forêt.Nature*. 140, 59-68.
- Delahaye L., Herman M., Claessens H., Chandelier A. et Marchal D., 2015. Note de référence pour la gestion du frêne dans le contexte de la crise liée à la chalarose. *Forêt.Nature*. 136, 51-58.
- DGO3, 2017. Le Nouveau Fichier Ecologique des Essences. [En ligne]. <https://fichierecologique.be> (Page consultée le 10/06/19).
- Diekmann, M. Ecological behaviour of deciduous hardwood trees in boreo-nemoral Sweden in relation to light and soil conditions. *For. Ecol. Manag.* 1996, 86, 1–14.
- DRÉNOU C. (coord.) [2006]. Les racines, face cachée des arbres. Paris, Institut pour le Développement Forestier.
- Ellenberg, H. *Vegetation Ecology of Central Europe*, 4th ed.; Wiley-VCH Verlag: Cambridge, UK, 1988; Volume 101, p. 756.
- Falin'ski, J.B. *Vegetation Dynamics in Temperate Lowland Primeval Forests*. Ecological Studies in Białowieża Forest; Junk Publishers: Dordrecht, The Netherlands, 1986; Volume 8, p. 537.
- Foucault A. et Raoult J.F., 2010. *Dictionnaire de géologie*, 7e éd. Paris : Dunod. 388p.
- Foucault A., 2009. *Climatologie et paléoclimatologie*, 1ère éd. Paris : Dunod. XII-307p.
- Granier A, Badeau V, Bréda N (1995) Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Revue Forestière Française*, XLVII: 59-68.
- Heit, C. Propagation from seed: 7. Successful propagation of six hardseeded group species. *Am. Nurserym.* 1967, 125, 10–45.
- Hemery E. G., Clark R. J., Aldinger E., Claessens H., Malvolti E. M., O'connor E., Raftoyannis Y., Savill S.P. et Brus R., 2010. Growing scattered broadleaved tree species in Europe in a changing climate: A review of risks and opportunities. *Forestry*. 83, 65–81.
- Himpens S., Laurent C., Marchal D., 2017. Le changement climatique et ses impacts sur les forêts wallonnes. *Recommandations aux décideurs, aux propriétaires et gestionnaires*. 86p.
- Huntley B. et Birks H. J. B., 1983. *An Atlas of Past and Present Pollen maps for Europe: 0– 13000 BP*. 1ère éd. UK : Cambridge University Press. 667 p.
- IPCC : International Panel on Climate Change, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [En ligne]. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf (Page consultée le 25/06/2019).
- IRM : Institut Royal Météorologique, 2019. *Atlas climatique*. [En ligne]. <https://www.meteo.be/meteo/view/fr/16788784-Atlas+Climatique.html> (Page consultée le 3/07/2019).

- Jamagne M., Bétrémieux R., Bégon J.C. & Mori A., 1977. Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. Bull. Tech. Inf., 324-325, 627-641.
- Juknys, R.; Sujetoviene, G.; Žeimavičius, K.; Šveikauskaite, I. Comparison of climate warming induced changes in silver birch (*Betula pendula* Roth) and lime (*Tilia cordata* Mill.) phenology. Balt. For. 2012,18,25–32.
- Koca, D.; Smith, B.; Sykes, M. Modelling regional climate change effects on potential natural ecosystems in Sweden. Clim. Chang. 2006, 78, 381–406.
- Köcher P., Horna V., Beckmeyer I. et Leuschner C., 2012. Hydraulic properties and embolism in small-diameter roots of five temperate broad-leaved tree species with contrasting drought tolerance. Ann. For. Sci. 69, 693–703.
- Kulagin A.Y. et Shayakhmetov I.F., 2007. Natural under-canopy regeneration and height-age structure of small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.) undergrowth in water-conservation forests around Pavlovskoe Reservoir, Ufa River. Russ. J. Ecol. 38, 247–252.
- Langenbruch C., Helfrich M. et Flessa H., 2012. Effects of beech (*Fagus sylvatica*), ash (*Fraxinus excelsior*) and lime (*Tilia spec.*) on soil chemical properties in a mixed deciduous forest. Plant Soil. 352, 389–403.
- Latałowa M., Pedziszewska A., Maciejewska E. et Świeta-Musznicka J., 2013. *Tilia* forest dynamics, Kretzschmaria deusta attack, and mire hydrology as palaeoecological proxies for mid-Holocene climate reconstruction in the Kashubian Lake District (N Poland). Holocene. 23, 667–677.
- Latte N., 2017. Comment le changement climatique influence-t-il la croissance du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) le long du gradient bioclimatique de la Belgique ? Une approche dendroécologique. Thèse de doctorat : Université de Gembloux Agro Bio-Tech (Belgique).
- Latte N., Debruxelles J., Sohier C., Degré A. et Claessens H., 2012. La dendroécologie : un outil pour affiner nos connaissances sur l'autoécologie des essences forestières. Forêt Wallonne. 116, 3-17.
- Latte N., Kint V., Drouet T., Penninckx V., Lebourgeois F., Vanwijnsberghe S. et Claessens H., 2015(1). Dendroécologie du hêtre en forêt de Soignes. Les cernes des arbres nous renseignent sur les changements récents et futurs. Forêt.Nature. 137, 24-37.
- Latte N., Lebourgeois F. et Claessens H., 2015(2). Increased tree-growth synchronization of beech (*Fagus sylvatica* L.) in response to climate change in northwestern Europe. Dendrochronologia. 33, 69-77.
- Latte N., Lebourgeois F., Kint V., Drouet T. et Claessens H., 2017. Le hêtre face au changement climatique : Le cas de la Belgique. Revue Forestière Française. 205-217.
- Lebourgeois F. et Merian P., 2012. Principes et méthodes de la dendrochronologie. Nancy : AgroParisTech-ENGREF. 88 p.
- Leuschner, C.; Köckemann, B.; Buschmann, H. Abundance, niche breadth, and niche occupation of Central European tree species in the centre and at the margin of their distribution range. For. Ecol. Manag. 2009, 258, 1248–1259.
- Lindner M., Maroschek M., Netherer S., Kremer A., Barbati A., Garcia-Gonzalo J., Seidl R., Delzon S., Corona P., Kolström M. et al., 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. For. Ecol. Manag. 259, 698–709.

- Manise T. et Vincke C., 2014. Impacts du climat et des déficits hydriques stationnels sur la croissance radiale du hêtre, du chêne, de l'épicéa et du douglas en Wallonie. *Forêt Wallonne*. 139, 48-57.
- Mayer H., 1992. *Waldbau auf Soziologisch-Ökologischer Grundlage*. 4ème éd. Fischer Verlag. Stuttgart : Germany. 522 p.
- Musy, A. and Soutter, M. (1991) *Physique du sol*. CH-1015 Lausanne, collection META.
- Niinemets, Ü.; Valladares, F. Tolerance to shade, drought, and waterlogging of temperate northern hemisphere trees and shrubs. *Ecol. Monogr.* 2008, 76, 521–547.
- Noirfalise, A. *Forêts et Stations Forestières en Belgique*, 1st ed.; Les Presses Agronomiques de Gembloux: Gembloux, Belgium, 1984; p. 236.
- Pearson R. G. et Dawson T. P., 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology & Biogeography*. 12, 361–371.
- Peiffer M., Le Goff N., Nys C., Ottorini J-M., Granier A. (2005). Bilan d'eau, de carbone et croissance comparées de deux hêtraies de plaine. *Revue Forestière Française*. 201.
- Pigott C. D. et Pigott S., 1993. Water as a determinant of the distribution of trees at the boundary of the Mediterranean zone. *J. Ecol.* 81, 557–566.
- Pigott C. D., 1982. Survival of mycorrhiza formed by *Cenococcum geophilum* Fr. in dry soils. *New Phytol.* 92, 513–517.
- Pigott C. D., 1991. *Tilia cordata* Miller Biological Flora of the British Isles. *J. Ecol.* 79, 1147– 1207.
- Pigott C. D., 2012. *Lime-trees and Basswoods. A biological monograph of the Genus Tilia*. 1ère éd. UK : Cambridge University Press. 405 p.
- Pigott C.D., 1989. Factors controlling the distribution of *Tilia cordata* Mill. at the northern limits of its geographical range. IV. Estimated ages of the trees. *New Phytol.* 112, 117–121.
- Radcliffe, D.E. and Simunek, J. (2010) *Soil Physics with Hydrus Modeling and Applications*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Radoglou K., Dobrowolska D., Spyroglou G. et Nicolescu V. N., 2009. A review on the ecology and silviculture of limes (*Tilia cordata* Mill., *Tilia platyphyllos* Scop. and *Tilia tomentosa* Moench.) in Europe. *Die Bodenkult.* 60, 9–20.
- Rameau J. C., Mansion D. et Dumé G., 1989. *Flore Forestière Française. Guide écologique illustré. Plaines et collines*. Institut Développement Forestier. Paris : France. 667–671.
- Ridremont F., Lejeune P., Claessens H. [2011]. Méthode pragmatique d'évaluation de la réserve en eau des stations forestières et cartographie à l'échelle régionale. *BASE 15(S2)* : 727-741.
- Ridremont F., Degré A., Claessens H., 2012. Mieux comprendre et évaluer la réserve en eau des sols forestiers. *ForêtWallonne*. 116, 18-29.
- Seppä, H.; Alenius, T.; Bradshaw, R.H.W.; Giesecke, T.; Heikkilä, M.; Muukkonen, P. Invasion of Norway spruce (*Picea abies*) and the rise of the boreal ecosystem in Fennoscandia. *J.Ecol.* 2009, 97, 629–640.
- Spiecker, H.; Hein, S.; Makkonen-Spiecker, K. ; Thies, M. Valuable Broadleaved Forests in Europe. European Forest Institute Research Reports; BRILL: Leiden, The Netherlands, 2009; Volume 22, pp. 123–147.

SPW : Service Public de Wallonie, 2015. Relief de la Wallonie - Modèle Numérique de Terrain (MNT) 2013-2014. [En ligne]. <http://geoportail.wallonie.be/catalogue/6029e738f828-438b-b10a-85e67f77af92.html> (Page consultée le 04.06.19).

Suszka, B.; Muller, C.; Bonnet-Masimbert, M. *Seeds of Forest Broadleaves from Harvest to Sowing*; Wydawnictwo naukowe: Warszawa-Poznan, Poland, 1994; p. 299.

Svejgaard Jensen J., 2003. EUFORGEN Technical Guidelines for Genetic Conservation and Use for Lime (*Tilia* spp.). International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italie, 6 pages.

Taverniers P., « Le tilleul à petites feuilles, une essence providentielle face aux changements climatiques ? », Mémoire de master en Bioingénieur orientation Gestion des forêts et des espaces naturels, sous la direction de [Hugues Claessens], Gembloux, Gembloux Agro-Bio Tech, 2017, 99.

Tetegan, M., Nicoulaud, B., Baize, D., Bouthier, A., Cousin, I., 2011. The contribution of rock fragments to the available water content of stony soils: proposition of new pedotransfer-functions. *Geoderma* 165: 40-49.

Thompson R. et Clark R. M., 2006. Spatio-temporal modelling and assessment of withinspecies phenological variability using thermal time methods. *Int. J. Biometeorol.* 50, 312– 322.

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

Wagneret, R.J., 1998. Scale issues in agroecological research chains. *Nutrient Cycling in Agrosystems*, 50 : 23.24.

Walther G. R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T. J. C., Fromentin J. M., Hoegh-Guldberg O. et Bairlein F., 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature.* 416, 389-395.

Weissen F. et al., 1991. *Le Fichier Ecologique des Essences (FEE) – Tome 2.* Namur : Belgique. 190 p.

Weissen F., Bronchart L., Piret A. et Lambert D., 1994. *Guide de boisement des stations forestières de Wallonie.* Namur : Belgique. 90 p.

Ziemer, R.R. The Role of Vegetation in the Stability of Forested Slopes. In *Proceedings of the International Union of Forestry Research Organizations, XVII World Congress, Kyoto, Japan, 6–17 September 1981*; IUFRO: Kyoto, Japan, 1981; pp. 297–308.

8. Annexes

Annexe 1 : Extrait du fichier ATMOSPH.IN utilisé pour l'initiation d'HYDRUS (Enfer)

Pcp_File_Version=4

*** BLOCK I: ATMOSPHERIC INFORMATION *****

MaxAL (MaxAL = number of atmospheric data-records)

21549

DailyVar SinusVar lLay lBCCycles lInterc lDummy lDummy lDummy lDummy lDummy
 f f f f f f f f f f

hCrits (max. allowed pressure head at the soil surface)

0

tAtm	Prec	rSoil	rRoot	hCritA	rB	hB	ht	RootDepth
1.1	0.114	0	0	100000	0	0	0	
2	1.802	0	0	100000	0	0	0	
3	0.706	0	0	100000	0	0	0	
4	0.724	0	0	100000	0	0	0	
5	0.637	0	0	100000	0	0	0	
6	0.848	0	0	100000	0	0	0	
7	0.164	0	0	100000	0	0	0	
8	0.49	0	0	100000	0	0	0	
9	0.533	0	0	100000	0	0	0	
10	1.004	0	0	100000	0	0	0	
11	0	0	0	100000	0	0	0	
12	0	0	0	100000	0	0	0	
13	0.21	0	0	100000	0	0	0	
14	0.001	0	0	100000	0	0	0	
15	0	0	0	100000	0	0	0	
16	0	0	0	100000	0	0	0	
17	0	0	0	100000	0	0	0	
18	0	0	0	100000	0	0	0	
19	0.172	0	0	100000	0	0	0	
20	0.204	0	0	100000	0	0	0	
21	0.014	0	0	100000	0	0	0	
22	0	0	0	100000	0	0	0	
23	0	0	0	100000	0	0	0	
24	0	0	0	100000	0	0	0	
25	0.349	0	0	100000	0	0	0	
26	0.015	0	0	100000	0	0	0	
27	0.016	0	0	100000	0	0	0	
28	0.601	0	0	100000	0	0	0	
29	1.512	0	0	100000	0	0	0	
30	5.87	0	0	100000	0	0	0	
31	0.976	0	0	100000	0	0	0	
32	1.304	0	0	100000	0	0	0	
33	1.132	0	0	100000	0	0	0	

Annexe 2 : Extrait du fichier METEO.IN utilisé pour l'initiation d'HYDRUS (Enfer)

```

Pcp_File_Version=4
* METEOROLOGICAL PARAMETERS AND INFORMATION |||
MeteoRecords Radiation Penman-Hargreaves
  21549      2      f
lEnBal lDaily lDummy lDummy lDummy lDummy lDummy lDummy lDummy lDummy
  f      f      f      f      f      t      f      f      f      f
WindHeight TempHeight
  100      100
iCrop (=0: no crop, =1: constant, =2: table, =3: daily) Sunshine RelativeHum
  0      0      0
Albedo
  0.23
Daily values
  t      Rad      TMax      TMin      RHMean      Wind      SunHours CropHeight      Albedo      LAI(SCF)      rRoot
  [T] [MJ/m2/d] [C] [C] [%] [km/d] [hour] [L] [-] [-] [L]
  1.1  1.2552  4.82  1  96.1  474.336  0
  2  1.1715  8.33  1.91  93.8  573.696  0
  3  3.4727  5.21  2.42  91.2  578.88  0
  4  2.3012  4.97  2.72  94.7  461.376  0
  5  2.8033  4.95  2.07  91.9  565.92  0
  6  2.4686  4.64  1.17  94.7  552.96  0
  7  0.6276  5  1.93  95.2  393.12  0
  8  3.0962  7.94  1.12  91.9  388.8  0
  9  2.1757  6.07  3.29  92.2  391.392  0
  10  1.046  5.94  3.01  98.8  360.288  0
  11  4.3932  3.39  0.56  90  262.656  0
  12  2.8451 -0.13 -2.86  91.9  153.792  0
  13  3.8911  4.17 -2.98  75.1  300.672  0
  14  2.1757  4.32 -1.67  91.2  695.52  0
  15  4.1003  3.32 -0.02  86.4  553.824  0
  16  4.435  2.87 -5.86  82.5  239.328  0
  17  4.2677  2.29 -5.95  79.3  314.496  0
  18  4.435  3.13 -6.21  79.3  380.16  0
  19  4.979  4.17 -6.02  86.2  472.608  0
  20  0.3766  5.1 -4.95  97  402.624  0
  21  0.9205  6.04  2.37  96.7  351.648  0
  22  2.4686  4.42  1.93  97.6  186.624  0
  23  0.6694  1.59  0.69  94.7  198.72  0
  24  0.3766 -0.14 -0.57  93.5  312.768  0
  25  2.8451 -2.38 -3.5  91.1  537.408  0
  26  2.887 -4.39 -6.53  89.1  222.912  0
  27  3.5982  1.9 -10.09  87.5  654.912  0

```

Annexe 3 : Extrait du fichier ATMOSPH.IN utilisé pour l'initiation d'HYDRUS (Dolomies)

```

Pcp_File_Version=4
*** BLOCK I: ATMOSPHERIC INFORMATION *****
MaxAL          (MaxAL = number of atmospheric data-records)
21549
DailyVar  SinusVar  lLay  lBCCycles  lInterc  lDummy  lDummy  lDummy  lDummy  lDummy
f         f         f         f         f         f         f         f         f         f
hCrits    (max. allowed pressure head at the soil surface)
0
tAtm      Prec      rSoil      rRoot      hCritA      rB      hB      ht      RootDepth
1.1       0.041      0          0          100000      0       0       0       0
2         1.747      0          0          100000      0       0       0       0
3         0.466      0          0          100000      0       0       0       0
4         0.265      0          0          100000      0       0       0       0
5         0.423      0          0          100000      0       0       0       0
6         0.729      0          0          100000      0       0       0       0
7         0.17       0          0          100000      0       0       0       0
8         0.35       0          0          100000      0       0       0       0
9         0.351      0          0          100000      0       0       0       0
10        0.246      0          0          100000      0       0       0       0
11        0.003      0          0          100000      0       0       0       0
12        0         0          0          100000      0       0       0       0
13        0.126      0          0          100000      0       0       0       0
14        0.008      0          0          100000      0       0       0       0
15        0         0          0          100000      0       0       0       0
16        0         0          0          100000      0       0       0       0
17        0         0          0          100000      0       0       0       0
18        0         0          0          100000      0       0       0       0
19        0.07       0          0          100000      0       0       0       0
20        0.176      0          0          100000      0       0       0       0
21        0.036      0          0          100000      0       0       0       0
22        0         0          0          100000      0       0       0       0
23        0         0          0          100000      0       0       0       0
24        0.006      0          0          100000      0       0       0       0
25        0.827      0          0          100000      0       0       0       0
26        0.002      0          0          100000      0       0       0       0
27        0.065      0          0          100000      0       0       0       0
28        0.326      0          0          100000      0       0       0       0
29        1.074      0          0          100000      0       0       0       0
30        3.197      0          0          100000      0       0       0       0
31        0.491      0          0          100000      0       0       0       0
32        0.938      0          0          100000      0       0       0       0
33        0.42       0          0          100000      0       0       0       0

```

Annexe 4 : Extrait du fichier METEO.IN utilisé pour l'initiation d'HYDRUS (Dolomies)

```

Pcp_File_Version=4
* METEOROLOGICAL PARAMETERS AND INFORMATION |||
MeteoRecords Radiation Penman-Hangreaves
21549      0      f
lEnBal lDaily lDummy lDummy lDummy lDummy lDummy lDummy lDummy lDummy
f      f      f      f      f      t      f      f      f      f
Latitude Altitude
40      120
ShortWaveRadA ShortWaveRadB
0.25    0.5
LongWaveRadA LongWaveRadB
0.9     0.1
LongWaveRadA1 LongWaveRadB1
0.34    -0.139
WindHeight TempHeight
100     100
iCrop (=0: no crop, =1: constant, =2: table, =3: daily) SunShine RelativeHum
0       0       0
Albedo
0.23
Daily values
t      Rad      TMax      TMin      RHMean      Wind      SunHours CropHeight      Albedo      LAI(SCF)      rRoot
[T] [MJ/m2/d] [C] [C] [%] [km/d] [hour] [L] [-] [-] [L]
1.1  1.2552  4.86  1.64  89.4  508.896  0
2    1.1715  9.1   1.71  91.8  591.84   0
3    3.4727  5.73  2.01  86    622.08   0
4    2.3012  4.7   2.25  90.1  501.12   0
5    2.8033  4.81  1.96  87.5  579.744  0
6    2.4686  4.94  1.61  90.2  577.152  0
7    0.6276  5.26  2.09  92.2  416.448  0
8    3.0962  8.04  1.44  91    400.896  0
9    2.1757  6     2.73  90.6  436.32   0
10   1.046   6.71  2.8   93.9  361.152  0
11   4.3932  3.33  0.26  90.8  165.888  0
12   2.8451  0.07  -3.12 92.6  152.928  0
13   3.8911  5.08  -3.43 82    252.288  0
14   2.1757  4.56  -1.69 89.8  480.384  0
15   4.1003  3.28  -0.47 85.6  519.264  0
16   4.435   2.66  -4.23 83.1  191.808  0
17   4.2677  3.11  -5.38 79.4  209.952  0
18   4.435   3.54  -5.21 81.3  236.736  0
19   4.979   3.75  -4.5   80.5  423.36   0
20   0.3766  4.98  -3.25 94.7  371.52   0
21   0.9205  5.67  2.36  92.7  356.832  0
22   2.4686  5.87  1.24  94.6  161.568  0
23   0.6694  2.04  0.12  94.6  148.608  0
24   0.3766  0.76  -0.65 92.6  281.664  0
25   2.8451  -1.96 -3.64 85.7  456.192  0
26   2.887   -4.62 -7.79 86.2  163.296  0
27   3.5982  1.25  -10.5 84.4  550.368  0
28   0.795   6.78  -7.17 85.2  728.352  0
29   1.6318  9.1   1     86.1  844.992  0
30   1.297   9.91  5.44  94.8  442.368  0
31   4.2677  9.46  5.61  80.7  584.064  0

```